

Національний університет цивільного захисту України
Державної служби України з надзвичайних ситуацій

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Кустов Максим Володимирович

УДК 355.588:[614.8: 504.064]

ДИСЕРТАЦІЯ
ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНІ МЕТОДИ ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ
НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ, ЩО ПРИЗВОДЯТЬ ДО ВИКИДУ
В АТМОСФЕРУ НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН

21.02.03 – цивільний захист

21 – національна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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

_____М.В. Кустов

Науковий консультант – Калугін Володимир Дмитрович, доктор хімічних наук,
професор

Харків – 2019

АНОТАЦІЯ

Кустов М.В. Організаційно-технічні методи ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, що призводять до викиду в атмосферу небезпечних речовин. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.02.03 «цивільний захист» (21 – національна безпека). – Національний університет цивільного захисту України, Державна служба України з надзвичайних ситуацій, Харків, 2018.

У дисертації сформульовано та вирішено актуальну науково-практичну проблему в галузі забезпечення цивільного захисту держави, а саме: розроблено нові організаційно-технічні методи ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду в атмосферу газоподібних та дисперсних небезпечних речовин.

У процесі виконання роботи **вперше отримані наступні наукові результати:**

- розроблено математичну модель осадження штучно ініційованими опадами газоподібних та дисперсних небезпечних речовин, що потрапляють в атмосферу внаслідок природних та техногенних катастроф, яка являє собою систему з чотирьох залежностей, в якій перша та друга залежності описують процеси осадження газоподібних небезпечних речовин та вплив обраного управлінського рішення, а третя та четверта залежності описують інтенсивність процесу осадження дисперсних небезпечних речовин як результат вибору управлінського впливу;

- розроблено організаційно-технічний метод ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери газоподібних та дисперсних небезпечних хімічних та радіоактивних речовин, який спирається на розроблену математичну модель процесу осадження штучно ініційованими атмосферними опадами

газоподібних та дисперсних небезпечних речовин і передбачає виконання п'яти процедур, а саме: отримання керівником ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій необхідного комплексу моніторингової інформації; розрахунок часу вільного поширення зони ураження в атмосфері; визначення розмірів прогнозованої зони атмосферного ураження; проведення оцінки належності площі надзвичайної ситуації області допустимих рішень; залучення сил та засобів для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій;

– розроблено математичну модель процесу локалізації та ліквідації штучно ініційованими опадами осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням, що являє собою систему з п'яти залежностей. Перша залежність описує рух падаючої краплі опадів над осередком надзвичайної ситуації. Друга і третя залежності описують масовий та тепловий баланс краплі в осередку горіння. Четверта залежність описує процес поглинання тепла атмосферними опадами від осередку горіння залежно від управлінського впливу на атмосферні процеси. П'ята залежність визначає граничну умову, коли ліквідація осередку інтенсивного горіння неможлива та відбувається лише його локалізація;

– розроблено організаційно-технічний метод ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізації осередків інтенсивного горіння, який спирається на розроблену математичну модель процесу локалізації та ліквідації штучно ініційованими опадами осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням та передбачає використання чотирьох процедур, а саме: збір, обробка та систематизація моніторингових даних; прогнозування розвитку осередку горіння та інтенсивності опадів; постановка конкретних задач виконавцям; безпосередній вплив на атмосферні процеси;

– розроблено функціональну схему експериментальної масообмінної установки для дослідження процесів осадження краплями опадів газоподібних, рідких та твердих аерозольних небезпечних речовин, включаючи продукти горіння;

– розроблено функціональну схему експериментальної камери для дослідження процесів горіння, яка реалізує можливість встановлення інтенсивності горіння горючих матеріалів з різними властивостями при широкому діапазоні метеорологічних умов, включаючи опади, температуру, вітер та вологість горючого матеріалу і повітря.

В якості **об’єкта дослідження** було обрано надзвичайні ситуації природного та техногенного характеру, які супроводжуються викидом в атмосферу небезпечних речовин.

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету дисертаційної роботи, визначено об’єкт, предмет і методи досліджень, наведено наукову новизну та розкрито теоретичне і практичне значення отриманих результатів, а також напрями їхнього впровадження.

У **першому розділі** дисертаційної роботи проведено аналіз існуючих систем та принципів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру з викидом небезпечних речовин в атмосферу. Встановлено, що при виникненні надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру в атмосферне повітря потрапляють хімічні та радіоактивні речовини у дисперсному та газоподібному стані з різними поверхневими властивостями, які здатні реагувати з активними компонентами атмосфери та утворювати нові небезпечні сполуки.

У **другому розділі** дисертаційної роботи було розглянуто особливості надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру з викидом небезпечних речовин. Особливості ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру в Україні передбачають необхідність реалізації будь-якої підсистеми цивільного захисту 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 методів і способів штучного ініціювання опадів над зоною забруднення. Розроблено загальний підхід до ліквідації наслідків

надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду в атмосферу небезпечних хімічних та радіоактивних речовин, шляхом штучного ініціювання опадів, що базується на принципі розподілу зон атмосферного повітря на зону ураження та область активного впливу на атмосферні процеси. Запропонований підхід дозволяє збільшити висоту активного впливу на зону ураження від надзвичайної ситуації з десятків метрів до декількох кілометрів.

У **третьому розділі** дисертаційної роботи, з метою створення організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, вперше розроблено математичну модель осадження штучно ініційованими атмосферними опадами газоподібних та дисперсних небезпечних хімічних та радіоактивних речовин, що викидаються в атмосферу внаслідок надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, яка являє собою систему з чотирьох залежностей. Перша залежність описує процес осадження газоподібних небезпечних речовин, що викидаються унаслідок надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру. Друга залежність описує вплив на процес осадження газоподібних небезпечних речовин хімічних властивостей небезпечного газу, метеорологічних умов та обраного управлінського впливу на атмосферні процеси. Третя та четверта залежності описують процес осадження дисперсних небезпечних речовин в широкому діапазоні розмірів, що утворюються при надзвичайних ситуаціях природного та техногенного характеру, залежно від обраного керуючого впливу на атмосферні процеси.

На базі розробленої математичної моделі осадження штучно ініційованими атмосферними опадами газоподібних та дисперсних небезпечних хімічних та радіоактивних речовин вперше розроблено організаційно-технічний метод ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин.

У **четвертому розділі** дисертаційної роботи вперше розроблено математичну модель процесу локалізації та ліквідації штучно ініційованими опадами осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням, яка являє собою систему з п'яти залежностей. Перша залежність описує рух падаючої краплі опадів над осередком надзвичайної ситуації. Друга та третя залежності описують масовий та тепловий баланс краплі в осередку горіння. Четверта залежність описує процес поглинання тепла атмосферними опадами від осередку горіння залежно від управлінського впливу на атмосферні процеси. П'ята залежність визначає граничну умову, коли ліквідація осередку інтенсивного горіння неможлива та відбувається лише його локалізація.

На базі розробленої математичної моделі процесу локалізації та ліквідації штучно ініційованими опадами осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням вперше розроблено організаційно-технічний метод ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізації осередків інтенсивного горіння.

У **п'ятому розділі** дисертаційної роботи було виконано перевірку достовірності розроблених математичних моделей та організаційно-технічних методів. Для перевірки достовірності розроблених організаційно-технічних методів вперше розроблено лабораторну установку для дослідження процесів осадження газоподібних та дисперсних речовин та лабораторну установку для дослідження процесів горіння при різних метеорологічних умовах. Спеціально розроблені методики проведення експериментів дозволяють перевіряти достовірність розроблених моделей та методів. Результати виконаних експериментів укладаються в довірчий інтервал, розрахований за критерієм Фішера з надійністю 0,95, що засвідчує достовірність розроблених моделей та методів.

У **шостому розділі** дисертаційної роботи було запропоновано варіанти впровадження розроблених методів ліквідації наслідків надзвичайних

ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду в атмосферу небезпечних речовин. Запропоновано нову комплексну систему ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду в атмосферу небезпечних речовин, на основі розроблених алгоритмів методів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, як шляхом осадження штучно ініційованими опадами газоподібних та дисперсних небезпечних хімічних та радіоактивних речовин, так і шляхом локалізації зони інтенсивного горіння з використанням штучно ініційованих опадів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблено нові підходи до ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру, де визначальним є використання методів штучного опадоутворення. Розроблено комплексну систему запобігання надзвичайним ситуаціям природного та техногенного характеру, що призводять до поширення в атмосфері газоподібних та дисперсних небезпечних речовин, на основі розроблених автором алгоритмів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій шляхом осадження небезпечних речовин з атмосфери та шляхом локалізації осередків природних та техногенних катастроф, що супроводжуються інтенсивним горінням.

Основні наукові положення та висновки дисертаційної роботи доведено до рівня конкретних методичних розробок і прикладних рекомендацій. На основі результатів моделювання процесів опадоутворення та осадження небезпечних речовин із атмосфери, а також отриманих емпіричних моделей сорбції димів розроблено автоматизований програмний комплекс, який дозволяє спростити та підвищити оперативність прогнозування та організації процесів мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій для атмосферного повітря в широкому діапазоні метеоумов при технічній реалізації різних методів штучного опадоутворення. Основні результати досліджень впроваджені в Державному пожежно-рятувальному загоні ГУ ДСНС України в Донецькій області, в підрозділах Головного

управління ДСНС України в Луганській області, в Національному університеті цивільного захисту України та в Інституті державного управління у сфері цивільного захисту.

Ключові слова: організаційно-технічний метод, надзвичайні ситуації техногенного та природного характеру; викид в атмосферу небезпечних речовин; газоподібні речовини; дисперсні речовини; небезпечні хімічні речовини; небезпечні радіоактивні речовини; осадження небезпечних речовин з атмосфери, штучне опадоутворення; локалізація осередку інтенсивного горіння; активний реагент; система ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Монографія:

1. **Кустов М.В.** Современные способы искусственного инициирования осадков для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. Харьков, СтильИздат, 2016. 130 с.

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

2. Пospelov Б.Б., **Кустов М.В.** Иницирование атмосферных осадков многопозиционными системами излучателей. *Зб. наук. праць Харківського університету Повітряних Сил*. Харків, 2014. Вип. 3(40). С. 184–189. (Стаття у науковому фаховому виданні України, включеному до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

Здобувачу особисто належить постановка задачі, аналіз останніх досліджень і публікацій, вибір конфігурації розміщення випромінювачів.

3. **Kustov M.V.**, Pospelov B.B. Determination of the electromagnetic sediment initiation field during radioactive and chemical substances deposition from the atmosphere. *Екологічна безпека*. Кременчук, 2015. Вип. 1/2015 (19). С. 50–53. (Стаття у науковому фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Open Academic Journals Index, Ulrich's Periodicals Directory).

Здобувачу особисто належить постановка задачі, аналіз технічних засобів іонізації повітря, розрахунок зон електромагнітного впливу на хмари.

4. **Кустов М.В.** Экспериментальное исследование интенсивности осаждения аэрозольных продуктов горения атмосферными осадками.

Екологічна безпека. Кременчук, 2015. Вип. 2/2015 (20). С. 84–90. (Стаття у науковому фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Open Academic Journals Index, Ulrich's Periodicals Directory).

5. **Кустов М.В.** Исследование динамики образования и выпадения кислотных осадков в результате крупных природных и техногенных пожаров. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. Харьков, 2016. Вип. 1/10 (79). С. 11–17. (Стаття у науковому фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз Scopus, Index Copernicus, Open Academic Journals Index, Ulrich's Periodicals Directory, American Chemical Society, Bielefeld Academic Search Engine, CrossRef).

6. **Кустов М.В.**, Калугін В.Д., Тютюник В.В. Узагальнена процедура штучного ініціювання опадів над зоною ураження від надзвичайних ситуацій. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2017. Вип. 26. С. 87–96. (Стаття у науковому фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory).

Здобувачу особисто належить ідея статті, розробка деяких елементів процедури прийняття управлінського рішення та його виконання.

7. **Kustov M.**, Kalugin V. Modification of pyrotechnic composition to effectively neutralize acidic and chemically hazardous atmospheric precipitation. *Техногенно-екологічна безпека: наук.-техн. журн.* Харків, 2018. № 3 (1/2018). С. 28–32. (Стаття у науковому фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз Root Indexing, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich Web, Cite Factor).

Здобувачу особисто належить проведення експериментів, інтерпретація результатів.

8. **Кустов М.В.**, Соболев О.М., Тютюник В.В., Калугін В.Д. Підсистема мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій для атмосфери, яка побудована на базі методів штучного опадоутворення. *Проблеми надзвичайних ситуацій*.

Харків, 2018. Вип. 27. С. 52–65. (Стаття у науковому фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich’s Periodicals Directory).

Здобувачу особисто належить розробка методики мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій, проведення розрахунків розмірів зон ураження.

Статті у наукових фахових виданнях України:

9. **Кустов М.В.** Калугин В.Д. Использование водосодержащих образований в атмосфере для тушения крупных пожаров на открытой местности. *Зб. наук. праць Харківського університету Повітряних Сил.* Харків, 2011. Вип. 2(28). С. 176–179. (Стаття у науковому фаховому виданні України).

Здобувачу особисто належить узагальнення літературних джерел, аналіз особливостей використання опадів для гасіння пожеж.

10. **Кустов М.В.,** Калугин В.Д., Коврегін В.В. Влияние климатических факторов на процессы развития и прекращения крупных пожаров на открытой местности. *Проблемы пожарной безопасности.* Харьков, 2011. Вып. 29. С. 102–109. (Стаття у науковому фаховому виданні України).

Здобувачу особисто належить проведення експериментальних досліджень та обробка їх результатів.

11. **Кустов М.В.** Исследование механизмов каплеобразования при тушении пожаров атмосферными осадками. *Проблемы пожарной безопасности.* Харьков, 2011. Вып. 30. С. 153–159. (Стаття у науковому фаховому виданні України).

12. **Кустов М.В.,** Калугин В.Д. Интенсификация процесса каплеобразования в атмосфере путем активного воздействия на неё мощного электромагнитного излучения. *Проблемы пожарной безопасности.* Харьков, 2012. Вып. 31. С. 109–119. (Стаття у науковому фаховому виданні України).

Здобувачу особисто належить узагальнення літературних джерел, проведення теоретичних розрахунків процесу конденсації пари води на заряджених центрах краплеутворення.

13. **Кустов М.В.**, Калугин В.Д. К вопросу о возможности применения различных методов конденсации для осаждения атмосферной влаги. *Зб. наук. праць Харківського університету Повітряних Сил*. Харків, 2012. Вип. 2(31). С. 134-137. (Стаття у науковому фаховому виданні України).

Здобувачу особисто належить узагальнення літературних джерел, розрахунок критичного ступеню пересичення пари.

14. **Кустов М.В.** Влияние скорости ветра, влажности воздуха и горючего материала на скорость распространения ландшафтных пожаров. *Проблемы пожарной безопасности*. Харьков, 2012. Вып. 32. С. 133-141. (Стаття у науковому фаховому виданні України).

15. **Кустов М.В.**, Калугин В.Д. Установка для моделирования процессов конденсации в атмосферных аквааэрозолях. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2012. Вип. 16. С. 54–58. (Стаття у науковому фаховому виданні України).

Здобувачу особисто належить ідея статті, розробка схеми установки та методики проведення досліджень.

16. **Кустов М.В.**, Шаршанов А.Я. Модель процесса испарения атмосферных осадков в воздушной среде в зоне ландшафтных пожаров. *Проблемы пожарной безопасности*. Харьков, 2013. Вып. 33. С. 104–112. (Стаття у науковому фаховому виданні України).

Здобувачу особисто належить ідея статті, формулювання завдання, написання огляду.

17. Шаршанов А.Я., **Кустов М.В.** Моделирование атмосферных осадков для определения их противопожарного потенциала. *Проблемы пожарной безопасности*. Харьков, 2013. Вып. 34. С. 186–193. (Стаття у науковому фаховому виданні України).

Здобувачу особисто належить формулювання завдання, участь у інтерпретації результатів, написання огляду.

18. **Кустов М.В.,** Калугин В.Д. Влияние межчастичных взаимодействий на процесс осадкообразования в искусственно ионизированной области атмосферы. *Пожежна безпека*. Львів, 2013. №. 23. С. 93–101. (Стаття у науковому фаховому виданні України).

Здобувачу особисто належить проведення молекулярно-динамічного моделювання.

19. **Кустов М.В.,** Поспелов Б.Б. Исследование процессов искусственной стимуляции осадков при частичной ионизации атмосферы электромагнитным излучением. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2013. Вип. 17. С. 72–81. (Стаття у науковому фаховому виданні України).

Здобувачу особисто належить ідея статті, проведення експериментів, інтерпретація результатів.

20. **Кустов М.В.,** Поспелов Б.Б. Параметры импульсного сверхвысокочастотного излучения для интенсификации осадкообразования в зоне чрезвычайных ситуаций. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2013. Вип. 18. С. 95–105. (Стаття у науковому фаховому виданні України).

Здобувачу особисто належить формулювання завдання, написання огляду.

21. **Кустов М.В.** Влияние концентрации ионов в атмосфере на интенсивность осадков над зоной выброса опасных веществ. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2014. Вип. 20. С. 93–98. (Стаття у науковому фаховому виданні України).

22. **Кустов М.В.** Прогнозирование эффективности очистки атмосферы от твёрдых продуктов горения. *Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист*. Київ, 2015. Вип. 9. С. 78–91. (Стаття у науковому фаховому виданні України).

23. **Кустов М.В.** Дополнения к методикам прогнозирования зон химического и радиационного загрязнения территории. *Проблеми*

надзвичайних ситуацій. Харків, 2016. Вип. 23. С. 67–77. (Стаття у науковому фаховому виданні України).

24. **Кустов М.В.**, Калугин В.Д. Модификация пиротехнических составов для эффективного осаждения из атмосферы вредных веществ. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2016. Вип. 24. С. 77–81. (Стаття у науковому фаховому виданні України).

Здобувачу особисто належить розробка методики експерименту та його проведення.

25. **Кустов М.В.**, Калугин В.Д. Система обеспечения экологической безопасности нижней атмосферы с использованием методов искусственного осадкообразования. *Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист*. Київ, 2016. Вип. 11. С. 37–43. (Стаття у науковому фаховому виданні України).

Здобувачу особисто належить розробка структури системи та опис її складових.

26. **Кустов М.В.**, Калугин В.Д., Тютюник В.В., Ольховиков С.В. Функционирование системы обеспечения экологической безопасности атмосферы при возникновении чрезвычайных ситуаций. *Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист*. Київ: ІГНС НАН України, 2017. Вип. 12. С. 24-37. (Стаття у науковому фаховому виданні України).

Здобувачу особисто належить розробка методики розрахунку ризиків при використанні систем ліквідації наслідків НС.

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

27. Андронов В.А., Калугин В.Д., **Кустов М.В.** Установка для исследования горючих и огнезащитных свойств веществ и материалов при различных условиях. *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация*. Минск, 2013. № 2(34). С. 47–51. (Стаття у закордонному науковому виданні за фахом).

Здобувачу особисто належить ідея статті, розробка схеми установки та опис методики проведення досліджень.

28. Поспелов Б.Б., **Кустов М.В.** Исследование процесса нуклеации водяного пара под воздействием электромагнитного излучения. *Чрезвычайные ситуации: образование и наука*. Гомель, 2013. Т. 8, №. 2. С. 45–50. (Стаття у закордонному науковому виданні за фахом).

Здобувачу особисто належить розробка методики експериментів, проведення експериментів, інтерпретація результатів.

29. **Кустов М.В.** Физико-химические основы процесса каплеобразования в атмосфере на заряженных центрах конденсации. *Технологии техносферной безопасности: научный интернет-журнал*. Москва, 2014. № 1 (53). С. 1–9. URL: <http://academygps.ru/img/UNK/asit/ttb/2014-1/15-01-14.ttb.pdf>. (Стаття у закордонному науковому виданні за фахом – електронне видання).

30. **Кустов М.В.** Определение необходимой интенсивности осадков для тушения ландшафтного пожара. *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. Москва, 2014. №. 1. С. 12–18. (Стаття у закордонному науковому виданні за фахом).

31. **Кустов М.В.** Влияние концентрации ионов в атмосфере Земли на процессы осадкообразования над зоной пожара. *Научные и образовательные проблемы гражданской защиты*. Химки, 2014. № 2(21). С. 114–118. (Стаття у закордонному науковому виданні за фахом).

32. **Kustov M.**, Kalugin V., Levterov A. The main physical and chemical properties of the radioactive particles ejected into the atmosphere at accidents. *Scientific Bulletin Of North University Center Of Baia Mare*. Baia Mare, 2015. Series D, Volume XXIX, №. 2. Pp. 101–113. (Стаття у закордонному науковому виданні за фахом).

Здобувачу особисто належить аналіз та систематизація властивостей радіоактивних часток, встановлення особливостей їх осадження із атмосфери.

33. **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. Pp. 73–76. (Стаття у закордонному науковому виданні за фахом).

Здобувачу особисто належить формулювання завдання, моделювання процесу коагуляції.

34. **Кустов М.В.**, Рябцев В.Н. Экспериментальная проверка моделей осаждения газообразных опасных химических веществ осадками. *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. Минск, 2017. Т. 1, № 1. С. 80–86. (Стаття у закордонному науковому виданні за фахом).

Здобувачу особисто належить розробка методики експерименту та його проведення, інтерпретація результатів.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

35. **Кустов М.В.**, Калугин В.Д. Влияние климатических факторов на процессы развития и прекращения крупных пожаров на открытой местности. *Пожарная безопасность: проблемы и перспективы*. Сб. материалов II Междунар. науч.-практ. конф. 22 сентября 2011. Воронеж. 2011. С. 208–209. (Форма участі – заочно).

Здобувачу особисто належить збір метеорологічних даних регіону, обробка результатів класифікації по рівню впливу.

36. **Кустов М.В.**, Калугин В.Д. Влияние влажности на процессы развития и прекращения крупных пожаров на открытой местности. *Пожарная безопасность-2011*. X Міжнародна наук.-практ. конф. 12 травня 2011. Харків: НУЦЗУ. 2011. С. 262–263. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить проведення експериментальних досліджень та інтерпретація їх результатів.

37. **Кустов М.В.**, Калугин В.Д. Воздействие мощного электромагнитного излучения на процессы каплеобразования в атмосфере.

Пожарная и аварийная безопасность. Сб. материалов VII науч.-практ. конф. 18 ноября 2012. Иваново. 2012. С. 118–121. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить моделювання впливу електромагнітного поля на процеси конденсації пари.

38. **Кустов М.В.,** Калугин В.Д. Электромагнитный метод интенсификации осадкообразования в атмосфере земли. *Пожарная безопасность: проблемы и перспективы.* Материалы III Международной научно-практической конференции. 20 сентября 2012. Воронеж. 2012. С. 149–151. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить ідея використання існуючих технічних засобів для штучної іонізації повітря.

39. **Кустов М.В.,** Калугин В.Д. Интенсификация процесса разрушения аквааэрозолей в атмосфере при воздействии на них мощным электромагнитным излучением. *Дисперсные системы.* Материалы XXV науч. конф. стран СНГ. 17-21 сентября 2012. Одесса: ОНУ. 2012. С. 157–158. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить розрахунок потужності електромагнітного поля для штучної інтенсифікації опадів.

40. **Кустов М.В.,** Несторчук И.В. Исследование скорости распространения пламени по горючим материалам ландшафтных пожаров. *Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення боєздатності оперативно-рятувальних підрозділів.* Зб. матер. Всеукр. наук.-практ. конф. 10 октября 2013. Харків. НУЦЗУ. 2013. С. 66–67. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить проведення експериментальних досліджень та інтерпретація їх результатів.

41. **Кустов М.В.** Интенсификация осадкообразования в атмосфере с помощью импульсного СВЧ излучения. *Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций.* Сб. материалов Межд. конф. 28 ноября 2013. Минск. 2013. С. 91–93. (Форма участі – очна).

42. **Кустов М.В.** Исследование процесса каплеобразования в атмосфере при различной влажности воздуха. *Теорія та практика гасіння пожеж та ліквідації НС*. Зб. праць Міжн. конф. 6-7 грудня 2013 року. Черкаси. 2013. С. 213-215. (Форма участі – очна).

43. **Кустов М.В.** Тушение ландшафтных пожаров под действием атмосферных осадков. *Пожежна безпека – 2013*. Матеріали XI Міжн. наук.-практ. конф. 25-26 вересня 2013. Київ. 2013. С. 407–411. (Форма участі – очна).

44. **Кустов М.В.,** Несторчук И.В. Исследование скорости распространения пламени по материалам растительного происхождения. *Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів*. Зб. праць Всеукр. конф. 12 березня 2014. Харків. 2014. С. 91-92. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить проведення експериментальних досліджень та інтерпретація їх результатів.

45. **Кустов М.В.** Влияние концентрации ионов в атмосфере на интенсивность осадков над зоной выброса опасных веществ. *Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів*. Зб. матеріалів. Всеукраїнської наук.-практ. конф. 10 березня 2014. Харків: НУЦЗУ. 2014. С. 225–228. (Форма участі – очна).

46. **Кустов М.В.** Химически опасные выбросы в атмосферу при крупных пожарах. *Сучасний стан цивільного захисту України: перспективи та шляхи до Європейського простору*. Матеріали 17 Всеукраїнської наук.-практ. конференції рятувальників. 10 жовтня 2015. Київ: ІДУ ЦЗ, 2015. С. 222–225. (Форма участі – заочна).

47. Тютюник В.В., Калугин В.Д., Тютюник Ю.В., **Кустов М.В.** Комплексна система моніторингу надзвичайних ситуацій для збереження та раціонального використання природних та енергетичних ресурсів України. *Сучасні ресурсозберігаючі технології. Проблеми і перспективи* Зб. доповідей.

III Міжнародн. наук.-практ. конф. 9-13 листопада 2015. Одеса. ОНУ ім. І.І. Мечнікова, 2015. С. 268–276. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить розробка підсистеми ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру.

48. **Кустов М.В.** Экспериментальное исследование процесса осаждения дымов атмосферными осадками. *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация*. Материалы VII Межд. науч.-практ. конф. 1 ноября 2016. Минск (РБ). 2016. С. 213-215. (Форма участі – заочна).

49. **Кустов М.В.,** Калугин В.Д. Анализ основных классов химических реагентов для искусственного осадкообразования. *Проблеми техногенно-екологічної безпеки: освіта, наука, практика*. Материалы Всеукр. науч.-практ. конф. 24 листопада 2016. Харків. НУЦЗУ. 2016. С. 175-176. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить систематизація та класифікація основних небезпечних речовин, що викидаються в атмосферу при надзвичайних ситуаціях.

50. **Кустов М.В.,** Калугин В.Д. Исследование процесса горения пиротехнических составов для искусственного осадкообразования. *Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций*. Материалы VII Межд. науч.-практ. конф. 24 октября 2016. Кокчетав (Казахстан). 2016. С. 100-103. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить проведення експериментальних досліджень та інтерпретація їх результатів.

51. **Кустов М.В.,** Калугин В.Д. Расчет температуры горения пиротехнических составов для искусственного осадкообразования. *Пожарна та техногенна безпека*. Матеріали Міжнародн. наук.-практ. конф. 21 жовтня 2016. Львів. ЛДУБЖД. 2016. С. 319-321. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить розрахунок температури горіння піротехнічних складів.

52. **Кустов М.В.**, Калугин В.Д. Электрофизический метод интенсификации осадков над зоной масштабного пожара. *Проблеми пожежної безпеки*. Матеріали Міжнародн. наук.-практ. конф. 9 листопада 2016. Харків. НУЦЗУ. 2016. С. 96-98. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить ідея статті, постановка задач та аналіз результатів.

53. Тютюник В.В., Калугін В.Д., **Кустов М.В.** Науково-технічні напрямки розвитку підсистем комплексної системи моніторингу, попередження, ліквідації надзвичайних ситуацій та мінімізації їх наслідків в Україні. *Безпека життєдіяльності на транспорті і виробництві – освіта, наука, практика*. Матеріали IV Міжнар. Науково-практ. Конф. 20 травня 2017. Херсон, ХДМА. 2017. С. 83-89. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить розробка підсистеми ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

54. Тютюник В.В., Калугін В.Д., **Кустов М.В.** Наукові основи створення в Україні системи моніторингу, попередження, ліквідації надзвичайних ситуацій та особливості розвитку її підсистем. *Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку*. Матеріали 19 Всеукраїнської наук.-практ. конференції 26 вересня 2017. Київ: ІДУ ЦЗ. 2017. С. 431-434. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить розробка підсистеми ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

55. Тютюник В.В., Калугін В.Д., **Кустов М.В.** Науково-технічні напрямки розвитку підсистеми моніторингу, попередження надзвичайних ситуацій та мінімізації їх наслідків єдиної державної системи цивільного захисту. *Стратегія реформування організації цивільного захисту*. Матеріали наук.-практ. конференції 12 червня 2018. Київ: УкрНДІЦЗ. 2018. С. 237-239. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить розробка підсистеми ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

56. **Кустов М.В.**, Калугин В.Д. Прогнозирование интенсивности осаждения газообразных токсичных химических веществ атмосферными осадками. *East European Scientific Journal*. Варшава, 2016. Вип. 2(6). С. 52–59.

Здобувачу особисто належить моделювання процесу сорбції небезпечних газів.

57. Пат. 104709 України, МПК А62С 99/00 (2014.01) Стенд для дослідження процесів горіння / Андронов В.А., Тарахно О.В., Калугін В.Д., **Кустов М.В.**, Жернокльов К.В.; патентовласник: Національний університет цивільного захисту України. – № 201306647 от 28.05.2013.

58. Пат. 104561 України, МПК G05D 22/00 (2014.01) Кліматична камера / Калугін В.Д., **Кустов М.В.**, Поспелов Б.Б.; патентовласник: Національний університет цивільного захисту України. – № 201304372 от 10.02.2014.

59. Пат. № 104957, Україна, B01D53/18 Камера для дослідження процесів масообміну / Калугін В.Д., **Кустов М.В.** (UA); патентовласник НУЦЗУ (UA) – № 201508952; заявл. 16.09.2015; опубл. 25.02.2016.

60. Пат. № 108420 України, МПК G06D 31/02 (2016.01) Піротехнічний склад для штучного опадоутворення / Калугін В.Д., **Кустов М.В.**; патентовласник: Національний університет цивільного захисту України. – № 201601505 от 18.02.2016.

ABSTRACT

Kustov M.V. Organizational and technical methods of emergencies consequences liquidation that lead to the release of dangerous substances into the atmosphere. – Qualifying research paper, manuscript copyright.

Dissertation for the degree of a Doctor of Technical Sciences in specialty 21.02.03 «civil defense» (21 – national security). – National University of Civil Defense of Ukraine, State Emergency Service of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The dissertation formulated and solved the actual scientific and practical problem in the field of providing civil defense of the state, namely: new organizational and technical methods for the elimination of the consequences of natural and man-made emergencies that lead to the release of gaseous and dispersed hazardous substances into the atmosphere are developed.

In the process of doing work, **the following scientific results were obtained at first:**

- the mathematical model of precipitation of artificially induced precipitation of gaseous and dispersed hazardous substances entering the atmosphere as a result of natural and man-made disasters, which represents a system of four dependencies, in which the first and second dependencies describe the processes of precipitation of gaseous hazardous substances and the influence of the chosen management solution, third and fourth dependencies describe the intensity of the precipitation process of dispersed hazardous substances, as a result of the choice of managerial influence;

- the organizational and technical method of elimination of the consequences of natural and technogenic emergencies by deposition of gaseous and dispersed hazardous chemical and radioactive substances from the atmosphere is developed, which is based on the developed mathematical model of the process of precipitation by artificially initiated atmospheric precipitation of gaseous and dispersed hazardous substances, and involves the execution of five procedures, namely receiving the head of emergency response required set of monitoring

information; calculation the time of free propagation of the damage zone in the atmosphere; determination of the size of the predicted zone of atmospheric damage; conducting an assessment of the affiliation of the area of the emergency situation in the area of admissible decisions; attraction of forces for the elimination the consequences of emergencies;

- the mathematical model of the process of localization and liquidation of artificially initiated sediments of cells of natural and technogenic disasters with intense combustion is developed, as well as the system of five dependencies. The first dependence describes the movement of falling drop of precipitation over the focus of the emergency. The second and third dependencies describe the mass and thermal balance of the drop in the combustion cell. The fourth dependence describes the process of absorption of heat by atmospheric precipitation from the burning center, depending on the management influence on atmospheric processes. The fifth dependence determines the boundary condition, when the elimination of the cell of intense combustion is impossible and only its localization occurs;

- the organizational and technical method of liquidation of the consequences of natural and technogenic emergencies is elaborated through the location of intensive combustion cells based on the developed mathematical model the process of localization and liquidation of artificially initiated sediments of cells of natural and man-made disasters with intense combustion and involves the use of four procedures, namely: collection, processing and systematization of monitoring data ; forecasting the development of the combustion cell and the intensity of precipitation; statement of specific tasks to performers; direct influence on atmospheric processes;

- the functional scheme of an experimental mass-exchange unit for the study of precipitation processes with gaseous, liquid and solid aerosols hazardous substances, including combustion products;

- the functional scheme of the experimental chamber for the study of combustion processes, which realizes the possibility of establishing the intensity of combustion of combustible materials with different properties with a wide range of

meteorological conditions, including rainfall, temperature, wind and humidity of combustible material and air, is developed.

As an **object of research** was chosen emergency situations of natural and man-made nature, which are accompanied by the release of dangerous substances into the atmosphere.

The **introduction** substantiates the relevance of the chosen theme, formulates the purpose of the dissertation, defines the object, subject and methods of research, presents the scientific novelty and reveals the theoretical and practical significance of the results obtained, as well as the directions of their implementation.

In the **first section of the** dissertation, an analysis of existing systems and principles for the elimination of the consequences of natural and technogenic emergencies from the source and place of hazardous substances into the atmosphere has been carried out. It was established that in case of emergencies of an industrial and natural nature, the chemical and radioactive substances in the dispersed and gaseous state with different surface properties that are able to react with the active components of the atmosphere and are able to form new dangerous compounds enter the atmospheric air.

In **the second part of the** dissertation was devoted to the features of natural and technogenic emergency situations with the release of hazardous substances. The peculiarities of the elimination of the consequences of natural and man-made emergencies in Ukraine imply the need for the implementation of any subsystem of civil protection within the framework of the functioning of the Unified State Emergency System in Ukraine on the basis of the classical control circuit that provides collection, processing and analysis of information, simulation of the development of a dangerous situation in the zone of damage, and the use of effective methods and methods for the artificial initiation of precipitation over the pollution zone. A general approach to the elimination of the consequences of natural and man-made emergencies, resulting in atmospheric emissions, has been developed. hazardous chemical and radioactive substances , by artificially

initiating precipitation, which is based on the principle of the distribution of atmospheric air zones into the zone of damage and the area of active influence on atmospheric processes. The proposed approach allows to increase the height of the active influence on the zone of damage from an emergency from tens of meters to several kilometers.

In the **third section of the** dissertation work for the purpose of creating an organizational and technical method for the elimination of the consequences of emergencies, for the first time, a mathematical model was developed for the precipitation of artificial and initiated atmospheric precipitation of gaseous and dispersed hazardous chemical and radioactive substances released into the atmosphere as a result of emergency natural and technogenic disasters, which represents system of four dependencies. The first dependence describes the process of precipitation of gaseous hazardous substances emitted as a result of emergency natural and man-made disasters. The second dependence describes the influence on the process of precipitation of gaseous dangerous substances, the chemical properties of hazardous gas, meteorological conditions and the chosen management influence on atmospheric processes. The third and fourth dependencies describe the process of precipitation of disperse hazardous substances in a wide range of sizes, which are formed in emergency situations of natural and man-made nature, depending on the chosen control influence on atmospheric processes.

On the basis of the developed mathematical model deposition artificially initiated precipitation of gaseous and particulate hazardous chemical and radioactive substances first developed organizational and technical second method emergencies of natural and technogenic character by precipitation from the atmosphere of gaseous and particulate hazardous substances.

In the **fourth section of the** dissertation for the first time was developed Mathematical model of localization and liquidation of cells artificially initiated precipitation natural and technogenic disasters with intense burning that shows a system of five dependencies. The first dependence describes the movement of

falling drop of precipitation over the focus of the emergency. The second and third dependencies describe the mass and thermal balance of the drop in the combustion cell. The fourth dependence describes the process of absorption of heat by atmospheric precipitation from the burning center, depending on the management influence on atmospheric processes. The fifth dependence determines the boundary condition, when the elimination of the intensive combustion cell is impossible and only its localization takes place.

On the basis of the developed mathematical model of the process of localization and liquidation of artificially initiated sediments of cells of natural and technogenic disasters with intense combustion, the organizational and technical method of liquidation of the consequences of emergency situations of natural and man-made nature by means of localization of intensive burning cells was developed for the first time .

In the **fifth chapter** of the thesis was carried out the authenticated developed the mathematical model, organizational and technical methods. To verify the authenticity of the developed organizational and technical methods, a laboratory installation was first developed for the study of precipitation processes of gaseous and dispersed substances and a laboratory installation for the study of combustion processes under various meteorological conditions. Specially developed methods of conducting experiments allow us to verify the authenticity of developed models and methods. The results of the performed experiments are enclosed in the confidence interval, calculated on the Fisher test with a reliability of 0,95, which certifies the reliability of the developed models and methods.

In the **sixth section of the** dissertation, variants of implementation of developed methods for the elimination of the consequences of natural and man-made emergencies, which lead to the release of dangerous substances into the atmosphere, were proposed. A new complex system for the elimination of the consequences of natural and man-made emergencies is proposed that leads to the release of hazardous substances into the atmosphere on the basis of developed algorithms of methods for the elimination of the consequences of emergencies,

such as by precipitation of artificially induced precipitation of gaseous and dispersed hazardous chemical and radioactive substances, and by localization intensive combustion zones using artificially induced precipitation .

The practical value of the results obtained – were developed new approaches to liquidation the technogenic and natural disasters, where the determining factor is the use of artificial methods of precipitation formation. Developed a complex system for the prevention of natural and man-made emergencies, leading to the distribution of gaseous and dispersed hazardous substances in the atmosphere, on the basis of the author's algorithms for the elimination of the consequences of emergency situations by depositing hazardous substances from the atmosphere and by locating cells of natural and man-made disasters accompanied by intense combustion.

The basic scientific positions and conclusions of the dissertation work are brought to the level of specific methodological developments and applied recommendations. On the basis of the results of simulation of precipitation processes and deposition of hazardous substances from the atmosphere, as well as empirical smoke sorption models obtained, an automated software complex has been developed that simplifies and improves the efficiency of forecasting and organizing processes for minimizing the consequences of emergency situations for atmospheric air in a wide range of meteorological conditions at technical implementation. various methods of artificial precipitation. The main results of the research were implemented at the State Fire and Rescue Unit of the Main Office of State Emergency Service of Ukraine in the Donetsk region, in the departments of the Main Office of State Emergency Service of Ukraine in the Luhansk region.

Key words: organizational and technical method, emergency situations of technogenic and natural character; release of dangerous substances into the atmosphere; gaseous substances; dispersed substances; hazardous chemicals; hazardous radioactive substances; precipitation of dangerous substances from the atmosphere, artificial precipitation; localization of the intensive burning cell; active reagent; system emergencies.

List of publications of degree-seeker

Publications in which the main scientific results of the dissertation are published:

Monographs:

1. Kustov M.V. (2016) *Sovremennye sposoby iskusstvennogo iniciirovaniya osadkov dlya likvidacii posledstvij chrezvychajnyh situacij* [Modern methods of artificially initiating precipitation for the elimination of the consequences of emergencies], 130 p, Kharkiv. [in Russian].

Articles in the scientific professional editions of Ukraine, which are part of international scientometric bases:

2. Pospelov B.B., **Kustov M.V.** (2014) *Iniciirovanie atmosferyh osadkov mnogopozicionnymi sistemami izluchatelej*. [Initiation of atmospheric precipitation by multiposition systems of radiators]. *Zb. nauchn. trudov HUPS – Collection of scientific works of Kharkiv University of Air Forces*, 40, pp. 184-189. [in Russian]. (An article in the scientific professional publication of Ukraine included to Index Copernicus international science-based database).

The problem statement, the analysis of recent research and publications, the choice of the configuration of the placement of radiators.

3. **Kustov M.V.**, Pospelov B.B. (2015) Determination of the electromagnetic sediment initiation field during radioactive and chemical substances deposition from the atmosphere. *Ekologichna bezpeka. Kremenchug: KNU im. M. Ostrograds'kogo – Ecological safety*, 1(19), pp. 50–53. (An article in the scientific professional publication of Ukraine included to Index Copernicus, Open Academic Journals Index, Ulrich's Periodicals Directory international science-based databases).

The problem statement, analysis of technical means of ionization of air, calculation of zones of electromagnetic influence on clouds

4. **Kustov M.V.** (2015) Eksperimental'noe issledovanie intensivnosti osazhdeniya aehrozol'nyh produktov gorennya atmosferynymi osadkami. [Experimental study of the intensity of the deposition of aerosol products of combustion by atmospheric precipitation]. *Ekologichna bezpeka. Kremenchug: KNU im. M. Ostrograds'kogo – Ecological safety*, 2(20), pp. 84–90. [in Russian]. (An article in the scientific professional publication of Ukraine included to Index Copernicus, Open Academic Journals Index, Ulrich's Periodicals Directory international science-based databases).

5. **Kustov M.V.** (2016) Issledovanie dinamiki obrazovaniya i vypadeniya kislotnyh osadkov v rezul'tate krupnyh prirodnyh i tekhnogennyh pozharov. [Study of the dynamics of formation and fallout of acid precipitation as a result of large natural and man-made fires] *Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tekhnologij – Eastern European Advanced Technology Journal*. 10(79), pp. 11-17. [in Russian]. (An article in the scientific professional publication of Ukraine included to Scopus, Index Copernicus, Open Academic Journals Index, Ulrich's Periodicals Directory, American Chemical Society, Bielefeld Academic Search Engine, CrossRef international science-based databases).

6. **Kustov M.V.**, Kalugin V.D., Tyutyuny`k V.V. (2017) Uzagal`nena procedura shtuchnogo iniciyuvannya opadiv nad zonoyu urazhennya vid nadzvy`chajny`x sy`tuacij. [Generalized procedure of artificial initiation of precipitation over the zone of damage from emergency situations]. *Problemy` nadzvy`chajny`x sy`tuacij – Emergencies problems*. 26, pp. 87–96. [in Ukrainian]. (An article in the scientific professional publication of Ukraine included to Index Copernicus, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory international science-based databases).

The idea of the article, the development of some elements of the procedure for the adoption of management decisions and their implementation.

7. **Kustov M.**, Kalugin V. (2018) Modification of pyrotechnic composition to effectively neutralize acidic and chemically hazardous atmospheric precipitation. *Tekhnogenno-ekologichna bezpeka – Industrial eco-friendly security*.

3, pp. 28–32. (An article in the scientific professional publication of Ukraine included to Root Indexing, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich Web, Cite Factor international science-based databases).

Conducting experiments, interpreting the results.

8. **Kustov M.V.**, Sobol' O.O., Tyutyuny`k V.V., Kalugin V.D. (2018) Pidsy`stema minimizaciyi naslidkiv nadzvy`chajny`x sy`tuacij dlya atmosfery`, yaka pobudovana na bazi metodiv shtuchnogo opadoutvorenniya. [Subsystem of minimization of the consequences of emergency situations for the atmosphere, which is based on the methods of artificial precipitation]. *Problemy` nadzvy`chajny`x sy`tuacij – Emergencies problems*. 27, pp. 52–65. (An article in the scientific professional publication of Ukraine included to Index Copernicus, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory international science-based databases).

The development of a method for minimizing the consequences of emergencies, calculating the size of damage zones.

Articles in scientific professional editions of Ukraine:

9. **Kustov M.V.**, Kalugin V.D. (2011) Ispol'zovanie vodosoderzhashchih obrazovanij v atmosfere dlya tusheniya krupnyh pozharov na otkrytoj mestnosti. [The use of water-containing formations in the atmosphere to extinguish large fires in open areas]. *Zb. nauchn. trudov HUPS – Collection of scientific works of Kharkiv University of Air Forces*, 2(28), pp. 176–180. [in Russian]. (Article in the scientific professional publication of Ukraine).

Generalization of literary sources, analysis of the characteristics of the use of precipitation for the extinguishing of fires.

10. **Kustov M.V.**, Kalugin V.D., Kovregin V.V. (2011) Vliyanie klimaticheskikh faktorov na processy razvitiya i prekrashcheniya krupnyh pozharov na otkrytoj mestnosti. [The influence of climatic factors on the processes of development and termination of large fires in open areas]. *Problemy pozharnej*

bezopasnosti – Problems of fire safety, 29, pp. 127–135. [in Russian]. (Article in the scientific professional publication of Ukraine).

The carrying out of experimental researches and processing of their results.

11. **Kustov M.V.** (2011) Issledovanie mekhanizma kapleobrazovaniya pri tushenii pozharov atmosferynymi osadkami. [Investigation of the mechanism of droplet formation in extinguishing fires by atmospheric precipitation]. *Problemy pozharnoj bezopasnosti – Problems of fire safety*. 30, pp. 139–146. [in Russian]. (Article in the scientific professional publication of Ukraine).

12. **Kustov M.V., Kalugin V.D.** (2012) Intensifikaciya processa kapleobrazovaniya v atmosfere putem aktivnogo vozdejstviya na neyo moshchnogo ehlektromagnitnogo izlucheniya. [Intensification of the process of drop formation in the atmosphere by active influence on it of powerful electromagnetic radiation]. *Problemy pozharnoj bezopasnosti – Problems of fire safety*, 31, pp. 109–119. [in Russian]. (Article in the scientific professional publication of Ukraine).

The generalization of literary sources, theoretical calculations of the process of condensation of water vapor at charged centers of drop formation.

13. **Kustov M.V., Kalugin V.D.** (2012) K voprosu o vozmozhnosti primeneniya razlichnyh metodov kondensacii dlya osazhdeniya atmosfernoj vlagi. [To the question of the possibility of using various methods of condensation for the deposition of atmospheric moisture]. *Zb. nauchn. trudov HUPS – Collection of scientific works of Kharkiv University of Air Forces*, 31, pp. 134-138. [in Russian]. (Article in the scientific professional publication of Ukraine).

The generalization of literary sources, calculation of the critical degree of steam satiety

14. **Kustov M.V.** (2012) Vliyanie skorosti vetra, vlazhnosti vozduha i goryuchego materiala na skorost' rasprostraneniya landshaftnyh pozharov. [Influence of wind speed, air humidity and combustible material on the speed of propagation of landscape fires]. *Problemy pozharnoj bezopasnosti – Problems of*

fire safety. 32, pp. 133-141. [in Russian]. (Article in the scientific professional publication of Ukraine).

15. **Kustov M.V.**, Kalugin V.D. (2012) Ustanovka dlya modelirovaniya processov kondensacii v atmosferyh akvaaehrozolyah. [Installation for modeling of condensation processes in atmospheric aquaerosols]. *Problemi nadzvichajnih situacij – Emergencies problems*. 16, pp. 54–57. [in Russian]. (Article in the scientific professional publication of Ukraine).

The idea of the article, development of the scheme of installation and research methods.

16. **Kustov M.V.**, SHarshanov A.YA. (2013) Model' processa ispareniiya atmosferyh osadkov v vozduшной srede v zone landshaftnyh pozharov. [Model of the process of evaporation of precipitation in air in the zone of landscape fires]. *Problemy pozharnoj bezopasnosti – Problems of fire safety*, 33, pp. 104 - 112. [in Russian]. (Article in the scientific professional publication of Ukraine).

The idea of the article, formulation of the task, writing a review.

17. SHarshanov A.YA., **Kustov M.V.** (2013) Modelirovanie atmosferyh osadkov dlya opredeleniya ih protivopozharnogo potentsiala. [Simulation of precipitation to determine their fire potential]. *Problemy pozharnoj bezopasnosti – Problems of fire safety*, 34, pp. 186–193. [in Russian]. (Article in the scientific professional publication of Ukraine).

The formulation of the task, participation in the interpretation of the results, writing a review.

18. **Kustov M.V.**, Kalugin V.D. (2013) Vliyanie mezhchastichnyh vzaimodejstvij na process osadkoobrazovaniya v iskusstvenno ionizirovannoj oblasti atmosfery. [Effect of interparticle interactions on the process of precipitation in an artificially ionized region of the atmosphere]. *Pozhezhna bezpeka – Fire safety*, 23, pp. 94-101. [in Russian]. (Article in the scientific professional publication of Ukraine).

The conduct molecular-dynamic modeling.

19. **Kustov M.V.**, Pospelov B.B. (2013) Issledovanie processov iskusstvennoj stimulyacii osadkov pri chastichnoj ionizacii atmosfery ehlektromagnitnym izlucheniem. [Study of processes of artificial stimulation of precipitation with partial ionization of the atmosphere by electromagnetic radiation]. *Problemi nadzvichajnih situacij – Emergencies problems*, 17, pp. 72–81. [in Russian]. (Article in the scientific professional publication of Ukraine).

The idea of the article, conducting experiments, interpreting the results.

20. **Kustov M.V.**, Pospelov B.B. (2013) Parametry impul'snogo sverhvyssokochastotnogo izlucheniya dlya intensivifikacii osadkoobrazovaniya v zone chrezvychajnyh situacij. [The parameters of pulsed microwave radiation for the intensification of precipitation in the emergency zone]. *Problemi nadzvichajnih situacij – Emergencies problems*, 18, pp. 95–105. [in Russian]. (Article in the scientific professional publication of Ukraine).

The formulating a task, writing a review

21. **Kustov M.V.** (2014) Vliyanie koncentracii ionov v atmosfere na intensivnost' osadkov nad zonoj vybroso opasnyh veshchestv. [Influence of ion concentration in the atmosphere on the intensity of precipitation above the hazardous emission zone]. *Problemi nadzvichajnih situacij – Emergencies problems*, 20, pp. 93–98. [in Russian]. (Article in the scientific professional publication of Ukraine).

22. **Kustov M.V.** (2015) Prognozirovanie ehffektivnosti ochistki atmosfery ot tvyordyh produktov gorenija. [Prediction of the cleaning efficiency of the atmosphere from solid combustion products]. *Tekhnogenno-ekologichna bezpeka ta civil'nij zahist – Technogenic-ecological safety and civil protection*, 9, pp. 78-91 [in Russian]. (Article in the scientific professional publication of Ukraine).

23. **Kustov M.V.** (2016) Dopolneniya k metodikam prognozirovaniya zon himicheskogo i radiacionnogo zagryazneniya territorii. [Additions to the methods of forecasting areas of chemical and radiation contamination of the territory]. *Problemi nadzvichajnih situacij – Emergencies problems*, 23, pp. 67-77 [in Russian]. (Article in the scientific professional publication of Ukraine).

24. **Kustov M.V.**, Kalugin V.D. (2016) Modifikaciya pirotekhnicheskikh sostavov dlya ehffektivnogo osazhdeniya iz atmosfery vrednykh veshchestv. [Modification of pyrotechnic compositions for the effective deposition of harmful substances from the atmosphere]. *Problemi nadzvichajnih situacij – Emergencies problems*, 24, pp. 77–81 [in Russian]. (Article in the scientific professional publication of Ukraine).

25. **Kustov M.V.**, Kalugin V.D. (2016) Sistema obespecheniya ehkologicheskoy bezopasnosti nizhnej atmosfery s ispol'zovaniem metodov iskusstvennogo osadkoobrazovaniya. [The system of ensuring the environmental safety of the lower atmosphere using the methods of artificial precipitation]. *Tekhnogenno-ekologichna bezpeka ta civil'nij zahist – Technogenic-ecological safety and civil protection*, 11, pp. 37-43 [in Russian]. (Article in the scientific professional publication of Ukraine).

The development of the structure of the system and description of its components.

26. **Kustov M.V.**, Kalugin V.D., Tyutyunik V.V., Olkhovikov S.V. (2017) Funktsyonyrovanye systemy obespechenyya ékolohycheskoy bezopasnosti atmofery pry voznyknovenyy chrezvychaynykh sytuatsyy. [The functioning of the environmental safety system of the atmosphere in case of emergency]. *Tekhnogenno-ekologichna bezpeka ta civil'nij zahist – Technogenic-ecological safety and civil protection*, 12, pp. 24-37 [in Russian]. (Article in the scientific professional publication of Ukraine).

The development of a methodology for calculating the risks when using the systems of liquidation of consequences of emergency situations.

Articles in scientific periodicals of other states in course of the dissertation:

27. **Kustov M.V.**, Andronov V.A., Kalugin V.D. (2013) Ustanovka dlya issledovaniya goryuchih i ogneshchitnykh svoystv veshchestv i materialov pri razlichnykh usloviyah. [Installation for the study of combustible and flame retardant

properties of substances and materials under various conditions]. *CHrezvychajnye situacii: preduprezhdenie i likvidaciya – Emergency situations: warning and liquidation*, Belarus, 2(34), pp. 47-51 [in Russian]. (Article in the foreign scientific professional publication).

The idea of an article, the development of a scheme of installation and a description of the methodology for conducting research.

28. Pospelov B.B., **Kustov M.V.** (2013) Issledovanie processa nukleacii vodyanogo para pod vozdejstviem ehlektromagnitnogo izlucheniya. [The study of the process of nucleation of water vapor under the influence of electromagnetic radiation]. *CHrezvychajnye situacii: obrazovanie i nauka – Emergency situations: education and science*, Belarus, 2, pp. 45-50 [in Russian]. (Article in the foreign scientific professional publication).

The development of experimental techniques, experiments, interpretation of results.

29. **Kustov M.V.** (2014) Fiziko-himicheskie osnovy processa kapleobrazovaniya v atmosfere na zaryazhennyh centrakh kondensacii. [Physical-chemical basis of the process of droplet formation in the atmosphere on the charged condensation centers]. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti – Technosphere Safety Technologies*, Russia, 1(53) [in Russian]. URL: <http://academygps.ru/img/UNK/asit/ttb/2014-1/15-01-14.ttb.pdf> (Article in the foreign scientific professional publication – Online Journal).

30. **Kustov M.V.** (2014) Opredelenie neobhodimoy intensivnosti osadkov dlya tusheniya landshaftnogo pozhara. [Determination of the required intensity of precipitation to extinguish a landscape fire]. *Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashchenie, likvidaciya – Fires and emergencies: prevention, elimination*, Russia, 2, pp. 10–15 [in Russian]. (Article in the foreign scientific professional publication).

31. **Kustov M.V.** (2014) Vliyanie koncentracii ionov v atmosfere Zemli na processy osadkoobrazovaniya nad zonoj pozhara. [Influence of ion concentration in the Earth's atmosphere on sedimentation processes above a fire zone]. *Nauchnye*

i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoj zashchity – Scientific and educational issues of civil protection, Russia, 2(21). pp. 114–118 [in Russian]. (Article in the foreign scientific professional publication).

32. **Kustov M.**, Kalugin V., Levterov A. (2015) The main physical and chemical properties of the Radioactive particles ejected into the atmosphere at Accidents. *Scientific Bulletin Of North University Center Of Baia Mare*, , Romania. Series D, Volume XXIX №. 2. pp. 101 – 113. (Article in the foreign scientific professional publication).

The analysis and systematization of properties of radioactive particles, determination of the features of their deposition from the atmosphere.

33. **Kustov M.**, Kalugin V., Levterov A. (2016) Rain scavenging of a radioactive aerosol atmospheric precipitation. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, Austria. 3–4. pp 73–76. (Article in the foreign scientific professional publication).

Problem formulation, simulation of coagulation process.

34. **Kustov M.V.**, Ryabcev V.N. (2017) EHksperimental'naya proverka modelej osazhdeniya gazoobraznyh opasnyh himicheskikh veshchestv osadkami. [Experimental validation of sediment models of gaseous hazardous chemicals]. *Vestnik UGZ Belarusi – Bulletin of the University of Civil Protection of Belarus*, Belarus, 1. pp. 80-86 [in Russian]. (Article in the foreign scientific professional publication).

The development of the methodology of the experiment and its implementation, interpretation of the results.

Publications confirming the practical evaluation of the materials of the dissertation:

35. **Kustov M.V.**, Kalugin V.D. (2011) Vliyanie klimaticheskikh faktorov na processy razvitiya i prekrashcheniya krupnyh pozharov na otkrytoj mestnosti. [The influence of climatic factors on the processes of development and termination of large fires in open areas]. *Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy*. Zb.

Materialov II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. – *Fire safety: problems and prospects*. Collection of Materials II International Scientific and Practical Conference, Voronezh. September 22, 2011, pp. 208-209. [in Russian]. (Form of participation – extramural).

The collecting meteorological data of the region, processing the results of classification by level of influence.

36. **Kustov M.V.**, Kalugin V.D. (2011) Vliyanie vlazhnosti na processy razvitiya i prekrashcheniya krupnyh pozharov na otkrytoj mestnosti. [The effect of humidity on the development and cessation of large fires in open areas]. *Pozhezhna bezpeka-2011*. X Mizhnarodna nauk.-prakt. konf. – *Fire Safety-2011*. X International Scientific and Practical Conference. Harkiv: NUCZU. May 12, 2011, pp. 262-263. [in Russian]. (Form of participation – intramural).

Carrying out of experimental researches and interpretation of their results

37. **Kustov M.V.**, Kalugin V.D. (2012) Vozdejstvie moshchnogo ehlektromagnitnogo izlucheniya na processy kapleobrazovaniya v atmosfere. [The impact of powerful electromagnetic radiation on the drop formation processes in the atmosphere]. *Pozharnaya i avariynaya bezopasnost'*. Sb. Materialov VII nauch.-prakt. konf. – *Fire and emergency safety*. Collection of Materials VII scientific and practical. conf. Ivanovo. November 18, 2012, pp. 118-119. [in Russian]. (Form of participation – extramural).

Simulation of the influence of the electromagnetic field on the processes of condensation of steam

38. **Kustov M.V.**, Kalugin V.D. (2012) EHlektromagnitnyj metod intensivifikacii osadkoobrazovaniya v atmosfere zemli. [Electromagnetic method of intensification of precipitation in the atmosphere of the earth]. *Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy*. Materialy III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. – *Fire safety: problems and prospects*. Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference. Voronezh. September 20, 2012, pp. 149-151. [in Russian]. (Form of participation – extramural).

The idea of using existing equipment for artificial ionization of air

39. **Kustov M.V.**, Kalugin V.D. (2012) Intensifikaciya processa razrusheniya akvaahrozolej v atmosfere pri vozdeystvii na nih moshchnym ehlektromagnitnym izlucheniem. [Intensification of the process of destruction of aqua aerosols in the atmosphere when exposed to them by powerful electromagnetic radiation]. *Dispersnye sistemi*. Materialy HKHV nauch. konf. stran SNG. – *Disperse systems*. Materials XXX nauch. conf. CIS countries. Odessa: ONU. September 17-21, 2012, pp. 157-158. [in Russian]. (Form of participation – intramural).

Calculation of the power of an electromagnetic field for artificial intensification of precipitation

40. **Kustov M.V.**, Nestorchuk I.V. (2013) Issledovanie skorosti rasprostraneniya plameni po goryuchim materialam landshaftnyh pozharov. [Investigation of the speed of flame propagation in combustible materials of landscape fires]. *Ob'ednannya teorii ta praktiki – zaporuka pidvishchennya boezdatnosti operativno-ryatuval'nih pidrozdiliv*. Zb. mater. Vseukr. nauk.-prakt. konf. – *The unification of theory and practice is the key to increasing the operational capability of rescue units*. Collection mater Allukr science-practice conf. Harkiv. NUCZU. October 10, 2013, pp. 66-67. [in Russian]. (Form of participation – intramural).

The carrying out of experimental researches and interpretation of their results.

41. **Kustov M.V.** (2013) Intensifikaciya osadkoobrazovaniya v atmosfere s pomoshch'yu impul'snogo SVCH izlucheniya. [Intensification of precipitation formation in the atmosphere using pulsed microwave radiation.]. *Preduprezhdenie i likvidaciya chrezvyhajnyh situacij*. Sb. materialov Mezhd. konf. – *Prevention and liquidation of emergency situations*. Sat materials Int. conf. Minsk. November 28, 2013, pp. 91-93. [in Russian]. (Form of participation – intramural).

42. **Kustov M.V.** (2013) Issledovanie processa kapleobrazovaniya v atmosfere pri razlichnoj vlazhnosti vozduha. [Study of the process of droplet formation in the atmosphere at different air humidity]. *Teoriya ta praktika*

gasinnya pozhezh ta likvidacii NS. Zb. prac' Mizhn. konf. – The theory and practice of extinguishing fires and eliminating extraordinary situations. Collection of works Int. conf. CHerkasi. December 6-7, 2013, pp. 213-215. [in Russian]. (Form of participation – intramural).

43. **Kustov M.V.** (2013) Tushenie landshaftnyh pozharov pod dejstviem atmosferynh osadkov. [Quenching landscape fires under the action of precipitation]. *Pozhezhna bezpeka – 2013. Materiali HI Mizhn. nauk.-prakt. konf. – Fire safety - 2013. Material XI Intern. science-practice conf. Kiiiv. September 25-26, 2013, pp 407-411. [in Russian]. (Form of participation – extramural).*

44. **Kustov M.V.**, Nestorchuk Y.V. (2014) Yssledovanye skorosty rasprostraneniya plameny po materyalam rastytel'noho proyskhozhdenniya. [Investigation of the velocity of flame propagation by materials of vegetable origin]. *Naukove zabezpechennya diyal'nosti operatyvno-ryatuval'nykh pidrozdiliv. Zb prats' Vseukr. konf. – Scientific support for the operation of rescue units. Collection of works by Allukr. conf. Kharkiv. March 12, 2014, pp. 91-92. [in Russian]. (Form of participation – intramural).*

The carrying out of experimental researches and interpretation of their results.

45. **Kustov M.V.** (2014) Vliyanie koncentracii ionov v atmosfere na intensivnost' osadkov nad zonoj vybroso opasnyh veshchestv. [Influence of ion concentration in the atmosphere on the intensity of precipitation above the hazardous emission zone]. *Naukove zabezpechennya diyal'nosti operativno-ryatuval'nih pidrozdiliv. Zb. materialiv. Vseukraïns'koï nauk.-prakt. konf. – Scientific support for the operation of rescue units. Collection. materials. All-Ukrainian sciences-practice. conf. Harkiv: NUCZU. March 10, 2015, pp.225-228. [in Russian]. (Form of participation – intramural).*

46. **Kustov M.V.** (2015) Himicheski opasnye vybrosty v atmosferu pri krupnyh pozharah. [Chemically hazardous emissions into the atmosphere during large fires]. *Suchasnij stan civil'nogo zahistu Ukraïni: perspektivi ta shlyahi do Evropejs'kogo prostoru. Materiali 17 Vseukraïns'koï nauk.-prakt. konferencii*

ryatuval'nikiv. – *The current state of civil protection of Ukraine: prospects and ways to the European space*. Materials of 17 All-Ukrainian Science.-Practical. rescue conference. Kïiv: IDU CZ. October 10, 2015, pp. 222-225. [in Russian]. (Form of participation – extramural).

47. Tyutyuny`k V.V., Kalugy`n V.D., Tyutyuny`k Yu.V., **Kustov M.V.** (2015) Kompleksna sy`stema monitory`ngu nadzvy`chajny`x sy`tuacij dlya zberezheniya ta racional`nogo vy`kory`stannya pry`rodny`x ta energety`chny`x resursiv Ukrayiny`. [Integrated system of monitoring of emergency situations for conservation and rational use of natural and energy resources of Ukraine]. *Suchasni resursozberigayuchi texnologiyi. Problemy` i perspektyvy`* Zb. dopovidej. III Mizhnarodn. nauk.-prakt. konf. – *Modern resource-saving technologies. Problems and Prospects* Collection. reports. III International science-practice conf. Odesa. ONU im. I.I. Mechnikova. November 9-13, 2015, pp. 268-276. [in Ukrainian]. (Form of participation – extramural).

The development of the subsystem of liquidation of the consequences of natural and man-made emergencies.

48. **Kustov M.V.** (2016) EHksperimental'noe issledovanie processa osazhdeniya dymov atmosferynymi osadkami. [Experimental study of the process of precipitation of smoke by atmospheric precipitation]. *CHrezvychajnye situacii: preduprezhdenie i likvidaciya*. Materialy VII Mezhd. nauch.-prakt. konf. – *Emergency situations: warning and liquidation*. Materials VII Int. scientific-practical conf. Minsk. November 1, 2016, pp. 213-215. [in Russian]. (Form of participation – extramural).

49. **Kustov M.V.**, Kalugin V.D. (2016) Analiz osnovnyh klassov himicheskikh reagentov dlya iskusstvennogo osadkoobrazovaniya. [Analysis of the main classes of chemicals for artificial precipitation]. *Problemi tekhnogenno-ekologichnoï bezpeki: osvita, nauka, praktika*. Materialy Vseukr. nauch.-prakt. konf. – *Problems of technogenic-ecological security: Osvita, science, practice*. Materials Vseukr. scientific-practical conf. Har'kov. NUCZU. November 24, 2016, pp. 175-176. [in Russian]. (Form of participation – intramural).

The systematization and classification of the main hazardous substances released into the atmosphere in emergency situations.

50. **Kustov M.V.**, Kalugin V.D. (2016) Issledovanie processa goreniya pirotekhnicheskikh sostavov dlya iskusstvennogo osadkoobrazovaniya. [Investigation of the combustion process of pyrotechnic compositions for artificial precipitation.]. *Aktual'nye problemy pozharnoj bezopasnosti, preduprezhdeniya i likvidacii chrezvychajnyh situacij*. Materialy VII Mezhd. nauch.-prakt. konf. – *Actual problems of fire safety, prevention and emergency response*. Materials VII Int. scientific-practical conf. Kokchetav (Kazakhstan). October 24, 2016, pp. 100-103. [in Russian]. (Form of participation – extramural).

The carrying out of experimental researches and interpretation of their results.

51. **Kustov M.V.**, Kalugin V.D. (2016) Raschet temperatury goreniya pirotekhnicheskikh sostavov dlya iskusstvennogo osadkoobrazovaniya. [Calculation of the combustion temperature of pyrotechnic compositions for artificial precipitation]. *Pozhezhna ta tekhnogenna bezpeka*. Materiali Mizhnarodn. nauk.-prakt. konf. – *Fire and technogenic safety*. Materials International science-practice conf. L'viv. LDUBZHD. October 21, 2016, pp. 319-321. [in Russian]. (Form of participation – extramural).

The calculation of burning temperature of pyrotechnic warehouses.

52. **Kustov M.V.**, Kalugin V.D. (2016) EHlektrofizicheskij metod intensifikacii osadkov nad zonoj masshtabnogo pozhara. [Electrophysical method of intensification of precipitation over a large-scale fire zone]. *Problemi pozhezhnoi bezpeki*. Materiali Mizhnarodn. nauk.-prakt. konf. – *Fire safety issues*. Materials International science-practice conf. Harkiv. NUCZU. November 9, 2016, pp. 96-98. [in Russian]. (Form of participation – extramural).

The idea of the article, statement of tasks and analysis of the results.

53. Tyutyuny`k V.V., Kalugin V.D., **Kustov M.V.** (2017) Naukovo-texnichni napryamky` rozvy`tku pidsy`stem kompleksnoyi sy`stemy` monitory`ngu, poperedzhennya, likvidaciyi nadzvy`chajny`x sy`tuacij ta

minimizaciyi yix naslidkiv v Ukrayini. [Scientific and technical directions of development of subsystems of the complex system of monitoring, prevention, liquidation of emergency situations and minimization of their consequences in Ukraine]. *Bezpeka zhyttyediyal'nosti na transporti i vy'robny'cztvi – osvita, nauka, prakty'ka*. Materialy` IV Mizhnar. Naukovo-prakt. Konf. – *Safety of life in transport and production - education, science, practice*. Materials IV International Scientific practice. Conf. Xerson, XDMA. May 20, 2017, pp. 83-89. [in Ukrainian]. (Form of participation – extramural).

The development of a subsystem for the elimination of the consequences of emergencies.

54. Tyutyuny`k V.V., Kalugin V.D., **Kustov M.V.** (2017) Naukovi osnovy` stvorenniya v Ukrayini sy`stemy` monitory`ngu, poperedzhennya, likvidaciyi nadzvy`chajny`x sy`tuacij ta osobly`vosti rozvy`tku yiyi pidsy`stem. [Scientific bases of creation in Ukraine of the system of monitoring, prevention, liquidation of emergency situations and peculiarities of development of its subsystems.]. *Suchasny`j stan cy`vil`nogo zaxy`stu Ukrayiny` ta perspekty`vy` rozvy`tku*. Materialy` 19 Vseukrayins`koyi nauk.-prakt. konferenciyi – *The current state of civil protection of Ukraine and the prospects of development*. Materials of 19 All-Ukrainian sciences-practice. Conference. Ky`yiv: IDU CzZ. September 26, 2017, pp. 431-434. [in Ukrainian]. (Form of participation – extramural).

The development of a subsystem for the elimination of the consequences of emergencies.

55. Tyutyuny`k V.V., Kalugin V.D., **Kustov M.V.** (2018) Naukovo-texnichni napryamky` rozvy`tku pidsy`stemy` monitory`ngu, poperedzhennya nadzvy`chajny`x sy`tuacij ta minimizaciyi yix naslidkiv yedy`noyi derzhavnoyi sy`stemy` cy`vil`nogo zaxy`stu. [Scientific and technical directions of the development of the subsystem of monitoring, prevention of emergencies and minimization of their consequences of a civil protection system]. *Strategiya reformuvannya organizaciyi cy`vil`nogo zaxy`stu*. Materialy` konferenciyi –

Strategy for civil defense organization reform. Ky`yiv: UkrNDICzZ. June 12, 2018, pp. 237-239. [in Ukrainian]. (Form of participation – extramural).

The development of a subsystem for the elimination of the consequences of emergencies.

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

56. **Kustov M.V.**, Kalugin V.D. (2016) Prognozirovanie intensivnosti osazhdeniya gazoobraznyh toksichnyh himicheskikh veshchestv atmosferynymi osadkami. [Prediction of precipitation intensity of gaseous toxic chemicals by atmospheric precipitation]. *East European Science Journal*. Varshava. 2(6). pp. 52–59. [in Russian].

The modeling of the process of sorption of dangerous gases.

57. Patent № 104709 of Ukraine, MIIK A62C 99/00 (2014.01) Stend dlya doslidzhennya procesiv gorinnya [Stand for the study of combustion processes] / Andronov V.A, Tarahno O.V., Kalugin V.D., **Kustov M.V**, Zheronklyov K.V .; patent holder: National University of Civil Defense of Ukraine. № 201306647 at 28.05.2013.

58. Patent. 104561 Ukraine, IPC G05D 22/00 (2014.01) Klimaty`chna kamera [Climate camera] / Kalugin V.D, **Kustov M.V**, Pospelov B.B.; patent holder: National University of Civil Defense of Ukraine. №. 201304372 at 02/10/2014.

59. Patent № 104957, Ukraine, B01D53/18 (2014.01) Kamera dlya doslidzhennya procesiv masoobminu [Chamber for the study of mass transfer processes] / Kalugin V.D., **Kustov M.V** (UA); patent holder: National University of Civil Defense of Ukraine. №. 201508952; at 09/16/2015.

60. Patent 108420 of Ukraine, IPC G06D 31/02 (2016.01) Pirotexnichny`j sklad dlya shtuchnogo opadoutvorenniya [Pyrotechnic warehouse for artificial precipitation] / Kalugin V.D., **Kustov M.V.**; patent holder: National University of Civil Defense of Ukraine. №. 201601505 at 18.02.2016.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	49
ВСТУП.....	51
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ТА ПРИНЦИПІВ ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ПРИРОДНОГО ТА ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ З ВИКИДОМ НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРУ.....	60
1.1. Аналіз джерел ураження атмосферного повітря при надзвичайних ситуаціях природного та техногенного характеру...	60
1.2. Аналіз стану проблеми запобігання надзвичайним ситуаціям природного та техногенного характеру в розвинених країнах світу...	66
1.3. Специфіка систем запобігання надзвичайним ситуаціям природного та техногенного характеру в Китаї.....	73
1.4. Особливості запобігання надзвичайним ситуаціям природного та техногенного характеру в державах СНД.....	76
1.5. Правові основи розробки методів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій для атмосферного повітря в Україні	84
Висновки до розділу 1.....	90
РОЗДІЛ 2. ОСОБЛИВОСТІ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ПРИРОДНОГО ТА ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ З ВИКИДОМ НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРУ.....	91
2.1. Методологічні основи ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що супроводжуються викидом в атмосферу небезпечних речовин.....	91
2.2. Класифікація небезпечних хімічних речовин, що потрапляють в атмосферу при надзвичайних ситуаціях природного та техногенного характеру.....	97
2.3. Встановлення особливостей радіоактивних викидів в	

атмосферне повітря при надзвичайних ситуаціях в атомно-промисловому комплексі України.....	107
2.4. Особливості ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій з викидом в атмосферу небезпечних хімічних та радіоактивних речовин шляхом штучного ініціювання опадів.....	114
Висновки до розділу 2.....	120
РОЗДІЛ 3. ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНИЙ МЕТОД ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ПРИРОДНОГО ТА ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ ШЛЯХОМ ОСАДЖЕННЯ З АТМОСФЕРИ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗОПОДІБНИХ ТА ДИСПЕРСНИХ РЕЧОВИН.....	122
3.1. Математична модель осадження штучно ініційованими атмосферними опадами газоподібних та дисперсних небезпечних хімічних та радіоактивних речовин, що викидаються в атмосферу внаслідок надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру.....	122
3.1.1. Термодинаміка фазових переходів води в атмосферному повітрі в присутності ядер конденсації та сублімації.....	123
3.1.2 Особливості процесу штучного ініціювання опадів шляхом введення хімічних реагентів.....	131
3.1.3. Моделювання динаміки процесів осадження небезпечних газоподібних речовин атмосферними опадами.....	152
3.1.4 Моделювання процесу осадження дисперсних небезпечних речовин із атмосфери.....	167
3.1.5. Розробка математичної моделі осадження штучно ініційованими атмосферними опадами газоподібних та дисперсних небезпечних хімічних та радіоактивних речовин, що викидаються в атмосферу внаслідок надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру.....	184
3.2. Керуючий алгоритм організаційно-технічного методу ліквідації	

наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин.....	187
3.3. Описання процедур застосування організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин.....	190
Висновки до розділу 3.....	205
РОЗДІЛ 4. ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНИЙ МЕТОД ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ПРИРОДНОГО ТА ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ ШЛЯХОМ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ОСЕРЕДКІВ ІНТЕНСИВНОГО ГОРІННЯ.....	207
4.1. Математична модель процесу локалізації та ліквідації штучно ініційованими опадами осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням.....	207
4.1.1. Динаміка процесу краплеутворення в атмосфері на заряджених ядрах конденсації.....	208
4.1.2. Перспективні напрями удосконалення методів штучного опадоутворення.....	219
4.1.3 Вплив кліматичних факторів на процеси локалізації та ліквідації осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням.....	229
4.1.4. Вплив атмосферних опадів на процеси локалізації та ліквідації штучно ініційованими опадами осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням.....	235
4.1.5. Розробка математичної моделі процесу локалізації та ліквідації штучно ініційованими опадами осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням.....	255
4.2. Керуючий алгоритм організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного	258

характеру шляхом локалізації осередків інтенсивного горіння.....	
4.3. Описання процедур застосування організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізації осередків інтенсивного горіння.....	261
Висновки до розділу 4.....	268
РОЗДІЛ 5. ПЕРЕВІРКА ДОСТОВІРНОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНИХ МЕТОДІВ ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ, ЩО ПРИЗВОДЯТЬ ДО ВИКИДУ В АТМОСФЕРУ НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН.....	270
5.1. Лабораторна установка та методика проведення досліджень процесів осадження газоподібних та дисперсних речовин.....	270
5.2. Результати лабораторної експериментальної перевірки достовірності організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин.....	276
5.3. Лабораторна установка та методика проведення досліджень процесів горіння при різних метеорологічних умовах.....	287
5.4. Результати лабораторної експериментальної перевірки достовірності організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізації осередків інтенсивного горіння.....	293
Висновки до розділу 5.....	300
РОЗДІЛ 6. ВАРІАНТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНИХ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНИХ МЕТОДІВ ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ПРИРОДНОГО ТА ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ.....	302
6.1. Система ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду в атмосферу	302

небезпечних речовин.....	
6.2. Економічне обґрунтування ефективності використання розроблених методів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду в атмосферу небезпечних речовин.....	308
Висновки до розділу 6.....	314
ВИСНОВКИ.....	315
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	318
ДОДАТОК А Список публікацій за темою дисертації.....	367
ДОДАТОК Б Лістинги програми «Прогнозування атмосферних опадів».....	381
ДОДАТОК В Акти впровадження результатів досліджень.....	387

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- GPS – General Position System;
- HAARP – High Frequency Active Auroral Research Program;
- KM-GAP – kinetic multilayer model for gas?particle;
- MD – molecular dynamics;
- WMA – The Weather Modification Association;
- WMO – World Meteorological Organization;
- АМРК – автоматизований метеорологічний радіокомплекс;
- АВСВЕМ – автоматизована вимірювальна система виробничо-екологічного моніторингу;
- АРМ – автоматизоване робоче місце;
- АСКРО – автоматизована система контролю радіаційної обстановки;
- АСВ – автоматична система відстрілу;
- АСЕММКАР – автоматизована система екологічного моніторингу мобільного комплексу аварійного реагування;
- АЕС – атомна електростанція;
- БПЛА – безпілотний літаючий апарат;
- ГЛА – генератор льодоутворюючий;
- ГЛОНАС – глобальна навігаційна система;
- ГМ – горючий матеріал;
- ДСНС – Державна служба України з надзвичайних ситуацій;
- ДСМД – Державна система моніторингу довкілля;
- ЄДС ЦЗ – Єдина державна система цивільного захисту;
- ШСЗ – штучний супутник Землі;
- КСД – коефіцієнт спрямованої дії;
- ККД – коефіцієнт корисної дії;
- ВПП – велика природна пожежа;

ЛА – літаючий апарат;
МРЛ – метеорологічний радіолокатор;
БСВ – багатопозиційна система випромінювачів;
ПАР – поверхнево-активна речовина;
ПАВ – поліциклічний ароматичний вуглеводень;
ПС – піропатрон спалахуючий;
ППО – протиповітряна оборона;
ГДК – гранично допустима концентрація;
ПС – піротехнічний склад;
РВПК – реактор великої потужності канальний;
РЛС – радіолокаційна станція;
ЛАГ – літаковий аерозольний генератор;
НВЧ – надвисокочастотне;
США – Сполучені Штати Америки;
ФАР – фазована антенна решітка;
ФРЕЕ – функція розподілу електронів по енергіях;
ХНР – хімічно небезпечні речовини;
ЦРТГМ – целюлозовмісний рослинний твердий горючий матеріал.

ВСТУП

Актуальність теми. Проблема ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру є важливою державною функцією, а її актуальність обумовлена як проявами природних катастроф, так і експлуатацією широкого спектра підприємств важкої, хімічної та атомно-енергетичної промисловості.

Навіть за умов нормальної роботи промислових підприємств у навколишнє середовище викидається велика кількість небезпечних хімічних речовин. Особливо масштабні викиди відбуваються у разі виникнення на таких об'єктах масштабних аварій. Це становить значну загрозу для населення, території та навколишнього середовища, які є основними об'єктами системи цивільного захисту. Через великі масштаби зон атмосферних забруднень, які можуть поширюватися на висоти до декількох кілометрів, локалізація та ліквідація наслідків надзвичайних ситуацій викликає значні труднощі та вимагає залучення великої кількості сил та засобів. Існуючі методи та засоби запобігання надзвичайним ситуаціям, що призводять до поширення небезпечних речовин в атмосферному повітрі, ґрунтовані на механізмах осадження шкідливих речовин розпиленою водою, здатні впливати на зону ураження на висотах не більше десятка метрів.

Крім того, внаслідок великих природних та техногенних пожеж в атмосферу викидається велика кількість продуктів горіння. За рахунок інтенсивного руху повітряних мас продукти горіння поширюються на десятки та сотні кілометрів. Продукти горіння складаються з газоподібних компонентів та твердих аерозолів сажі та золи. При контакті з газоподібними продуктами атмосфери деякі гази, утворені під час горіння, вступають із ними в реакцію з утворенням нових хімічно активних сполук, здатних до конденсації в атмосферних умовах. Тому практично єдиним

методом очищення повітря від продуктів горіння є вимивання їх атмосферними опадами.

Однак багатофакторність параметрів, що впливають на стан атмосфери, не дозволяє, з використанням існуючих на сьогоднішній день методів та способів, успішно вирішувати завдання прогнозування інтенсивності вимивання забруднюючих речовин з атмосфери, вибору ефективного способу штучного ініціювання опадів, розширення діапазону метеорологічних умов, що забезпечує успішне протікання процесів штучного опадоутворення та ін.

Виходячи із цих позицій, розробка методів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, які характеризуються наявністю в атмосферному повітрі шкідливих та радіоактивних речовин, з використанням розроблених методів штучного опадоутворення, є актуальною проблемою в галузі цивільного захисту.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано відповідно до Розпорядження КМУ від 27 квітня 2011 року № 368-р «Про схвалення Концепції Загальнодержавної цільової соціальної програми захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру на 2012–2016 роки» та «Стратегії реформування системи Державної служби з надзвичайних ситуацій», схваленої Розпорядженням КМУ від 25 січня 2017 р. №61-р. Дослідження є складовою частиною науково-дослідних робіт: «Розробка комп'ютерної системи прогнозування інтенсивності опадів на поверхні Землі в залежності від фізико-хімічних властивостей атмосфери» (реєстраційний номер 0116U002019), в якій здобувач був керівником; «Дослідження умов раннього моніторингу та попередження надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру» (реєстраційний номер 0112U002587); «Дослідження шляхів удосконалення моніторингу надзвичайних ситуацій за допомогою безпілотних літальних апаратів» (реєстраційний номер 0117U002005); «Дослідження гідравлічних струменів при створенні систем управління

екологічною безпекою об'єктів підвищеного ризику» (реєстраційний номер 0116U002002), в яких здобувач був виконавцем.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка нових організаційно-технічних методів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду газоподібних та дисперсних небезпечних речовин в атмосферу, шляхом штучного ініціювання опадів.

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

1. Проаналізувати існуючі системи та принципи ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду газоподібних та дисперсних небезпечних речовин в атмосферу;
2. Розглянути особливості надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру з викидом небезпечних речовин в атмосферу;
3. Розробити організаційно-технічний метод ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин;
4. Розробити організаційно-технічний метод ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізації осередків інтенсивного горіння;
5. Перевірити достовірність розроблених організаційно-технічних методів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду в атмосферу небезпечних речовин;
6. Запропонувати варіанти впровадження розроблених організаційно-технічних методів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру.

Об'єкт дослідження. Надзвичайні ситуації природного та техногенного характеру, які супроводжуються викидом в атмосферу небезпечних речовин.

Предмет дослідження. Ліквідація наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду небезпечних газоподібних та дисперсних речовин в атмосферу, шляхом штучного ініціювання опадів.

Методи дослідження. З використанням методів математичного та імітаційного моделювання, методів вирішення оптимізаційних задач було розроблено математичні моделі процесів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру. Методи мікроскопії дисперсних систем, фізико-хімічні методи вимірювання метеорологічних параметрів, методи напівпровідникового детектування, методи проведення піролітичних випробувань були використані під час розробки лабораторних установок. Теорія планування експерименту, методи теорії імовірності та математичної статистики були використані під час обробки результатів експериментів та перевірки достовірності отриманих результатів.

Наукова новизна одержаних результатів. Вирішено важливу науково-технічну проблему в галузі цивільного захисту, а саме, розроблено два нових організаційно-технічні методи ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду в атмосферу газоподібних та дисперсних небезпечних речовин.

У процесі виконання роботи вперше отримані наступні наукові результати.

1. Розроблено математичну модель осадження штучно ініційованими опадами газоподібних та дисперсних небезпечних речовин, що потрапляють в атмосферу внаслідок природних та техногенних катастроф, яка являє собою систему з чотирьох залежностей, в якій перша та друга залежності описують процеси осадження газоподібних небезпечних речовин та вплив обраного управлінського рішення, а третя та четверта залежності описують

інтенсивність процесу осадження дисперсних небезпечних речовин як результат вибору управлінського впливу.

2. Розроблено організаційно-технічний метод ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери газоподібних та дисперсних небезпечних хімічних та радіоактивних речовин, який спирається на розроблену математичну модель процесу осадження штучно ініційованими атмосферними опадами газоподібних та дисперсних небезпечних речовин та передбачає виконання п'яти процедур, а саме: отримання керівником ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій необхідного комплексу моніторингової інформації; розрахунок часу вільного поширення зони ураження в атмосфері; визначення розмірів прогнозованої зони атмосферного ураження; проведення оцінки належності площі НС області допустимих рішень; залучення сил та засобів для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

3. Розроблено математичну модель процесу локалізації та ліквідації штучно ініційованими опадами осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням, яка являє собою систему з п'яти залежностей. Перша залежність описує рух падаючої краплі опадів над осередком надзвичайної ситуації. Друга та третя залежності описують масовий та тепловий баланс краплі в осередку горіння. Четверта залежність описує процес поглинання тепла атмосферними опадами від осередку горіння залежно від управлінського впливу на атмосферні процеси. П'ята залежність визначає граничну умову, коли ліквідація осередку інтенсивного горіння неможлива та відбувається лише його локалізація.

4. Розроблено організаційно-технічний метод ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізації осередків інтенсивного горіння, який спирається на розроблену математичну модель процесу локалізації та ліквідації штучно ініційованими опадами осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням та передбачає використання чотирьох процедур, а саме: збір,

обробка та систематизація моніторингових даних; прогнозування розвитку осередку горіння та інтенсивності опадів; постановка конкретних задач виконавцям; безпосередній вплив на атмосферні процеси.

5. Розроблено функціональну схему експериментальної масообмінної установки для дослідження процесів осадження краплями опадів газоподібних, рідких та твердих аерозольних небезпечних речовин, включаючи продукти горіння (Патент № 104957, Україна).

6. Розроблено функціональну схему експериментальної камери для дослідження процесів горіння, яка реалізує можливість встановлення інтенсивності горіння горючих матеріалів з різними властивостями при широкому діапазоні метеорологічних умов, включаючи опади, температуру, вітер та вологість горючого матеріалу і повітря (Патент № 104709, Україна).

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці нових підходів до ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру, де визначальним є використання методів штучного опадоутворення. Розроблено комплексну систему запобігання надзвичайним ситуаціям природного та техногенного характеру, що призводять до поширення в атмосфері газоподібних та дисперсних небезпечних речовин, на основі розроблених автором алгоритмів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій шляхом осадження небезпечних речовин з атмосфери та шляхом локалізації осередків природних та техногенних катастроф, що супроводжуються інтенсивним горінням.

Основні наукові положення та висновки дисертаційної роботи доведено до рівня конкретних методичних розробок і прикладних рекомендацій. На основі результатів моделювання процесів опадоутворення та осадження небезпечних речовин із атмосфери, а також отриманих емпіричних моделей сорбції димів розроблено автоматизований програмний комплекс, який дозволяє спростити та підвищити оперативність прогнозування та організації процесів мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій для атмосферного повітря в широкому діапазоні метеоумов при

технічній реалізації різних методів штучного опадоутворення.

Результати досліджень впроваджені: в Державному пожежно-рятувальному загоні ГУ ДСНС України в Донецькій області, що дозволило підвищити точність прогнозування зон радіоактивного і хімічного забруднення території (з урахуванням можливості випадіння опадів над зоною забруднення) у разі виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру; в підрозділах Головного управління ДСНС України в Луганській області, що дозволило підвищити якість розвідки лісових і степових пожеж великого масштабу та визначення зони хімічного забруднення у разі виникнення техногенних аварій; в навчальний процес Інституту державного управління у сфері цивільного захисту (дисципліни «Організація аварійно-рятувальних робіт», «Термодинаміка та теплопередача», «Тактика пожежогасіння та рятувальних робіт»).

Особистий внесок здобувача. У процесі проведення дисертаційних досліджень особисто здобувачем виконано аналіз літературних та інформаційних джерел, що розглядають особливості надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду в атмосферу небезпечних речовин, а також способи і засоби ліквідації наслідків таких надзвичайних ситуацій та способи та засоби штучного ініціювання опадів.

Особисто здобувачем розроблені математична модель осадження штучно ініційованими опадами газоподібних та дисперсних небезпечних речовин, що потрапляють в атмосферу внаслідок природних та техногенних катастроф, і математична модель процесу локалізації та ліквідації штучно ініційованими опадами осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням. На основі цих моделей особисто здобувачем розроблені організаційно-технічний метод ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери газоподібних та дисперсних небезпечних хімічних та радіоактивних речовин та організаційно-технічний метод ліквідації наслідків

надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізації осередків інтенсивного горіння.

Розроблено лабораторні установки для дослідження процесів осадження краплями опадів газоподібних, рідких та твердих аерозольних небезпечних речовин, включаючи продукти горіння, та дослідження процесів горіння. Здобувач брав участь у плануванні, підготовці та проведенні лабораторних експериментів з перевірки достовірності розроблених математичних моделей та організаційно-технічних методів, особисто робив їх обробку та аналіз.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи доповідались та обговорювались на наукових конференціях: Міжнародній науково-практичній конференції «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы», Воронеж (РФ), 2011, 2012; X Міжнародній науково-практичній конференції «Пожарная безопасность-2011», Харків, 2011; VII науково-практичній конференції «Пожарная и аварийная безопасность», Иваново (РФ), 2012; XXV науковій конференції країн СНД «Дисперсні системи», Одеса, 2012; Всеукраїнській науково-практичній конференції «Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення боєздатності оперативно-рятувальних підрозділів», Харків, 2013; Міжнародній конференції «Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций», Мінськ (РБ), 2013, 2016; Міжнародній конференції «Теорія та практика гасіння пожеж та ліквідації НС», Черкаси, 2013; XI Міжнародній науково-практичній конференції «Пожарная безопасность – 2013», Київ, 2013; Всеукраїнській науково-практичній конференції «Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів», Харків, 2014, 2015; Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку», Київ, 2015, 2017; III Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні ресурсозберігаючі технології. Проблеми і перспективи», Одеса, 2015; Всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми техногенно-екологічної безпеки: освіта, наука,

практика», Харків, 2016; VII Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций», Кокшетау (Казахстан), 2016; Міжнародній науково-практичній конференції «Пожежна та техногенна безпека», Львів, 2016; Міжнародній науково-практичній конференції «Fire Safety Issues», Харків, 2016; IV Міжнародній науково-практичній конференції «Безпека життєдіяльності на транспорті і виробництві – освіта, наука, практика», Херсон, 2017; науково-практичній конференції «Стратегія реформування організації цивільного захисту», Київ, 2018.

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 60 наукових праць: 25 статей у наукових фахових виданнях України (з них 7 статей – у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich’s Periodicals Directory, Root Indexing, Ulrich Web, Cite Factor, та 1 статтю – у виданні, яке входить до міжнародної наукометричної бази Scopus); 8 статей – у наукових періодичних виданнях інших держав з напрямку, з якого підготовлено дисертацію; 1 статтю – у закордонному періодичному виданні; 1 одноосібна монографія; 21 теза доповідей на конференціях; 2 патенти на винахід і 2 патенти на корисну модель.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків і додатків. Загальний обсяг дисертації – 391 сторінка, який включає 28 таблиць, 68 ілюстрацій, 3 додатки, список використаних літературних джерел з 484 найменувань вітчизняного та закордонного походження.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ТА ПРИНЦИПІВ ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ПРИРОДНОГО ТА ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ З ВИКИДОМ НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРУ

1.1. Аналіз джерел ураження атмосферного повітря при надзвичайних ситуаціях природного та техногенного характеру

Серед небезпечних факторів надзвичайних ситуацій найбільш суттєвий вплив на атмосферу чинять забруднення різної фізичної та хімічної природи. Забруднення атмосфери (атмосферне забруднення) – привнесення в газоподібну оболонку, що оточує Землю, або утворення в ній фізичних агентів, хімічних речовин або організмів, що несприятливо впливають на середовище життя або призводять до втрати матеріальних цінностей [1].

Розрізняють природні та антропогенні джерела атмосферного забруднення [2, 3]. До перших відносяться такі явища як: виверження вулканів, пилові бурі, лісові пожежі та ін. Антропогенними джерелами в основному є викиди від спалювання на підприємствах природного палива, викиди від автотранспорту та відходи підприємств хімічної промисловості [4, 5].

Однак для вивчення питання мінімізації забруднення атмосфери більш важливу роль відіграє фізико-хімічна природа забруднюючих речовин. У цьому випадку всі небезпечні речовини доцільно розділити за агрегатним станом на газоподібні речовини, рідкі та тверді аерозолі.

За даними вчених, щорічно у світі внаслідок антропогенної діяльності людини в атмосферу в газоподібному виді надходить 25,5 млрд тонн оксидів вуглецю, 190 млн тонн оксидів сірки, 65 млн тонн оксидів азоту, 1,4 млн тонн фреонів (хлорфторвуглеводнів) [6]. Крім того, гази, що потрапляють в

атмосферу, реагують між собою та компонентами атмосфери, що призводить до утворення нових сполук [7, 8].

Аерозолі, за способом утворення, також розділяються на чотири головних типи: перший тип – аерозоль, утворений з газової фази *in situ*; другий тип – мінеральний аерозоль, джерелом якого є ґрунт; третій тип – морський аерозоль, що являє собою кристали морської солі та краплі розчинів морської води; четвертий тип – органічний аерозоль, утворений у результаті життєдіяльності мікроорганізмів та рослин [9, 10].

Однак дана класифікація не відображає ще одного важливого класу аерозолів – так званого, термічного аерозолу, що утворюється у результаті високотемпературних реакцій горіння та вибуху.

Основну частину рідких забруднюючих аерозолів становлять кислотні опади. Кислотні опади відносяться до аерозолів, утворених із газової фази *in situ* [11, 12]. Щорічний збиток від кислотних дощів тільки у країнах Європейського економічного співтовариства визначається, за різними оцінками, в 1540 – 2200 млн доларів [13]. У помірному поясі в широких масштабах відбувається відступ або дигресія лісової рослинності в рекреаційних зонах, а також захворювання та загибель лісів внаслідок забруднення повітря, зокрема від кислотних дощів [14].

Значну частину забруднюючих атмосферу речовин становлять тверді аерозолі. Клас мінеральних аерозолів представляють ґрунтові аерозолі, які попадають в атмосферу внаслідок вітрової ерозії [15-17]. Морський аерозоль утворюється в земній атмосфері в результаті випаровування мікрокрапель морської води [18-20]. Природно такий тип аерозолів характерний для ділянок атмосфери над світовим океаном та у прибережних зонах. Однак у незначній кількості такі аерозолі наявні практично в будь-якій області нижньої атмосфери за рахунок переносу аерозолу повітряними потоками. Максимум у розподілі за розмірами припадає на сольові частки діаметром близько 0,3 мкм [21].

Українським науково-дослідним інститутом екологічних проблем регулярно проводиться моніторинг стану атмосфери над територією України. Дані щодо основних забруднюючих речовин – формальдегідів, фенолів, пилю, оксидів вуглецю та азоту, діоксидів сірки та азоту – публікуються в щоквартальних звітах [22]. Однак у роботі [23] показано, що значну небезпеку для людей становлять також нітрохлорбензол, сірчана кислота та сірководень, вміст яких у деяких промислових регіонах України перевищує ГДК. Однак екологічна ситуація в регіоні різко погіршується у разі виникнення аварій на хімічних підприємствах [24]. Усього зареєстровано більше 700 різновидів забруднюючих газів, однак вміст більшості з них в атмосфері не перевищує 10^{-3} ppm [25]. Так, наприклад, за період 2004-2013 р.р. не зареєстровано жодної аварії з викидом кислот вище об'єктового рівня; при цьому за цей же період в Україні сталося 7 аварій місцевого рівня з викидом аміаку, хлору або сірководню [26-35].

Якщо для атмосферних аерозолів є характерним гравітаційне осадження й тому вони починають коалесцирувати практично у момент утворення, то хімічно небезпечні гази як однофазні системи легко поширюються повітряними потоками на значні відстані. Докладно деякі хімічні перетворення газових компонентів у тропосфері розглянуті в роботах [11, 36-47]. Ступінь небезпеки будь-якої хімічної сполуки в атмосфері визначається його середньодобовими гранично допустимими концентраціями (ГДК_{сд}) [48-51]. Різні державні та міжнародні організації та програми постійно проводять супутниковий моніторинг хімічного складу тропосфери, що дає нам можливість оперативно відслідковувати критичні перевищення гранично допустимих концентрацій. Найпоширенішими є комплекси MODIS (Штучний супутник Землі (ШСЗ) Terra, Aqua) [53], OMI (ШСЗ Aura) [54], AIRS (ШСЗ Aqua) [55], які покривають всі області земної кулі. Крім цього, національні організації по контролю екологічної безпеки щорічно готують звіти стосовно стану атмосферного повітря над територією тієї або іншої країни [22, 56]. У разі потрапляння хімічно небезпечних

речовин в атмосферу вони взаємодіють та вступають у реакцію з різними речовинами в молекулярній, радикальній або іонній формах, а також із поверхнею рідких та твердих часток аерозолів. У роботах [7, 8, 11, 37] розглянуто фізико-хімічні процеси, що відбуваються в атмосфері з оксидами сірки, азоту та вуглецю як основними складовими продуктів горіння за умов нормальної роботи технологічного устаткування та транспорту. Крім того, великий обсяг даних з фізико-хімії атмосфери отримано у рамках таких міжнародних науково-дослідних програм як NAOPEX [38], PROPHET 2001 [39], EUROTRAC-1 і EUROTRAC-2 [40], NAMBLEX [41], MINOS [42], TORCH [43] та ряду інших. Для вивчення фізико-хімічних процесів в атмосфері з оксидами сірки, азоту та вуглецю, а також із деякими вуглеводнями, розроблені та широко використовуються програмні комплекси CHEMEATA 2.0 [44] та RACM2 [45].

Окремим класом надзвичайних ситуацій є пожежі. До природних пожеж відносяться пожежі, які охоплюють різні компоненти географічного ландшафту. Природні пожежі можна розділити на підземні (торф'яні), надземні (лісові верхівкові) та наземні (степові, лісові низові) [57]. Питанням динаміки розвитку та гасіння великих природних пожеж (ВПП) останнім часом приділяється велика увага. Основними факторами, що впливають на швидкість поширення ВПП, є: рельєф місцевості, швидкість і напрямок вітру, пожежне навантаження, вологість повітря та горючого матеріалу [58]. При цьому випадіння опадів над зоною пожежі істотно збільшує вологість повітря та горючого матеріалу.

Наслідки для атмосфери лісових пожеж та горіння нафтопродуктів розглянуті в роботах [59-62]. Загальний механізм утворення сажі можна розділити на кілька окремих етапів [63-66]. Як ми вже відзначали вище, хімічний склад сажі істотно залежить від складу палива та умов горіння, тому дані різних дослідників трохи відрізняються [67-69]. Узагальнюючи ці дані, можна зробити висновок, що основними компонентами є вуглець (60–85 % мас.) та кисень (10–25 % мас.); крім цього, в незначних кількостях

містяться азот, водень, сірка (до 5 % мас.). До структури сажі можуть бути також включені залишки вуглеводнів та оксиди металів (золи).

За своєю структурою сажа являє собою комплекс із графітоподібних шарів, які, на відміну від графіту, зв'язані між собою хімічно. На поверхні шарів сажі перебувають різні, складні за складом, функціональні групи, такі як ангідриди, карбоніли, алкіл-кетони та ін. [70-72]. При цьому масив часток сажі являє собою пористу структуру з питомою площею пор близько $100 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ [73].

Хімічний склад золи, що утворюється під час горіння, залежить від виду горючої речовини та режимів горіння.

У разі виникнення великих аварій на об'єктах атомної енергетики можливий викид в атмосферу радіоактивних речовин. Найбільш масштабними аваріями за всю історію є аварії на Чорнобильській АЕС в Україні та на АЕС у провінції Фукусіма в Японії. Ці аварії будуть нами розглядатися як приклад. Внаслідок аварійної розгерметизації ядерного реактора в атмосферу потрапляє велика кількість газоподібних та аерозольних радіоактивних речовин [74, 75]. Під дією конвективних повітряних потоків радіоактивні речовини потрапляють у верхні шари тропосфери та поширюються на велику відстань. Радіус зони радіоактивного забруднення в результаті Чорнобильської аварії склав близько 1500 км [76, 77]; при аварії у Фукусімі розміри зони забруднення становлять 150 км [78]. Однак підвищений рівень радіації реєструвався на значно більшій відстані, наприклад у Норвегії [75, 79]. Розміри та форма зони забруднення визначаються метеорологічними умовами, ландшафтом місцевості, наявністю рослинності, щільністю забудов і рядом інших факторів. Питанню моделювання динаміки зміни зони забруднення приділено велику увагу [80-82].

Радіонуклідний склад забруднень при аваріях на Чорнобильській АЕС та АЕС Фукусіма-1 проаналізовано в роботах [81-102]. Хімічний та кількісний склад радіонуклідів, викинутих в атмосферу при АЕС у Чорнобилі

та у Фукусімі, різний. У першу чергу це пов'язано з різними типами ядерних реакторів, характером руйнування та складом ядерного палива.

У зоні радіоактивного забруднення від Чорнобильської аварії перебуває велика кількість дрібнодисперсних часток оплавленого радіоактивного палива, які утворилися внаслідок першого високотемпературного вибуху та наступної стадії горіння елементів реактора. Такі частки називаються «гарячими частками». Дослідженню структури паливних часток присвячено багато робіт [91, 103-114].

Так, на Чорнобильській АЕС використовувався Реактор Великої Потужності Канальний (РВПК), у якому як ядерне паливо використовувався двоокис урану ^{235}U , низькозбагачений UO_2 . Як сповільнювач нейтронів у РВПК використовувався графіт (^{14}C). Металеві конструкційні частини в активній зоні виготовлені зі сплаву цирконію та ніобію. На АЕС у Фукусімі використовувався Boiling Water Reactor (BWR). У таких реакторах сповільнювачем швидких нейтронів виступає вода, тому при аварії не відбувається великого викиду графіту, однак при розгерметизації реактора в атмосферу викидається велика кількість радіоактивної водяної пари.

Велика кількість тугоплавких елементів у викидах при Чорнобильській аварії та практично їх відсутність при аварії у Фукусімі пов'язані з тим, що при Чорнобильській аварії сталося руйнування активної зони реактора з викидом радіоактивного палива. Крім цього, Чорнобильська аварія характеризується високотемпературною стадією аварії, що призвело до утворення додаткової кількості цезію. При аварії у Фукусімі викиду частин радіоактивного палива та радіоактивного графіту не сталося, а оплавлені паливні елементи збираються у «пастці».

Таким чином, у разі виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру в атмосферне повітря потрапляють хімічні та радіоактивні речовини у дисперсному та газоподібному стані з різними поверхневими властивостями, які здатні реагувати з активними компонентами атмосфери та утворювати нові небезпечні сполуки.

1.2. Аналіз стану проблеми запобігання надзвичайним ситуаціям природного та техногенного характеру в розвинених країнах світу

Існуючі у світі підходи до ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій (НС), які характеризуються викидом в атмосферне повітря шкідливих та радіоактивних речовин, ґрунтуються на використанні рідинних завіс за допомогою наземної аварійно-рятувальної техніки. При цьому відбувається осадження шкідливих та радіоактивних речовин із атмосферного повітря дрібнодисперсним потоком води, який утворюється за допомогою засобів аварійно-рятувальної техніки. Такий метод забезпечує зону мінімізації висотою не більше десятків метрів [115–117]. Однак у разі виникнення НС природного та техногенного характеру зона ураження атмосферного повітря досягає висоти до декількох кілометрів. Комплексного підходу до вирішення проблеми ліквідації наслідків НС для атмосферного повітря на таких висотах на сьогодні не створено.

Останнім часом з розвитком технологій зв'язку та телекомунікацій існує можливість об'єднання систем моніторингу декількох держав, таким чином створюється глобальна система моніторингу міжнародного рівня [118]. Зі збільшенням рівня системи моніторингу значно ускладнюється структура побудови системи, а саме підсистеми обробки, аналізу та систематизації інформації. Існують два підходи до побудови систем моніторингу регіонального, державного та міжнародного рівнів [119-135]. До першого відноситься розробка технічної бази, яку відразу орієнтовано на моніторинг зони значних розмірів. До таких систем насамперед відносяться супутникові системи моніторингу. У другому підході реалізується принцип об'єднання та систематизації даних із приладів моніторингу об'єктового рівня. Розгалуженість мережі таких приладів контролю дає змогу побудувати систему моніторингу регіонального та державного рівнів.

Крім рівневої градації, системи моніторингу можна розділити за основними принципами збору інформації.

До першого класу систем відносяться космічні апарати дистанційного зондування Землі [136-139].

Дистанційне зондування Землі з використанням штучних супутників забезпечує можливість одержання інформації про екологічний та метеорологічний стан зони забруднення та прилеглої території у глобальному масштабі з високим рівнем просторово-тимчасового розпізнавання. При цьому контролюються фізичні, хімічні, біологічні та геометричні параметри зони моніторингу [140-145].

В Європі розробка супутникових систем моніторингу проводиться у державах Європейського союзу та у Російській Федерації за програмою GMES, що використовує супутники «Envisat» та «Metop» [146-149]. Супутниковий моніторинг метеорологічної обстановки на планеті проводиться з метою виявлення швидкості та напрямку вітру, вологості та температури [150-155].

В галузі розробки та використання космічних засобів моніторингу атмосфери передову позицію займають Сполучені Штати Америки. У США реалізовано супутникову метеорологічну систему, що перебуває в рамках програми NOAA (National Oceanic Atmospheric Administration) та має на полярних орбітах супутники «NOAA» [156-158] та геостационарні супутники «GEOS» [159, 160]. Канадська система моніторингу використовує супутники «Radarsat» [161, 162]. Також активно працює японська супутникова система моніторингу атмосфери на базі апаратів «ADEOS» та індійська система IRS [162-164].

Крім того, міністерством оборони США запущено супутникову метеорологічну систему DMSP (Defense Meteorological Satellite Project) [165-168]. Використання в системі DMSP мікрохвильових радіометрів як всепогодних вимірників параметрів атмосфери дозволяє реалізувати цілодобовий моніторинг гідрометеорологічних явищ країн-членів WMO (Всесвітньої метеорологічної організації).

Також американським урядом ухвалено рішення про створення Національної супутникової системи моніторингу навколишнього середовища з полярної орбіти «NPOESS» (National Polar-Orbiting Operational Environment Satellite System) [169-172]. Вказана система координує роботу військової (DMSP) та цивільної (NOAA) супутникових систем, а також включає дослідницькі супутники «Wind», «Coriolis» [173-175], «Terra» [176-180], «Aqua» [181-185].

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

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

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

Зазначені комплекси розробляються в різних країнах. У Великобританії використовується радіолокатор «Siemens Plessey 45C» [186]. У Німеччині використовуються радіолокатори «DWD» [187]. Також існують МРЛ італійського виробництва («ALENIA-SMA» та «EEC-ERICSSON» [188]) та виробництва Японії (марка «Mitsubishi» [189]).

У США для штормосповідження, метеорологічного забезпечення авіації та виміру опадів використовується радіолокатор WSR- 88D [190].

Найбільш ефективними засобами моніторингу зони забруднення та метеорологічної обстановки, які дозволяють усунути недоліки роботи

космічної та наземної систем моніторингу, є літальні апарати. При цьому найбільш перспективними є безпілотні літальні апарати (БПЛА) [191, 192].

Найбільший потенціал серед засобів моніторингу мають безпілотні літальні апарати (БПЛА) [193-195]. Апарати такого типу можуть нести до 10 кг корисного навантаження, що дозволяє використовувати досить широкий спектр контрольно-вимірювального устаткування. Вантажопідйомність БПЛА вертолітного типу вище, ніж літакового, та досягає п'яти десятків кілограм корисного навантаження. Це дає можливість використовувати досить потужну приладову базу. Для цілей моніторингу хімічного забруднення можуть застосовуватися компактні лідарні комплекси. Лідарні комплекси оснащуються набором випромінювачів у широкому спектральному діапазоні випромінювання (від ультрафіолетового до далекого інфрачервоного).

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

США є світовим лідером у розробці та застосуванні БПЛА, які активно використовуються для моніторингу як метеоумов, так і зон хімічного та радіаційного забруднення [196, 197]. Одним із найпотужніших БПЛА у світі є апарат MQ-1 Predator з часом польоту більше 20 годин та максимальною висотою польоту 8 000 м [198]. Хоча на сьогодні він використовується лише

для військових потреб, але за своїми ТТХ може бути переобладнаний у багатофункціональний засіб моніторингу.

Для успішного функціонування підсистеми підтримки прийняття управлінського рішення вона повинна володіти ефективними методами прогнозування процесу опадоутворення у випадку штучного впливу на атмосферні процеси та при різних метеорологічних умовах, а також методами прогнозування динаміки зони ураження атмосферного повітря у разі виникнення надзвичайних ситуацій різного характеру.

Моделювання процесів опадоутворення базується на термодинамічних закономірностях фазових перетворень. Звичайно водяна пара тропосфери перебуває в метастабільному стані, що визначається зниженою температурою її існування. Одним із родоначальників досліджень кінетики фазових перетворень першого роду (газ-рідина) з метастабільного стану речовини є Вільсон [199]. Подальший розвиток теорії фазових перетворень дозволив покращити розуміння процесів опадоутворення на різних ядрах конденсації [200].

Кінетика абсорбції газу рідкими аерозолями є досить складною та багатофакторною. На сьогодні існує два принципово різних підходи до вирішення цього завдання. Ці підходи різняться рівнем точності рішення, кількістю витраченого необхідного розрахункового часу, кількістю вхідних даних та необхідністю попередніх експериментальних досліджень. Для вибору найбільш придатної моделі для вирішення проблеми прогнозування ефективності процесу абсорбції у разі вимивання хімічно небезпечних газів атмосферними опадами нижче проведено аналіз кожної моделі.

Для підвищення точності математичного опису процесу абсорбції та універсальності розрахункових методів останнім часом широкого поширення набули симуляційні моделі.

При цьому існує два різних підходи до побудови моделей – кінетична багатошарова модель (kinetic multilayer model for gas–particle (KM-GAP)) [201] та модель симуляції молекулярної динаміки (molecular dynamics (MD))

simulations) [202]. Модель MD працює на спеціальній платформі комп'ютерного розрахунку GROMACS з додатковою надбудовою для розрахунку абсорбції рідкими аерозолями TIP4P-Ew. У роботі [203] проведено порівняльний аналіз таких моделей та отримано високий ступінь збіжності результатів розрахунків. І хоча для більшості математичних моделей у комплексах моделювання KM-GAP та MD приймаються деякі допущення, що спрощують розрахунок, ці моделі є на сьогодні найбільш точними методами чисельного розрахунку швидкості абсорбції газу рідиною. Необхідно враховувати, що такі розрахунки є досить трудомісткими та вимагають значного розрахункового часу, спеціального програмного забезпечення та значної кількості вхідних даних, які не завжди можна чітко визначити та врахувати.

Уловлювання забруднюючих часток падаючими краплями являє собою особливий випадок інерційного осадження на сферах, тому цьому процесу була присвячена велика кількість досліджень [204-206].

Підсистема виконання рішення повинна базуватись на методах штучного впливу на атмосферні процеси. Перші реальні результати щодо штучного ініціювання опадів отримані в 20-х роках XX сторіччя. Однак найбільший розвиток ці роботи одержали після відкриття в 1946 році американським вченим В. Шефером властивостей твердої вуглекислоти та в 1951 році шведським ученим Б. Воннегатом властивостей йодистого срібла як найбільш активних центрів опадоутворення.

На сучасному етапі найбільш ефективним способом доставки та розпилення активного реагенту є піротехнічні заряди [207]. Моделі процесу горіння піротехнічних сполук можна розділити на п'ять класів: квазігомогенні [208], характерного осередку поверхні горіння [209-211], естафетні [212, 213], малих груп [214, 215], пряме чисельне моделювання процесу горіння твердотільних піросполук [216, 217].

Вивченню процесів кристалоутворення льоду на поверхні часток солі AgI присвячено безліч теоретичних та експериментальних робіт [218-221].

Нові результати досліджень обговорюються й публікуються на конференціях Всесвітньої метеорологічної організації та Асоціації по зміні погоди [222-224]. Дослідження впливу реагенту AgI на екосистему проведено The Weather Modification Association (WMA). Результати цих досліджень повністю підтвердили безпеку використання реагенту AgI, що офіційно зареєстровано в доповіді Всесвітньої метеорологічної асоціації [225].

Способи доставки реагенту в зону впливу різні – це й використання спеціально обладнаних літаків та малогабаритних ракет [226, 227].

Однак у випадку застосування ракет існують обмеження за масою реагенту та істотно знижується точність доставки. У зв'язку з цим у практиці основного поширення набула доставка реагенту за допомогою ЛА. Використання піропатронів дозволяє уникнути використання додаткового устаткування, тому що диспергація твердого масиву піропатрона відбувається внаслідок його горіння та виділення відповідних продуктів реакції. Можливість застосування реагенту без додаткового масивного устаткування дозволяє використати як засоби доставки малогабаритні безпілотні літальні апарати, що істотно знижує економічні витрати. Використання процесу горіння також дозволяє одержати більш дисперсні частки реагенту, відповідно збільшується площа активної поверхні. Для реагенту, упакованого у вигляді твердотілого піропатрона, істотно збільшується строк зберігання та відсутня необхідність запобігання злежуваності реагенту.

Для засівання хмар реагентом у США пропонується використовувати легкомоторні літаки [226]. Для доставки реагенту можуть бути використані будь-які типи літаків, у т.ч. середньовисотні, але попередньо літак повинен бути обладнаний начіпним кріпленням-тримачем факелів [228].

Таким чином, у розвинених державах світу не створено загального підходу до вирішення проблеми ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, що призводять до викиду в атмосферу небезпечних речовин. Однак розроблено широкий спектр технічних засобів моніторингу та штучного

впливу на атмосферні процеси, які, за умови їх додаткової модифікації, можна використовувати як елементи методів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру.

1.3. Специфіка систем запобігання надзвичайним ситуаціям природного та техногенного характеру в Китаї

Останнім часом Китайська Народна Республіка активно розвиває свою космічну галузь. Китай є третьою країною у світі, яка вивела на орбіту Землі свої супутники моніторингу навколишнього середовища. Китай протягом останніх 6 років створив багатоцільове орбітальне угруповання супутників ДЗЗ, що складається з декількох космічних систем: супутники видової розвідки, а також призначені для океанографії, картографії, моніторингу природних ресурсів і надзвичайних ситуацій.

Апарати «Яогань» призначені для дистанційного зондування Землі. Він розроблений для моніторингу планети, з метою дослідження її природних ресурсів і передбачення стихійних лих [233, 234]. Про супутник «Тяньто-2» повідомляється, що він розроблений Інститутом оборонної науки і техніки КНР і призначений для проведення технічних випробувань малих супутників [235-237]. Супутник під назвою «SanTan» надаватиме дані, які допоможуть Китаю ретельно моніторити викиди парникових газів в атмосферу [238, 239].

Також у Китаї розвинені системи наземного моніторингу радіаційної та хімічної обстановки атмосфери. Це пов'язано з великою кількістю промислових об'єктів та атомних електростанцій на території Китаю. На всіх АЕС Китаю функціонують автоматизовані системи контролю радіаційної обстановки [240].

КНР є однією з небагатьох країн світу, де активно займаються розробкою методів хімічного впливу на атмосферні процеси [241]. Однак, як і в багатьох інших країнах світу, основний напрямок досліджень стосується гігроскопічних реагентів [242-244].

Встановлено, що на процеси опадоутворення впливають пил із пустель та продукти горіння великих пожеж, тому необхідно враховувати географічні властивості місцевості при прогнозуванні динаміки розвитку хмар [245, 246]. Це особливо є актуальним для Китаю, де розвинена галузь моніторингу хімічного стану повітря. Зазвичай моніторинг забруднення повітря проводиться за допомогою літаків, але через те, що смог знаходиться у приземному шарі, а також через значну небезпеку польотів у такій зоні, для моніторингу залучають безпілотні літальні апарати [247, 248].

Окремий клас систем наземного моніторингу становлять прилади контролю радіаційного, хімічного та біологічного забруднення.

Стаціонарні системи моніторингу хімічного забруднення мають деякі особливості, пов'язані з необхідністю розпізнання природи речовин із широкою розмаїтістю властивостей небезпечних речовин. Тому будь-яка система контролю хімічного забруднення призначена для виявлення чітко певного переліку хімічно небезпечних речовин. Якщо організується система моніторингу на підприємстві, то встановлюється приладова база для контролю небезпечних речовин, які обертаються в технологічних циклах на цьому підприємстві.

Основним недоліком стаціонарних систем моніторингу є можливість контролю параметрів тільки в точці виміру. Тому для більш якісного моніторингу необхідна розробка мобільних систем.

БПЛА літакового типу можуть бути використані для моніторингу радіаційної обстановки. У цьому випадку реалізуються такі якості вказаного типу БПЛА, як висока швидкість та дальність польоту (відповідно більша площа моніторингу); при цьому зазначені характеристики не знижують якості радіаційного контролю.

Однак при проведенні моніторингу хімічного забруднення та деяких метеорологічних параметрів висока швидкість польоту призводить до значної похибки виміру, тому в цьому випадку доцільно використовувати БПЛА вертолітного типу – оптокоптери.

Метеорологічні служби в Китаї займаються екологічною безпекою атмосферного повітря та зосереджені на аналізі параметрів, що безпосередньо пов'язані з діяльністю людини і які впливають на здоров'я людини. В останні роки забруднення повітря та інші екологічні проблеми привернули увагу всього світу, тому екологічні метеорологічні служби були швидко розвинені. В березні 2014 року шляхом інтеграції ресурсів різних національних сервісних підрозділів був створений Метеорологічний центр Китаю для моніторингу та прогнозування стану навколишнього середовища [249, 250].

Територія Китаю має значні географічні розміри з певними природними особливостями кожного регіону. Тому важливим питанням є вивчення структури хмар та їх розподіл по висоті та території держави. Вплив на конвективні хмари у північній частині Китаю дозволяє зменшувати негативний вплив засухи на сільськогосподарську галузь [251-253].

З метою підвищення якості моніторингу атмосферного повітря в Китаї створено два науково-дослідних центри – Національний центр екологічного прогнозування (NCEP) та Центр прогнозування клімату (CMAP). Такі центри проводять повний спектр метеорологічного радіаційного та хімічного моніторингу атмосферного повітря, здійснюють прогнозування розвитку ситуації та надають рекомендації для штучного впливу на атмосферні процеси [254-257].

Для підвищення ефективності прогнозування динаміки процесів опадоутворення при засіванні хмар краплеутворюючими реагентами спеціалістами з Китайського інституту фізики атмосфери розроблено програмні комплекси Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model (MM5). Такі моделі дозволяють прогнозувати інтенсивність опадів та швидкість їх появи у випадку засівання хмари йодистим сріблом [258]. Однак експериментальна перевірка моделі на реальних об'єктах показала деякі недоліки, які були усунені в роботах [259, 260]. У випадку використання

таких моделей важливим є якісний моніторинг структури хмари, що підлягає засіву.

Таким чином, у Китайській Народній Республіці останнім часом швидко розвиваються системи космічного моніторингу зони надзвичайної ситуації. За рахунок територіальних та економічних особливостей держави, Китай проводить роботи по створенню систем ліквідації наслідків масштабних надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, однак ці роботи перебувають на початковому етапі.

1.4. Особливості запобігання надзвичайним ситуаціям природного та техногенного характеру в державах СНД

Загальна структура системи забезпечення цивільного захисту складається із чотирьох основних блоків: об'єкт впливу, система моніторингу, система підтримки ухвалення рішення та система виконання рішення [261-264].

Відповідно до того, на які ймовірні НС орієнтується та чи інша система моніторингу, вони існують об'єктового, місцевого, регіонального та державного рівнів [264-272]. Серед космічних систем гідрометеорологічного моніторингу слід виділити комплекси «Метеор-3М» та «Метеор-МП».

На жаль, Україна не має власних супутників космічної системи моніторингу, але за домовленостями із США та Євросоюзом ДСНС України можуть користуватись даними, отриманими із супутникових систем цих держав.

Основою системи наземного моніторингу метеорологічної обстановки є метеорологічні радіолокатори (МРЛ), які дозволяють зондувати параметри атмосфери в радіусі 200 км [273-276]. МРЛ дозволяють одержувати дані про горизонтальні та вертикальні координати хмарності, обводненість хмари, інтенсивність опадів, швидкість вітру та температуру.

На території РФ застосовуються МРЛ-2, МРЛ-5. Останнім часом розроблено автоматизований метеорологічний радіолокаційний комплекс АМРК «Метеоячейка», який дозволяє дистанційно керувати радіолокатором, проводити автоматичну обробку даних та зіставлення отриманих даних з картою місцевості. До іншого сімейства технічних засобів, які можна використовувати для штучного ініціювання опадів, відносяться метеорологічні радіолокатори (МРЛ) або автоматизовані метеорологічні радіолокаційні комплекси (АМРК).

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 та ін.), а також для визначення швидкості та напрямку їхнього переміщення з метою забезпечення безпеки польотів [277, 278].

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

Антенна МРЛ складається з великого та малого параболічних відбивачів та зведеного дводіапазонного опромінювача. Великий параболічний відбивач являє собою параболоїд обертання із круговим розкритом. Розкриття діаграми спрямованості становить $1,5^\circ$. Сканування за кутом місцевості від -1° до 95° . Імпульсна потужність на виході – 250 кВт та 800 кВт. Більш детально технічні дані МРЛ-5 наведені в РД 52.04.320-91 «Посібник з проведення спостережень та використання інформації з неавтоматизованих радіолокаторів МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5».

Принципова відмінність АМРК від МРЛ полягає в наявності системи автоматизованої обробки та передачі отриманих від радіолокатора даних. Оскільки на ефективність вирішення розглянутого в роботі завдання основний вплив справляє радіолокатор, то докладно зупинимося саме на цьому елементі АМРК.

Залежно від модифікації АМРК працюють із МРЛ-1, МРЛ-2 та МРЛ-5. На сьогодні МРЛ-1, МРЛ-2 вважаються застарілими та більшість аеропортів переобладнується на МРЛ-5. Також розроблено перспективний АМРК «Метеор-Метеоячейка» з використанням радіолокатора МЕТЕОР-500С [278]. Діапазон робочих частот вказаного радіолокатора становить 5450–5800 МГц із тривалістю імпульсу 0,5 - 2 мкс, кутова точність – 1°. Імпульсна потужність на виході 800 кВт.

Одним із прикладів стаціонарних засобів контролю є автоматизована система контролю радіаційної обстановки (АСКРО) [279]. Комплекс АСКРО призначений для здійснення безперервного контролю радіаційної обстановки на об'єктах атомної енергетики, у санітарно-захисній зоні та зоні спостереження. Вимірювальна апаратура розміщується по периметру зони контролю та здійснює збір і передачу даних у реальному часі. Крім даних радіаційної обстановки, зазначена система проводить моніторинг основних метеорологічних параметрів атмосфери в точці виміру.

Найбільш перспективним на сьогодні є створення автоматизованої вимірювальної системи виробничо-екологічного моніторингу (АВСВЕМ) [280].

Основним недоліком стаціонарних систем моніторингу є можливість контролю параметрів тільки в точці виміру. Тому для більш якісного моніторингу необхідна розробка мобільних систем, таких як автоматизована система екологічного моніторингу мобільного комплексу аварійного реагування (АСЕММКАР) [280], що розробляється та впроваджується в Російській Федерації.

У більшості країн, де експлуатуються атомні електростанції, створено Єдину державну автоматизовану систему контролю радіаційної обстановки (ЕДАСКРО), контрольні виміри якої надходять у загальну базу даних [281]. Цією системою облаштовані всі АЕС, що експлуатуються в Україні.

Система моніторингу надзвичайних ситуацій в рамках ДСНС встановлюється у великих населених пунктах та здійснює контроль вмісту в

повітрі таких газів, як: монооксид вуглецю та азоту, діоксид азоту та сірки, пил, пар формальдегіду (H_2CO), свинцю, бенз(а)пірену та ін. В окремих випадках може здійснюватися контроль додаткового переліку речовин.

Серед переваг БПЛА можна відзначити: рентабельність; можливість контролю параметрів у широкому діапазоні висот; одержання даних у точно заданих координатах у точно зазначений час; оперативність включення в роботу системи; можливість використання в небезпечній зоні без ризику для життя та здоров'я пілотів [282].

БПЛА бувають літакового та вертолітного типів. Кожен тип має свої переваги та недоліки, які й визначають специфіку їхнього використання для моніторингу надзвичайних ситуацій.

Як приклади таких БПЛА можна привести апарати фірми ZALA [283]. Безпілотні літаки оснащуються системою автоматичного керування (автопілот), навігаційною системою з інерційною корекцією (GPS/ГЛОНАС), вбудованою цифровою системою телеметрії, навігаційними вогнями, вбудованим тривимірним магнітометром, модулем утримання та активного супроводу цілі, цифровим вбудованим фотоапаратом, цифровим ширококутовим відеопередавачем, дозиметрами, радіометрами.

Іншою складовою процесу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій є прогнозування їх розвитку при різних варіантах зовнішнього впливу. У сучасному викладанні кінетики фазових перетворень, при поступовому створенні метастабільності в системі, краплеутворення проходить дві стадії [284]. Першою з них за часом настання є стадія нуклеації. У цей період утворюються зародки нової стабільної фази. Вказана стадія в масштабах характерного часу краплеутворення є досить швидкоплинною. Швидкість нуклеації характеризується як активністю центрів нуклеації стосовно молекул пари, так і ступенем метастабільності вихідної фази. При цьому необхідно враховувати, що в процесі нуклеації ступінь метастабільності знижується. Друга стадія краплеутворення є стадією колапсу, під час якої відбувається зростання зародків за рахунок приєднання молекул пари без

зміни їхньої кількості в об'ємі. І завершується процес утворення рідкої фази стадією оствальдовського дозрівання – коагуляцією дрібних крапель, що не відноситься до кінетики метастабільного стану та на сьогодні досить добре вивчена [285]. Зазначена стадія відноситься до процесів розвитку вже сформованих хмарових утворень.

У теорії фазових переходів розділяють гомогенну та гетерогенну конденсації [286]. Гомогенна конденсація відбувається за більшого ступеня пересичення водяної пари у порівнянні з гетерогенною конденсацією в присутності активних ядер краплеутворення. Гомогенне краплеутворення відбувається за наступним механізмом: у локальних областях пересиченої пари з підвищеною концентрацією молекул утворюються малі молекулярні кластери – зародки, на яких надалі конденсується пара та утворюється крапля.

Енергетично можливість утворення та росту краплі визначається співвідношенням енергій Гіббса двох фаз [21, 287-289]. Якщо у пари енергія Гіббса більша, ніж у води ($G_{\text{п}} > G_{\text{в}}$, $\Delta G < 0$), то відбувається конденсація та зростання краплі; у протилежному випадку ($G_{\text{п}} < G_{\text{в}}$, $\Delta G > 0$) утворення нових крапель відбуватися не буде, а вже існуючі краплі будуть випаровуватися.

Прогнозування процесів осадження із атмосферного повітря шкідливих та радіоактивних речовин відноситься до іншого класу задач. Їх основу складають моделі сорбції газів та аерозольних речовин краплями води [290].

Найбільш широке застосування в практичній діяльності для проектування технологічних процесів набула модель розрахунку процесу абсорбції з використанням теорії подібності та, відповідно, критеріальних рівнянь [291].

Критерії подібності дозволяють врахувати більшість фізико-хімічних особливостей процесу абсорбції. Метод розрахунку процесу абсорбції газів на основі теорії подібності є досить простим, однак має обмеження за сферою застосування та значну похибку при варіюванні умов процесу абсорбції.

Математичний опис сорбції газу краплями являє собою окремий клас фізико-хімічних задач [292, 293], які ми розробляли надалі.

Штучне викликання опадів – спосіб впливу на переохолоджені хмари для стимулювання опадів [294, 295]. Перспективними для штучного опадоутворення є добре розвинені конвективні хмари товщиною (потужністю) не менше 2,5 км із температурою на верхній границі не вище -6°C . Опади зливогого характеру починають випадати із хмари через 8–12 хв після введення в неї реагенту та, залежно від потужності та водозапасу хмари, тривають 20–50 хв і більше. Розмір площі зони, що змочується, залежить від розміру основи хмари, швидкості руху, тривалості дощу та коливається від 10 до 300 км^2 . Щоб опади випали над необхідним місцем, реагентом «засівають» не одну хмару, а декілька [296].

В РФ проводяться роботи щодо розробки нових піротехнічних сполук [297, 298]. Одним з перспективних напрямів є використання ефекту термоіонізації [299]. Сутність процесу термоіонізації полягає в протіканні термоелектронної емісії вільних електронів з поверхні, розігрітої до високих температур ($T \approx 1900\text{--}2000\text{ K}$), продуктів горіння піропатронів, що використовуються для активних впливів на хмари. Основними компонентами таких піропатронів є: порошкоподібне металеве пальне (магній або його сплави), окислювач (калієва селітра) та невеликі добавки органічної речовини [300]. Наявність органічної речовини призводить до утворення в продуктах горіння КОН та K_2CO_3 . Однак визначальними факторами ефективності таких пристроїв є параметри їхнього горіння [301–303].

В державах СНД вивчаються питання процесів кристалоутворення льоду на поверхні часток солі AgI [289, 304].

Для доставки реагенту в зону хмарності зазвичай використовують малі транспортні літаки. Авіаційний комплекс технічних засобів впливу в загальному випадку включає: спеціальне повітряне судно; технічні засоби впливу; реагенти; засоби виміру параметрів атмосфери; засоби керування роботами по АВ [305].

Технічні засоби впливу складаються з касетних пристроїв, літакових аерозольних генераторів (САГ-П [306-308], САГ-ПМ) або ракетних пістолетів для піропатронів ПВ-26 [309], що використовуються з легкомоторних повітряних суден типу Ан-2 та ін.

Літаки Ан-26Б та Ан-32п оснащені системою АСО (модифікація АСО-2И) для відстрілу піропатронів ПВ-26 (ПВ-26-95, ПВ-26-01) з капсулем центрального бою або електрозапальником [306, 308].

З існуючих реагентів використовують йодисте срібло (1–2 % від загального обсягу піротехнічної суміші (САГ-П) або з 8 % вмістом AgI – АД-1 (САГ-ПМ)) [306].

Розроблені на цей час генератори САГ-П розрізняються за часом димоутворення (60 та 100 с), що забезпечує створення лінійного джерела, довжина якого достатня для засівання потужних купчастих хмар обраного класу одним САГ-П. Система приведення в робочий стан САГ-П забезпечує потрібні діапазони дозувань залежно від метеоумов та завдання, що вирішується. Живлення системи керування здійснюється від бортової мережі $27 \text{ В} \pm 10 \%$. Час горіння піросполуки САГ-ПМ $120 \pm 20 \text{ с}$, вихід льодоутворюючих ядер – $10^{14} - 10^{15} \text{ м}^{-1}$, вміст йодистого срібла відповідно 2 та 8 %.

До засобів виміру та реєстрації параметрів атмосфери та хмар для літака-оператора слід відносити штатне устаткування літака: висотомір, варіометр, показчик температури, показчик швидкості літака та курсу польоту, GPS/GLONAS. До позаштатного устаткування – кутомір (сектант), секундомір, електрометеорограф, вимірник водності хмар [310], відеокамери, персональний комп'ютер та інші технічні засоби.

При впливах із землі засівання хмар може здійснюватися за допомогою наземних генераторів або за допомогою ракет та снарядів, оснащених реагентом для штучного ініціювання опадів [303]. У середньому витрата піросполуки становить 2–4 кг/годину. Як реагент для впливів на хмари, з метою штучного опадоутворення, може використовуватися й вода у вигляді аерозолію [311]. Для засіву хмар водним аерозолем, розчинами

гігроскопічних речовин або порошкоподібних реагентів можуть бути використані форсунки різної конструкції [312].

У роботах [287, 313] теоретично та експериментально продемонстровано високу інтенсивність краплеутворення при введенні в зону впливу вільних іонів. Однак питання доставки таких іонів на висоти 3-5 км, у зону активного опадоутворення, залишається невирішеним.

Одним з рішень даної проблеми є використання ефекту термоіонізації.

За способом утворення активних центрів конденсації розрізняють два класи піротехнічних сполук для активного впливу на хмари [304]. До першого класу відносяться сполуки, у яких активні центри конденсації містяться в готовому вигляді та не беруть участі у процесі горіння, а до другого класу – сполуки, у яких активні центри конденсації утворюються в результаті фізико-хімічної реакції горіння.

В якості носіїв хімічних реагентів для засівання хмар може використовуватися широкий спектр транспортної авіації корпорацій АНТК «Антонов». Вся авіація ДСНС України підпорядкована спеціалізованому авіаційному загону Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту, що базується у м. Ніжин Чернігівської області. САЗ ДСНС України має 4 літаки АН-32П, 1 транспортний літак АН-26 та 3 гелікоптери МИ-8.

В 1987 році на базі АН-26 створено літак для боротьби із грозовими хмарами Ан-26Б «Циклон» [314]. Цей літак призначався для впливу на хмари за допомогою спеціальних хімічних препаратів, з метою штучного збільшення атмосферних опадів, а також захисту від них заданих територій. Літак був оснащений двома підвісними пристроями АСО-2І, на яких розміщувались метеопатрони із зарядами йодистого срібла. У вантажній кабіні розташовувалась ємність для гранул вуглекислоти, розрахована на 1,5 т. Також у вантажній кабіні знаходилося обладнання для розсіювання вуглекислоти.

До основних тактико-технічних характеристик (ТТХ) АН-26Б відносяться: вантажопідйомність – 5000 кг; радіус польоту – 450 км; практична висота польоту – 7500 м [314].

Таким чином, серед держав СНД лідером у розробці методів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру є Росія, де створено супутникову систему моніторингу та розробляються наземні комплекси контролю стану атмосферного повітря. В Україні для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій використовуються системи як російського виробництва, так і виробництва США та Європи.

1.5. Правові основи розробки методів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій для атмосферного повітря в Україні

Комплексність підходу до вирішення завдань цивільного захисту, згідно Кодексу цивільного захисту України (Розділ I – Загальна частина, Глава 1 – Загальні положення, Стаття 7 – Основні принципи здійснення цивільного захисту), є одним з основних принципів забезпечення цивільного захисту [315]. Однак, як зазначено вище, на належному рівні в Україні створено лише підсистему моніторингу навколишнього середовища.

Створення єдиної системи моніторингу надзвичайних ситуацій в Україні тільки починається [261, 262], тому правові основи проведення моніторингу надзвичайних ситуацій також не об'єднані в єдину правову базу [316, 317].

Відповідно до Статті 43 – Моніторинг і прогнозування надзвичайних ситуацій Кодексу цивільного захисту України, з метою забезпечення здійснення заходів із запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, в Україні проводяться постійний моніторинг і прогнозування надзвичайних ситуацій. Спостереження, лабораторний та інший контроль включають збирання, опрацювання і передавання інформації про стан навколишнього природного середовища, забруднення продуктів харчування, продовольчої

сировини, фуражу, води радіоактивними та хімічними речовинами, зараження збудниками інфекційних хвороб та іншими небезпечними біологічними агентами. Для проведення моніторингу і прогнозування надзвичайних ситуацій в Україні створюється та функціонує система моніторингу і прогнозування надзвичайних ситуацій. Порядок функціонування системи моніторингу і прогнозування надзвичайних ситуацій, проведення моніторингу і прогнозування надзвичайних ситуацій, перелік установ та організацій, які належать до суб'єктів моніторингу, спостереження, лабораторного контролю і прогнозування надзвичайних ситуацій, визначаються Кабінетом Міністрів України. Суб'єкти моніторингу, спостереження, лабораторного контролю та прогнозування надзвичайних ситуацій на регіональному, місцевому та об'єктовому рівні визначаються Радою міністрів, відповідними місцевими державними адміністраціями, органами місцевого самоврядування, суб'єктами господарювання [315].

Однак завдання моніторингу НС у структурі ДСНС України покладено на Управління гідрометеорології України. Це Управління за своїм функціональним призначенням здатне здійснювати контроль діяльності державної системи гідрометеорологічних спостережень, екологічного моніторингу, прогнозування та гідрометеорологічного забезпечення, зокрема за проведенням гідрометеорологічних, геліофізичних спостережень, фонових радіаційних та базових спостережень за станом забруднення навколишнього природного середовища та веденням державного обліку, реєстрацією та зберіганням матеріалів гідрометеорологічних спостережень, веденням інформаційної бази гідрометеорологічних даних та даних про стан навколишнього природного середовища. Завданням Управління гідрометеорології України також є прогнозування погоди, гідрологічного режиму водних об'єктів, небезпечних та стихійних гідрометеорологічних явищ, урожайності сільськогосподарських культур та надання інформації про фактичні та очікувані зміни гідрометеорологічних умов і стану навколишнього природного середовища, попередження про небезпечні та

стихійні гідрометеорологічні явища, а також здійснення гідрометеорологічного обслуговування суб'єктів господарювання незалежно від форм власності. До компетенції Управління гідрометеорології також входить організація здійснення заходів щодо моніторингу забруднення навколишнього природного середовища на пунктах державної системи гідрометеорологічних спостережень; контроль вмісту забруднюючих речовин та радіонуклідів у атмосферному повітрі; гідрохімічних показників водойм; аналіз ґрунтів та опадів [48, 317-320].

Узагальнюючи функції цього Управління, слід зазначити, що воно здатне забезпечити лише моніторинг навколишнього середовища. При цьому задачі проведення спостережень за станом навколишнього середовища та рівнем його забруднення, згідно із Законом України «Про охорону навколишнього середовища» (Розділ V – Спостереження, прогнозування, облік та інформування в галузі навколишнього природного середовища, Стаття 22 – Моніторинг навколишнього природного середовища) [316], покладено на Державну систему моніторингу довкілля (ДСМД). Основні принципи функціонування ДСМД визначені в постанові Кабінету Міністрів України від 30 березня 1998 року № 391 [317]. Метою створення ДСМД є проведення систематичних спостережень, збирання, оброблення, передавання, збереження та аналізу інформації про стан довкілля, прогнозування його змін і розроблення науково обґрунтованих рекомендацій для прийняття рішень про запобігання негативним змінам стану довкілля та дотримання вимог цивільної безпеки.

Ця система є відкритою, пріоритетами функціонування якої є захист життєво важливих інтересів людини і суспільства; збереження природних екосистем; відвернення кризових змін стану довкілля і запобігання надзвичайним ситуаціям.

Функціонування ДСМД здійснюється за трьома рівнями, які розподіляються за територіальною ознакою – загальнодержавний, регіональний та локальний.

Виконання функцій ДСМД покладено на: Міністерство аграрної політики та продовольства України; Міністерство екології та природних ресурсів України; Державну агенцію України з управління зоною відчуження; Державну службу геології та надр України; Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України; Державне космічне агентство України; 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, які є суб'єктами моніторингу навколишнього середовища, а також підприємства та організації, дії яких можуть призвести до забруднення навколишнього середовища.

Для координації дій ДСМД створено Міжвідомчу комісію з питань моніторингу навколишнього середовища [321].

Моніторинг потенційно небезпечних об'єктів (ПНО) здійснюється на підставі наказу МНС України від 06.11.2003 р. № 425 «Про затвердження положення про моніторинг потенційно небезпечних об'єктів» [322]. Положенням визначаються основні завдання суб'єктів моніторингу ПНО та порядок ведення моніторингу. При цьому відповідальні особи ПНО забезпечують виконання систематичних спостережень за параметрами стану ПНО та надають відповідним уповноваженим органам з питань НС та цивільного захисту населення (ЦЗН) інформацію про стан ПНО; інформація надається у формі електронного документа згідно із законодавством або на паперовому носії, в установленому порядку; передавання інформації здійснюється за допомогою системи комп'ютерного зв'язку та існуючих технічних засобів зв'язку регіону, області чи міста, а також у формі письмових повідомлень; інформація, що має конфіденційний характер, подається виключно за допомогою захищених засобів зв'язку або у формі письмових повідомлень в установленому порядку; внесення до відповідної бази даних підсистеми моніторингу ПНО та оброблення інформації

здійснюють фахівці уповноваженого органу з питань НС та ЦЗН; уповноважені органи з питань НС та ЦЗН проводять контроль щодо вірогідності отриманих від відповідальних осіб ПНО інформаційних даних і попередню оцінку змін у стані ПНО; про зміни у стані ПНО, які можуть спричинити НС об'єктового або місцевого рівня, уповноважені органи з питань НС та ЦЗН в установленому порядку повідомляють відповідні місцеві органи виконавчої влади для прийняття управлінських рішень; у разі коли зміни у стані ПНО можуть призвести до НС регіонального або державного рівнів, інформація про них негайно подається до ДСНС України. Уповноважені органи з питань НС та ЦЗН своєчасно передають інформацію стосовно результатів моніторингу до Департаменту СФД.

Аналізуючи вищенаведену систему моніторингу надзвичайних ситуацій, слід зазначити наступні недоліки: відсутність єдиної мережі спостережень; застаріле матеріально-технічне оснащення; неповна відповідність нормативно-правового забезпечення системи моніторингу сучасним вимогам; відсутність необхідного технічного оснащення в більшості регіонів України.

При комплексному підході до питання забезпечення цивільного захисту держави при виникненні надзвичайних ситуацій обов'язковою є ліквідація або мінімізація впливу небезпечних чинників, які виникли внаслідок надзвичайної ситуації (Розділ VI – Реагування на надзвичайні ситуації та ліквідація їх наслідків, Глава 16 – Ліквідація наслідків надзвичайних ситуацій, Стаття 79 – Проведення аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт) [315]. Разом із цим у Розділі IV – Захист населення і територій від надзвичайних ситуацій, Главі 8 – Інженерний захист територій, радіаційний і хімічний захист, Статті 35 – Радіаційний і хімічний захист населення і територій Кодексу цивільного захисту України не передбачено проведення активних заходів з мінімізації зони ураження атмосфери, що є суттєвим недоліком та суперечить загальним положенням

(Статті 4 – Цивільний захист, Стаття 7 – Основні принципи здійснення цивільного захисту) цього ж закону [315].

Об'єкти осадження у разі виникнення надзвичайних ситуацій та умови забезпечення безпеки визначаються за параметром гранично допустимої концентрації небезпечних речовин, які регламентуються Законом України «Про охорону атмосферного повітря» від 16.10.92 р. [323]. Цей Закон (Стаття 16 – Регулювання діяльності, що впливає на погоду та клімат) визначає необхідність отримання дозволу для здійснення штучного ініціювання опадів. Це відноситься до компетенції центральних органів виконавчої влади, що забезпечує реалізацію державної політики у сфері охорони навколишнього природного середовища, за погодженням із центральним органом виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері санітарного та епідемічного благополуччя населення, місцевими органами виконавчої влади та органами місцевого самоврядування.

Аналізуючи існуючу законодавчу систему України у сфері мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій, необхідно зазначити, що прийняті в державі закони та підзаконні акти базуються на основних міжнародних законах Всесвітньої метеорологічної організації ООН, Конвенції про транскордонне забруднення повітря на великі відстані (Женева, 1979), Конвенції про оперативне оповіщення про ядерну аварію (Відень, 1986), Віденській конвенції про охорону озонового шару (1985), Рамковій конвенції ООН про зміну клімату (Ріо-де-Жанейро, 1992), Конвенції про оцінку впливу на навколишнє середовище в транскордонному контексті (Еспо, 1999) [324-329].

Таким чином, правові основи для створення системи ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій для атмосфери методами штучного опадоутворення закріплені в законах та інших підзаконних актах, які ґрунтуються на міжнародній правовій базі.

Висновки по розділу 1

1. У разі виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру в атмосферне повітря потрапляють хімічні та радіоактивні речовини у дисперсному та газоподібному стані з різними поверхневими властивостями, які здатні реагувати з активними компонентами атмосфери та утворювати нові небезпечні сполуки.

2. У розвинених державах світу не створено загального підходу до вирішення проблеми ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, що призводять до викиду в атмосферу небезпечних речовин. Однак розроблено широкий спектр технічних засобів моніторингу та штучного впливу на атмосферні процеси, які, за умови їх додаткової модифікації, можна використовувати як елементи методів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру.

3. В Китайській Народній Республіці останнім часом швидко розвиваються системи космічного моніторингу зони надзвичайної ситуації. За рахунок територіальних та економічних особливостей держави, Китай проводить роботи по створенню систем ліквідації наслідків масштабних надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, однак ці роботи перебувають на початковому етапі.

4. Серед держав СНД лідером у розробці методів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру є Росія, де створено супутникову систему моніторингу та розробляються наземні комплекси контролю стану атмосферного повітря. В Україні для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій використовуються системи як російського виробництва, так і виробництва США та Європи.

5. Правові основи для створення системи ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій для атмосфери методами штучного опадотворення закріплені в законах та інших підзаконних актах, які ґрунтуються на міжнародній правовій базі.

РОЗДІЛ 2.

ОСОБЛИВОСТІ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ПРИРОДНОГО ТА ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ З ВИКИДОМ НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРУ

Вирішувати другу задачу наукових досліджень будемо наступним чином. По-перше, розглянемо методологічні основи побудови системи ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що супроводжуються викидом в атмосферу небезпечних газоподібних та дисперсних речовин.

Далі зробимо класифікацію небезпечних хімічних речовин, що потрапляють в атмосферу у разі виникнення надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру.

Наступним кроком буде встановлення особливостей радіоактивних викидів в атмосферне повітря при надзвичайних ситуаціях атомно-промислового комплексу України.

Після цього опишемо особливості ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій з викидом в атмосферу небезпечних хімічних та радіоактивних речовин шляхом штучного ініціювання опадів.

2.1. Методологічні основи ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що супроводжуються викидом в атмосферу небезпечних речовин

Необхідність створення системи ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій для атмосфери закладено в самому визначенні терміна «цивільний захист». Згідно Статті 4 Кодексу цивільного захисту України [315], Цивільний захист – це функція держави, спрямована на захист населення, територій, навколишнього природного середовища та майна від

надзвичайних ситуацій шляхом запобігання таким ситуаціям, ліквідації їх наслідків і надання допомоги постраждалим у мирний час та в особливий період. При цьому система мінімізації наслідків НС повинна будуватись в рамках Єдиної державної системи цивільного захисту (ЄДС ЦЗ), основи функціонування якої викладені в Розділі II Кодексу цивільного захисту України. Єдина державна система цивільного захисту забезпечує реалізацію політики у сфері цивільного захисту та складається з функціональних та територіальних підсистем та їх ланок (рис. 2.1).

Наукові дослідження спрямовані на вирішення таких основних завдань ЄДС ЦЗ, як: забезпечення готовності міністерств та інших центральних та місцевих органів виконавчої влади, органів місцевого самоврядування, підпорядкованих їм сил і засобів до дій, спрямованих на запобігання і реагування на надзвичайні ситуації; захист населення у разі виникнення надзвичайних ситуацій; проведення рятувальних та інших невідкладних робіт щодо ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, організація життєзабезпечення постраждалого населення та пом'якшення можливих наслідків надзвичайних ситуацій у разі їх виникнення [315].

Серед основних об'єктів навколишнього середовища, на яке впливають наслідки надзвичайної ситуації, є повітря, вода та ґрунт. Згідно Закону України про охорону навколишнього природного середовища [316] пріоритет серед цих об'єктів має повітря. Такий саме висновок можна зробити порівнявши гранично допустимі концентрації у повітрі [48], воді [318], та ґрунті [319]. Це пов'язано з часом існування живих істот, насамперед людини, без доступу до цих об'єктів та швидкості поширення зони забруднення. Відповідно у разі виникнення НС першочерговим завданням є мінімізація наслідків НС для атмосфери.

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

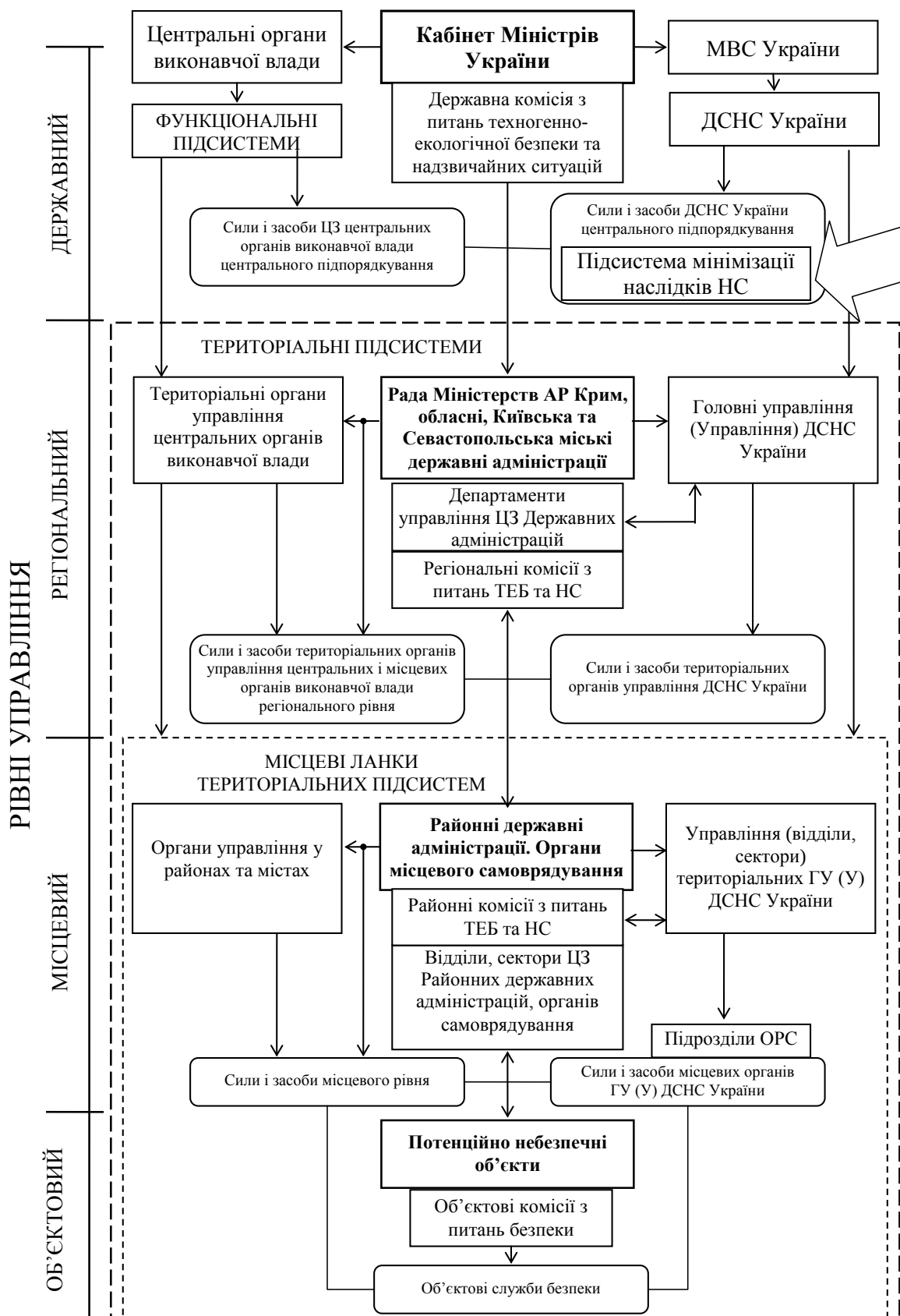


Рис. 2.1. Схема побудови та управління ЄДС ЦЗ з включенням підсистеми мінімізації наслідків НС для атмосферного повітря

Моніторинг хімічного складу повітря в нижній атмосфері здійснює Державна система моніторингу довкілля (ДСМД), що діє відповідно до постанови Кабінету Міністрів України [317]. Створення такої системи передбачено на законодавчому рівні [316].

Системи моніторингу в рамках ДСМД встановлюються у великих населених пунктах та проводять контроль вмісту в повітрі таких газів як: монооксид вуглецю та азоту, діоксид азоту та сірки, пил, формальдегід (H_2CO), свинець та бенз(а)пірен. В окремих випадках може проводитись контроль додаткового переліку речовин.

Локалізація шкідливих речовин у місцях їхнього утворення здійснюється шляхом очищення викидів від шкідливих речовин в апаратах очищення, встановлених у випускній системі, збору шкідливих речовин, їхнього безпечного зберігання та захоронення [320].

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

На сьогодні процес очищення повітря нижньої атмосфери здійснюється лише природним шляхом – гравітаційне осадження, зниження концентрації за рахунок вітрових потоків та осадження забруднень атмосферними

опадками. Найбільш ефективним механізмом є осадження забруднюючих речовин опадами.

Однак мимовільне випадіння атмосферних опадів із необхідною інтенсивністю над зоною забруднення відбувається вкрай рідко. Відповідно одним зі шляхів вирішення проблеми ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного або техногенного характеру є штучне ініціювання атмосферних опадів.

Забезпечити високий рівень ефективності реалізації різних методів мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій природного або техногенного характеру на регіональному та державному рівні можна лише шляхом створення комплексної системи.

Загальна структура системи забезпечення цивільного захисту складається із чотирьох основних блоків: об'єкт впливу, система моніторингу, система підтримки ухвалення рішення та система виконання рішення [261-264] (рис. 2.2).

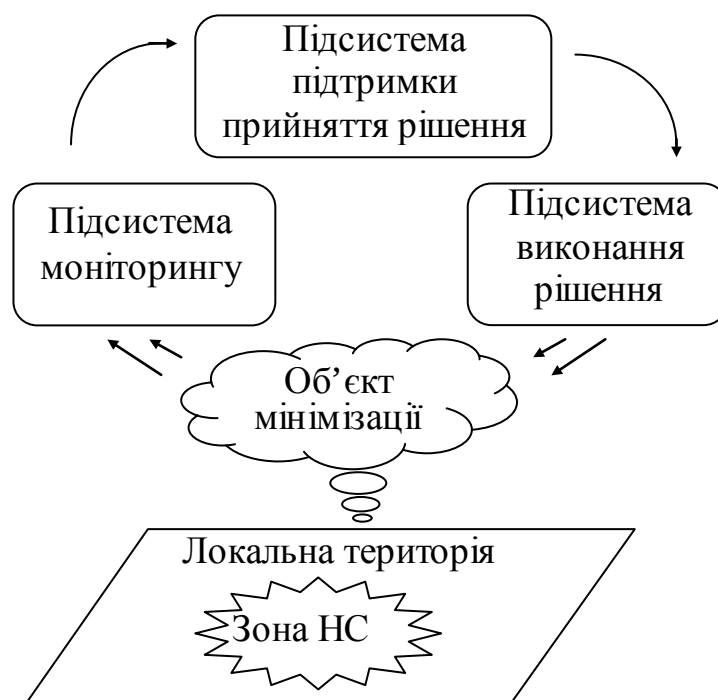


Рис. 2.2. Загальна структура побудови системи мінімізації наслідків НС в рамках ЄДС ЦЗ

Структура моніторингу надзвичайних ситуацій складається із трьох рівнів [261-267]. До першого рівня відносяться пристрої реєстрації небезпечних факторів або метеорологічних параметрів. Такі прилади можуть застосовуватись як для реєстрації одного параметра, так і декількох параметрів паралельно. Оскільки контроль параметрів необхідно проводити в різних точках простору, то пристрої контролю можуть бути рознесені по горизонталі (у точках із різними географічними координатами) та по вертикалі (контроль параметрів на різних висотах).

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

У системі підтримки ухвалення рішення (рис. 2.2) особа, що приймає рішення, визначає один або кілька критеріїв, з урахуванням яких здійснюється прогностичне моделювання зони поширення забруднення та формуються управлінські рішення, які обґрунтовані відповідними розрахунками.

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

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

Для більш оперативної роботи органів управління процесом ліквідації зони забруднення повинні бути створені програмно-технічні комплекси

автоматизованих робочих місць. Кожний зі створених таких комплексів повинен забезпечувати автоматизацію виконання деяких закріплених функцій, забезпечення оперативності прийняття та обробки інформації персоналом управління в інтерактивному режимі та простоту у використанні.

У цілому вимоги до системи мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій для атмосфери методами штучного опадоутворення включають: проведення якісного (повного, своєчасного) моніторингу метеорологічної ситуації в зоні впливу; проведення якісного моніторингу зони забруднення; наявність інструменту достовірного прогнозування метеорологічних процесів та процесів очищення атмосфери; наявність автоматизованого програмно-технічного комплексу збору даних та їхньої обробки для якісного ухвалення управлінського рішення; наявність методик використання ефективних методів та способів штучного ініціювання опадів над зоною забруднення.

Таким чином, одним з пріоритетних напрямків ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій є захист атмосферного повітря, який необхідно реалізовувати в рамках функціонування в Україні Єдиної державної системи цивільного захисту методами штучного опадоутворення на основі класичного контуру управління, що забезпечує збір, обробку та аналіз інформації, моделювання розвитку небезпечної ситуації в зоні ураження та використання ефективних методів і способів штучного ініціювання опадів над зоною забруднення.

2.2. Класифікація небезпечних хімічних речовин, що потрапляють в атмосферу при надзвичайних ситуаціях природного та техногенного характеру

Прогнозування випадіння кислотних дощів є можливим у разі встановлення кількісного зв'язку між антропогенними джерелами та місцем випадіння опадів. Для цього необхідно чітко уявляти процеси хімічної трансформації речовин та закономірності масопереносу.

Це завдання є дуже складним, оскільки як у газовій, так і у рідкій фазі протікає безліч процесів. Найбільш важливі з них представлені на рис. 2.3.

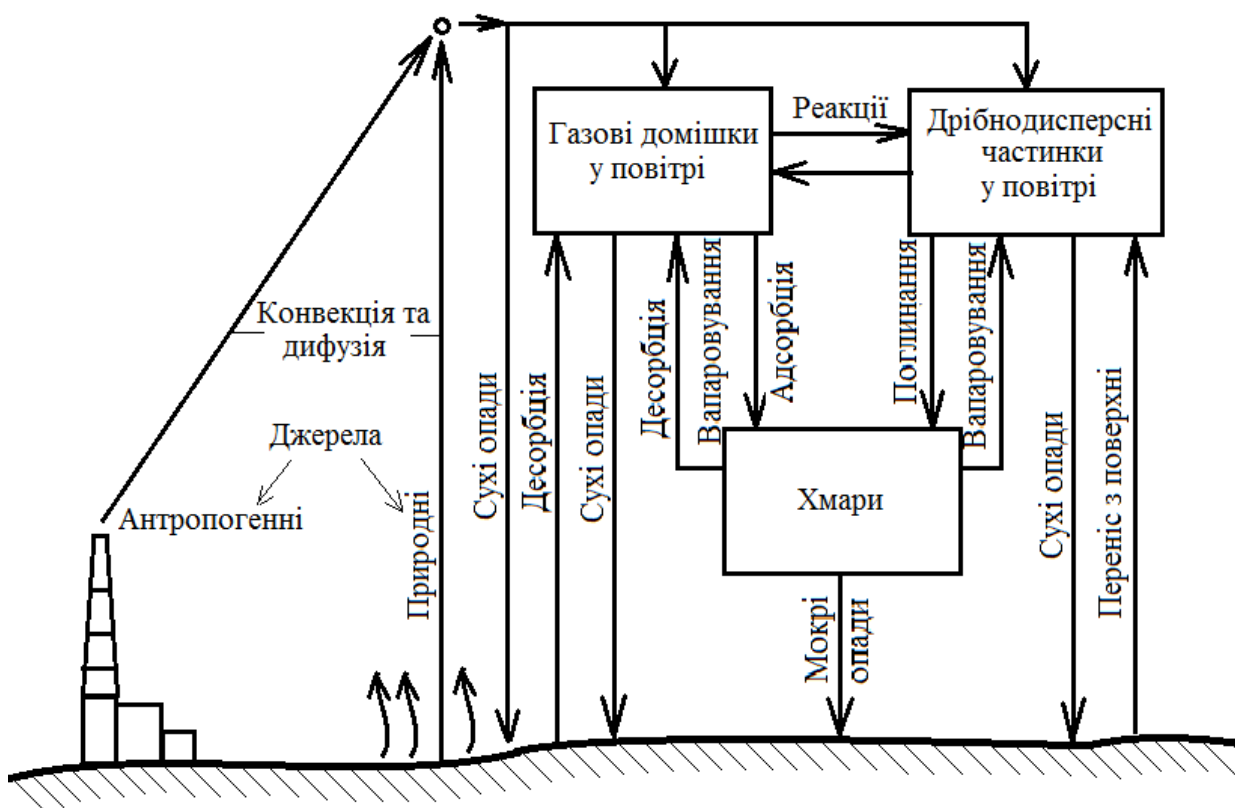


Рис. 2.3. Схема процесів надходження реагентів в атмосферу та трансформації вихідних речовин у продукти перетворення з наступним випадінням у вигляді опадів [11]

Атмосферу можна розглядати як величезну окисну систему з високим вмістом основного окислювача – кисню. Сполуки, що містять атоми С, Н, S та N природного та антропогенного походження, потрапляючи в атмосферу, перетворюються в стабільні довгоіснуючі сполуки (наприклад, CO_2) або в короткоіснуючі сполуки кислотного характеру (оксиди азоту та сірки), які беруть участь у рідиннофазних процесах з утворенням кислот, що видаляють із атмосфери з опадами [330].

Органічний аерозоль, на відміну від мінерального, утворюється над територією з потужним рослинним покривом. Характерною рисою таких аерозолів є їхня сезонність утворення.

Однак всі розглянуті вище типи аерозолів утворюються поступово з низькою інтенсивністю (за винятком пилових та піщаних бур, які не характерні для території України) та повітряними потоками розподіляються по об'єму нижньої атмосфери. У зв'язку із цим їхня концентрація вкрай рідко перевищує припустимі норми. Зворотна ситуація є характерною для термічного аерозолію. Для таких аерозолів характерні більш низькі значення гранично допустимих концентрацій (ГДК) та критичні викиди в момент виникнення надзвичайних ситуацій – виверження вулканів, великі природні та техногенні пожежі й вибухи на об'єктах атомної енергетики.

Крім значного негативного впливу на атмосферу різних галузей промисловості за умов нормального режиму роботи, різкими сплесками забруднень є аварії на підприємствах з великим вмістом небезпечних хімічних речовин. Такі аварії характеризуються значною зоною забруднення та технічними труднощами локалізації наслідків аварії. Рух атмосферних повітряних мас призводить до поширення газоподібних та аерозольних небезпечних речовин на великі відстані. Також необхідно відзначити, що, незважаючи на значну молярну масу ряду небезпечних речовин відносно повітря, вони можуть підніматися у верхні шари тропосфери за рахунок потужних конвективних потоків. Розмір зони забруднення та тривалість існування небезпечної речовини в атмосфері залежать від метеорологічних умов та фізико-хімічних властивостей конкретної небезпечної речовини. Усього в зону можливого хімічного зараження може потрапити велика кількість населення держави. Всі ці фактори підтверджують необхідність розробки способів та методів мінімізації негативної дії при аваріях на хімічно небезпечних об'єктах. Однак для розробки ефективних способів та методів ліквідації наслідків таких аварій необхідно чітко визначитись з об'єктом негативного впливу на атмосферу.

При розгляді складу атмосфери необхідно відзначити, що кількісний та якісний склад небезпечних речовин істотно відрізняється у різних регіонах, тому для оцінки безпеки доцільно розглянути не середнє

значення, а максимальний вміст компонента, зареєстрованого в атмосфері над територією України.

Ступінь небезпеки будь-якої речовини характеризується співвідношенням концентрації речовини в одиниці об'єму атмосфери до гранично допустимого значення концентрації даної речовини. Крім цього, агрегатний стан небезпечних хімічних речовин (НХР) істотно впливає на його стійкість в атмосфері, тому під час аналізу всі речовини розділено на групи за своїм агрегатним станом в початковий період потрапляння в атмосферу.

На основі хімічного аналізу нижньої тропосфери [22, 23, 48] визначимо найнебезпечніші речовини, які містяться в повітрі (табл. 2.1). Як видно з таблиці, навіть у нормальних умовах нас оточує досить великий спектр хімічних речовин із небезпечними для здоров'я концентраціями.

Таблиця 2.1

Основні забруднюючі газоподібні речовини, що містяться в атмосфері за нормальних умов

Небезпечна речовина	Максимальне значення над територією України, мг/м ³	Середньодобова ГДК [48], мг/м ³
Гази		
Діоксид азоту (NO ₂)	0,172	0,04
Формальдегід (HCHO)	0,0138	0,003
Діоксид сірки (SO ₂)	0,18	0,05
Оксид азоту (NO)	0,12	0,06
Оксид вуглецю (CO)	3,6	3
Дигідросульфід (H ₂ S)	0,0224	0,008
Рідкі аерозолі		
Сірчана кислота (H ₂ SO ₄)	0,18	0,1
Анілін (C ₆ H ₅ NH ₂)	0,045	0,02
Тверді аерозолі		
Ґрунтовий пил	5,2	0,1–2
Морська сіль	2,4	3–4
Зола	1,7	0,01–0,05

До таблиці 2.1 включено такі речовини як сірчана кислота та анілін, які в атмосфері можуть зустрічатися як у газоподібному, так і рідкому стані. Найчастіше в атмосферу вони потрапляють у газовій фазі у вигляді випарів, тому на початковому етапі їх можна розглядати як газоподібні, однак в умовах атмосфери такі речовини швидко конденсуються та гідролізуються і тому в основному в атмосфері перебувають у вигляді рідких аерозолів водяних розчинів. Атмосферні тверді аерозолі мають складну фізико-хімічну структуру. В табл. 2.1 основні тверді аерозолі розбито на групи. Усередині групи тверді аерозолі мають різний хімічний склад, як за об'ємом аерозолі, так й в одиничній твердій частинці, тому значення середньодобової ГДК наведені в діапазоні, залежно від хімічного складу аерозолі.

Найбільше перевищення ГДК у повітрі відноситься до сажі, однак дані значення взяті поблизу точкових джерел – викиди теплоелектростанцій, металургійних підприємств та ін. Серед газоподібних речовин значні перевищення ГДК відзначені щодо діоксиду азоту та формальдегіду, основними джерелами яких є автотранспорт, металургійні та хімічні підприємства. Максимальний вміст діоксиду азоту та формальдегіду зареєстровано в західному та південному регіонах країни. І хоча середній вміст вказаних небезпечних речовин в атмосфері значно нижче максимальних значень, однак їхній найбільший вміст реєструється саме в густонаселеній міській місцевості [23], що призводить до підвищення небезпеки для населення України. Всі розглянуті небезпечні речовини є нестійкими в атмосфері та з різною інтенсивністю змінюють свій агрегатний стан, взаємодіють між собою та з іншими компонентами атмосфери.

Крім того, при виникненні аварій на підприємствах зі значним вмістом НХР у зоні викиду відбувається різкий сплеск концентрації тієї або іншої речовини. Отже, крім розгляду складу нормальної атмосфери, особливу увагу необхідно приділити можливим аваріям на таких об'єктах. Техногенні аварії з викидом в атмосферу НХР прийнято розділяти на два класи. Перший клас – це розгерметизація ємностей, у яких зберігаються або обертаються

гази під тиском, без наступного горіння. До другого класу відносяться техногенні аварії, що супроводжуються масштабними пожежами. Нижче розглянемо можливі викиди НХР при різних техногенних аваріях.

На території України розміщено 1823 підприємства, на яких обертаються хімічно небезпечні речовини [26] (табл. 2.2), у разі виникнення аварій на яких може статися викид небезпечних хімічних речовин. Загальна кількість НХР на цих підприємствах – більше 283 тис. тонн, більшу частину з яких становлять аміак та сірчана кислота.

Розділяти речовини в таблиці 2.2 за агрегатним станом за нормальних умов недоцільно, тому що більшість речовин зберігається у зрідженому стані, або у вигляді розчинів. У таблиці 2.2 розглянуто тільки НХР, запаси яких в Україні становлять більше тисячі тонн, серед яких особливо небезпечними речовинами є синильна кислота (~200 т), фосген (~150 т), фтороводень (~180 т), для яких значення ГДК менше $0,01 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Таблиця 2.2

Запаси небезпечних хімічних речовин на підприємствах України

Небезпечна речовина	Кількість на території України, тис. т	Середньодобова ГДК [48], $\text{мг}/\text{м}^3$
Аміак (NH_3)	178,4	0,04
Сірчана кислота (H_2SO_4)	43,7	0,1
Азотна кислота (HNO_3)	16,3	0,15
Фосфор (білий, жовтий, червоний, чорний)	12,4	0,03–0,05
Хлор (Cl_2)	9,8	0,03
Хлористий водень (HCl)	5,3	0,2
Ацетон	3,5	0,04
Дигідросульфід (H_2S)	2,2	0,008

Запаси таких високонебезпечних речовин, як аміак, фосфор та хлор є досить великими на об'єктах України. Крім того, аміак та хлор за нормальних умов перебувають у газоподібному стані та легко поширюються в атмосфері. Значна кількість аміаку зумовлена проходженням по території

України Міжнародного аміакопроводу Тольятті–Одеса та наявністю великих підприємств хімічної промисловості в Донецькій, Луганській, Черкаській та Одеській областях. Велика кількість хлору пов'язана з наявністю в кожній адміністративно-територіальній одиниці водоочисних споруджень. Аналіз показує, що з речовин, представлених у табл. 2.2, у випадку аварійної розгерметизації технологічних апаратів в атмосферу будуть активно викидатися газоподібні речовини – аміак, хлор, хлористий водень та дигідросульфід. Сірчана та азотна кислоти, а також ацетон є легкокиплячими рідинами, тому у разі викиду з технологічного апарата вони можуть активно випаровуватися. Однак інтенсивність надходження пари цих речовин в атмосферу істотно нижче надходження в атмосферу газів, отже зона можливого хімічного зараження буде незначною.

У випадку розгерметизації технологічних апаратів з викидом фосфору він активно взаємодіє з киснем повітря, що призводить до загоряння, тому такі аварії вже відносяться до іншого класу.

Відповідно найбільшу небезпеку при техногенних аваріях без загоряння становлять аміак, хлор або сірководень.

Необхідно відзначити, що у процесі аналізу не розглядалися нафта та нафтопродукти, які за класифікацією не відносяться до НХР, однак такі речовини є горючими та легкозаймистими рідинами, які під час горіння виділяють в атмосферу ряд небезпечних речовин. З огляду на те, що на території України обертається близько 50 млн тонн нафти та нафтопродуктів, це джерело небезпечних речовин в атмосферу необхідно враховувати.

Окремим класом небезпечних хімічних речовин є продукти горіння. Склад продуктів горіння істотно залежить від природи горючого матеріалу, які можна розділити на:

- целюлозовмісні горючі матеріали – деревина, папір та ін.;
- нафтопродукти;
- штучні полімери – гума, пластмаси та ін.;

- хімічно небезпечні речовини – фосфор, кислоти та ін.

У таблиці 2.3 приведено масовий склад основних продуктів горіння матеріалів різної природи. Хімічний та масовий склад продуктів горіння залежить від умов горіння та конкретного виду горючого матеріалу, тому нижче наведено максимально можливі значення масового складу продуктів горіння.

Таблиця 2.3

Газоподібні продукти горіння основних класів горючих матеріалів

Небезпечна речовина	Питома маса продуктів горіння, кг/кг	Середньодобова ГДК [48], мг/м ³
1	2	3
Целюлозовмісні горючі матеріали		
Діоксид вуглецю (CO ₂)	1,85	–
Оксид вуглецю (CO)	0,45	3
Вуглеводні (C _x H _y)	0,012	0,3–1
Сажа (C)	0,8	0,05
Зола (100 %) – CaO (до 40 %) – SiO ₂ (до 32 %) – Fe _x O _y (до 20 %) – Al ₂ O ₃ (до 8 %) – MgO (до 3 %) – Na ₂ O (до 2 %) – Оксиди титану, марганцю, фосфору та ін. (до 1 %)	0,4	0,02
Нафтопродукти		
Діоксид вуглецю (CO ₂)	2,8	–
Оксид вуглецю (CO)	0,83	3
Діоксид азоту (NO ₂)	0,055	0,04
Оксид азоту (NO)	0,038	0,06
Дигідросульфід (H ₂ S)	0,0027	0,008
Оксиди сірки (SO _x)	0,038	0,05–0,1
Тетраетилсвинець (Pb(C ₂ H ₅) ₄)	0,0005	0,005
Синильна кислота (HCN)	0,0027	0,01
Формальдегід (HCHO)	0,0022	0,003
Органічні кислоти (R-COOH)	0,035	0,02–0,14
Сажа (C)	0,07	0,05
Зола (100 %) – V _x O _y (до 25 %)	0,05	0,02

Продовження таблиці 2.3		
1	2	3
– NiO (до 8 %) – Te _x O _y (до 5 %) – Оксиди свинцю, хрому, цинку та ін. (до 1 %)		
Штучні полімери		
Оксиди сірки (SO _x)	0,38	0,05–0,1
Синильна кислота (HCN)	0,002	0,01
Фосген (COCl ₂)	0,25	0,003
Хлор (Cl ₂)	0,13	0,04
Галогенводні (HF, HCl, HI, HBr)	0,083	0,005–0,2
Сажа (C)	0,5	0,05
Зола (100 %)	0,3	0,02
- CaO (до 32 %) – SiO ₂ (до 14 %) – Fe _x O _y (до 8 %) – V _x O _y (до 7 %) – Al ₂ O ₃ (до 4 %) – MgO (до 2 %) – TiO ₂ (до 2 %) – NiO (до 2 %) – Оксиди свинцю, хрому, цинку та ін. (до 1 %)		
Хімічно небезпечні речовини		
Оксиди сірки (SO _x)	2,5	0,05–0,1
Фосген (COCl ₂)	0,4	0,003
Синильна кислота (HCN)	0,7	0,01
Галогенводні (HF, HCl, HI, HBr)	1,5	0,005–0,2
Оксиди фосфору (P _x O _y)	3,1	0,03–0,08

Під час горіння багатьох штучних полімерів утворюються оксиди хлору, однак такі оксиди вкрай не стійкі в атмосфері та практично відразу, взаємодіючи з компонентами повітря, утворюють хлор, фосген та рідкі кислоти. У випадку горіння целюлозовмісних матеріалів, штучних полімерів та нафтопродуктів основну масу продуктів горіння становлять тверді нелеткі залишки та аерозолі, які можна виділити в окрему групу небезпечних речовин з особливими фізико-хімічними властивостями. При зіставленні хімічного складу золи різних матеріалів можна виділити їхню загальну структуру – сплав оксидів лужних та лужноземельних металів.

При аналізі також слід вказати на наявність у продуктах горіння сполук I групи небезпеки – тетраетилсвинцю, що додають як присадки у світлі нафтопродукти та є однією з основних загроз від вихлопних газів автомобілів.

З таблиці видно, що найбільшу небезпеку становить горіння ХНР, у процесі горіння 1 кг яких може виділятися більше 3 кг оксидів фосфору, до 2,5 кг оксидів сірки та близько 1 кг сполук хлору. При цьому під час горіння фосфору основним компонентом продуктів горіння є аерозоль твердих часток оксидів фосфору. Однак при роботі з такими речовинами розроблені ефективні заходи безпеки, тому пожежі даного класу становлять незначну частку загальних пожеж в Україні та характеризуються невеликими розмірами.

Особливу увагу необхідно приділити процесам горіння нафтопродуктів та целюлозовмісних матеріалів, які за абсолютною кількістю хімічно небезпечних викидів в атмосферу значно перевищують інші типи пожеж. Крім того, горіння целюлозовмісних матеріалів (вугілля, торф) та різних нафтопродуктів широко використовується в технологічних процесах та на транспорті, що додатково збільшує кількість викидів негативних газоподібних продуктів горіння. Однак з 60-70 % пожеж із горінням целюлозовмісних матеріалів лише близько 5 % відносяться до техногенних аварій, а основну їхню частину становлять пожежі житлового сектору та аварії природного характеру.

Деякі основні наукові досягнення в галузі фізико-хімії атмосферних дисперсних систем розглянуті А.Е. Алоян у роботі [292]. Однак у разі виникнення техногенних аварій (з виникненням пожежі та без) в атмосферу викидається велика кількість аміаку, хлору, сірководню, галогенводнів, сажі, золи та ще ряду особливо небезпечних речовин [331]. Процеси очищення атмосфери від забруднюючих аерозолів досить добре розглянуті в роботах [12, 21], однак особливості фізико-хімічного осадження забруднюючих газів, що викидаються в атмосферу при аваріях, залишаються практично не

розглянутими. Тим часом кожна хімічна речовина має свої особливості, свою специфіку абсорбції та адсорбції з компонентами навколишнього середовища, яку необхідно враховувати при визначенні ступеня ефективності очищення атмосфери від небезпечних хімічних речовин опадами.

Таким чином, особливістю надзвичайних ситуацій техногенного характеру є те, що в зоні ураження наявні такі небезпечні хімічні речовини, як аміак, хлор або сірководень, що потрапляють в атмосферу при аваріях із розгерметизацією технологічного устаткування без виникнення пожежі. У випадку виникнення пожеж на промислових об'єктах особливу небезпеку становлять оксиди вуглецю, азоту та сірки, галогенводні, особливо небезпечні – синильна кислота, фосген та оксиди фосфору. Окрему групу небезпечних викидів при пожежах становлять тверді аерозолі сажі та золи, які за масою є основними компонентами продуктів горіння багатьох речовин.

2.3. Встановлення особливостей радіоактивних викидів в атмосферне повітря при надзвичайних ситуаціях в атомно-промисловому комплексі України

Випадання над зоною аварії атмосферних опадів дозволяє істотно знизити розміри області забруднення та загальний радіаційний фон. Це відбувається за рахунок сорбції радіонуклідів краплями води. Інтенсивність процесу сорбції радіонуклідів, а відповідно, й інтенсивність очищення атмосфери від радіонуклідів залежать від агрегатного стану радіонукліда, його дисперсності, а також фізико-хімічних властивостей радіоактивної частки [204-206].

Газоподібні та дисперсні радіонукліди при потраплянні в зону утворення опадів впливають на процес росту краплі опадів, на динаміку розвитку хмари та інтенсивність опадів. Тому розгляд закономірностей впливу опадів над зоною радіоактивного забруднення на інтенсивність очищення атмосфери від радіонуклідів є важливим завданням.

При розгерметизації активної зони в атмосферу викидається велика кількість радіоактивних газів та твердих часток (аерозолів). Викинуті радіоактивні речовини повітряними потоками піднімаються у верхні шари тропосфери та поширюються на великі відстані. Розміри зони забруднення залежать від:

- характеру аварії (потужність вибуху, кількість викинутої радіоактивної речовини, тривалість аварії);
- фізико-хімічних властивостей радіоактивних речовин (вид радіонукліда, маса, щільність, гідрофобність часток);
- метеорологічних умов (швидкість та напрямок вітру, вологість, наявність опадів).

Велика кількість факторів обумовлює складну форму зони забруднення.

Внаслідок аварії на Чорнобильській атомній станції зона радіоактивного забруднення склала більше 142 000 км² (рис. 2.4, табл. 2.4), а внаслідок аварії у Фукусімі зона радіоактивного забруднення значно менше (~ 7 000 км²) (рис. 2.5).

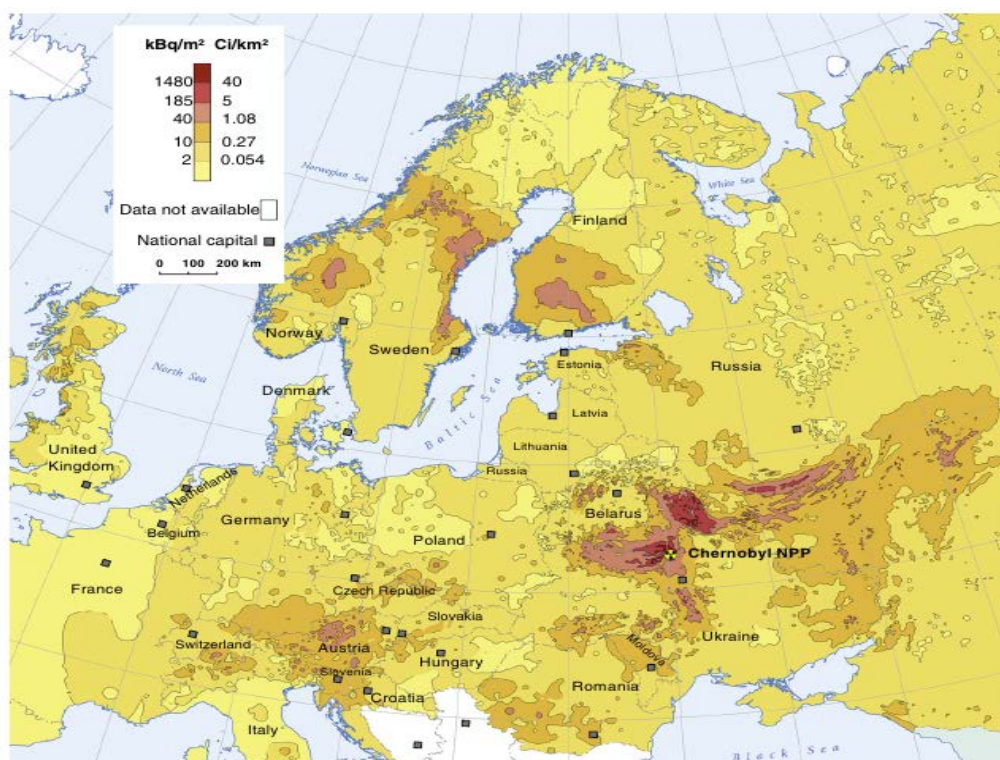


Рис. 2.4. Поверхневі забруднення ¹³⁷Cs у Європі після аварії на Чорнобильській АЕС [83]

Таблиця 2.4

Радіоактивне забруднення території в європейських країнах [84]

Країни	Площа зони забруднення (км ²)			
	Зона 4 (37–185 kBq/m ²)	Зона 3 (185–555 kBq/m ²)	Зона 2 (555–1480 kBq/m ²)	Зона 1 (> 1480 kBq/m ²)
Російська Федерація	49,800	5700	2100	300
Україна	37,200	3200	900	600
Білорусь	29,900	10,200	4200	2200
Швеція	12,000			
Фінляндія	11,500			
Австрія	8600			
Норвегія	5200			
Болгарія	4800			

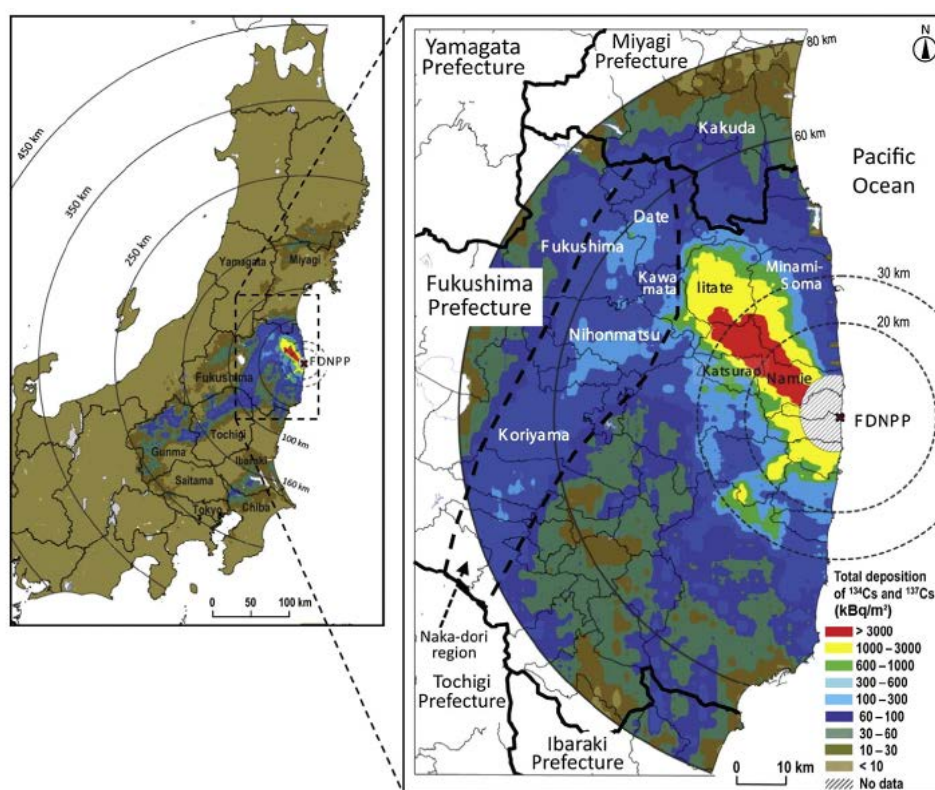


Рис. 2.5. Оціночне сумарне випадіння радіоізоотопів після ядерної аварії у Фукусімі, приблизно половина з яких ¹³⁷Cs [85]

На рис. 2.4 та 2.5 представлено зони забруднення тільки для ізоотопу ¹³⁷Cs, однак навіть ці дані показують більші розміри зони забруднення та, відповідно, великий негативний вплив на екосистему регіону та планети в цілому.

Таблиця 2.5

Порівняльний аналіз радіонуклідів, що потрапили в атмосферу внаслідок аварій на Чорнобильській АЕС та АЕС у Фукусімі [86]

Радіонуклід	T _{1/2}	Активність (PBq)	
		Чорнобильська аварія	Аварія у Фукусімі
Інертні гази			
⁸⁵ Kr	10.75 y	33 [87]	44 □[94]
¹³³ Xe	5.25 d	6500 [87]	14,000 [95], 15,300 [81]
Леткі елементи			
³ H	12.3 y	1.4 (inventory) [88]	
^{129m} Te	33.6 d	240 [87]	~15 [86]
¹³² Te	3.20 d	~1150 [90], 1000 [87]	~180 [86], 88 [96]
¹²⁹ I	15.7E6 y	(4 –4.8)×10 ⁻⁵ [89, 91], 8.4 × 10 ⁻⁶ [92]	5.5 × 10 ⁻⁵ [97], 6.6 × 10 ⁻⁶ [86]
¹³¹ I	8.03 d	~1760 [90], 1200-1700 [87]	150 [98], 130-160 [99], 190-380 [92], 65.2 [100], 200 [101]
¹³³ I	20.8 h	910 [83], 2500 [87]	146 [86]
¹³⁴ Cs	2.07 y	~47 [87, 90]	11.8 [86], 18 [89]
¹³⁶ Cs	13.0 d	36 [87]	2.6 [87]
¹³⁷ Cs	30.1 d	85 [90], 74-85 [87], 98 [93]	12 [98], 13 [103], 6.1-15 [99], 17 [100], 62.5 [81]
Елементи із проміжною летючістю			
⁸⁹ Sr	50.5 d	~115 [90], 81 [87]	~0.2 [86]
⁹⁰ Sr	28.9 y	~10 [90], 4 [91]	~0.02 [86]
¹⁰³ Ru	39.2 d	> 168 [90], 170 [87]	
¹⁰⁶ Ru	372 d	> 73 [90], 30 [87]	
¹⁴⁰ Ba	12.8 d	240 [90], 170 [87]	
Тугоплавкі елементи			
⁹⁵ Zr	64.0 d	84 [90], 87 [91], 170 [87]	
⁹⁹ Mo	66.0 h	> 72 [90], 210 [87]	
¹²⁵ Sb	2.76 y	0.23 [91]	
¹⁴¹ Ce	32.5 d	84 [90], 200 [87]	
¹⁴⁴ Ce	285 d	~50 [90], 140 [87]	
¹⁵⁴ Eu	8.60 y	0.13 [91]	
²³⁹ Np	2.36 d	400 [90], 1700 [87]	
²³⁸ Pu	87.7 y	0. 015 [90], 0.03 [87]	(2-5)×10 ⁻⁶ [87]
²³⁹ Pu	24,100 y	0. 013 [90, 91]	
²⁴⁰ Pu	6560 y	0. 018 [90, 91]	
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu		0. 031 [90]	(1. 0-2.1) ×10 ⁻⁶ [102]
²⁴¹ Pu	14.3y	~2.6 [90]	(1. 0-2.1) ×10 ⁻⁴ [102]
²⁴² Pu	3.76E5 y	4 × 10 ⁻⁵ [90]	
²⁴¹ Am	433 y	0. 0024 [91]	
²⁴² Cm	163 d	~0.4 [90]	
²⁴⁴ Cm	18.1 y	0. 0027 [75]	
Σ (за винятком інертних газів)		~5300 [75]	~520 (340-800) [86]

Як видно з табл. 2.5, хімічний та кількісний склад радіонуклідів, викинутих в атмосферу при Чорнобильській АЕС та АЕС у Фукусімі, є різним. У першу чергу це пов'язано з різними типами ядерних реакторів, характером руйнування та складом ядерного палива.

Подані в таблиці дані щодо викинутих в атмосферу радіонуклідів є актуальним тільки в перші кілька годин після аварії, тому що більша частина ^{133}I протягом першої доби розпадається.

Оскільки викид ^{133}I при аварії на Чорнобильській АЕС був значним, то в першу добу після аварії кількість ^{133}Xe значно збільшується. Виходячи із цього та даних табл. 2.5, викиди ксенону є істотними та за рахунок газоподібного стану можуть поширюватися на великі відстані. Однак значна частина радіонуклідів перебуває у твердому стані у вигляді мікрочастинок аерозолі. Тому в плані дослідження динаміки очищення атмосфери від радіоактивних речовин доцільно розглядати не властивості окремих радіонуклідів, а властивості твердих мікрочастинок аерозолі, що містять радіонукліди.

Гарячі частки являють собою вкраплення часток паливних елементів UO_2 в оболонці вищих оксидів урану та цирконію – U_xO_y , ZrU_xO_y (рис. 2.6, 2.7). Наявність високостабільної оболонки ZrU_xO_y призводить до збільшення хімічної інертності «гарячих часток» в атмосфері, ґрунті та водоймах, у результаті чого «гарячі частки» перебувають практично в незмінному стані з моменту їхнього утворення протягом практично 30 років після аварії.

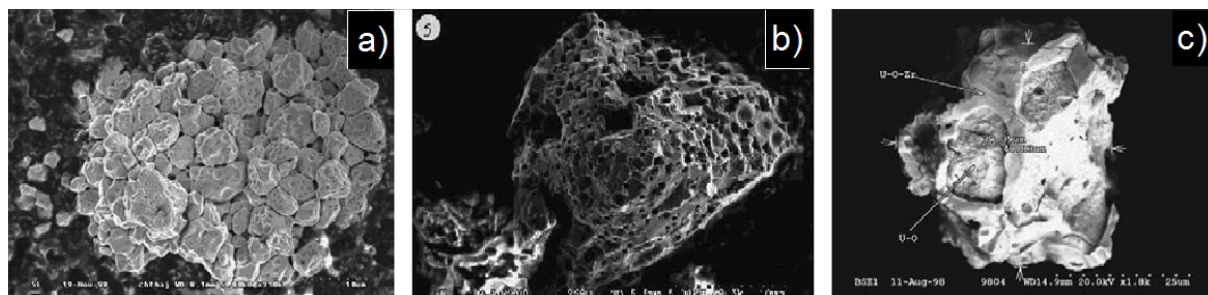


Рис. 2.6. Мікрофотографії паливних часток: (а) UO_2 паливні частки; (б) UO_{2+x} паливні частки; (с) ZrU_yO_x паливні частки [103]

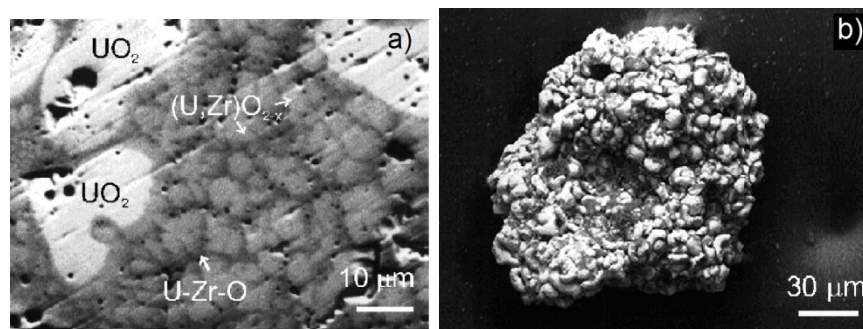
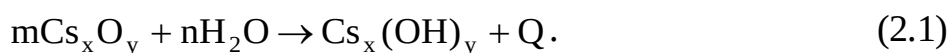


Рис. 2.7. Мікрофотографії зразків, що містять вкраплення Zr-U у частках викиду при аварії на Чорнобильській АЕС: (а) паливна частка в розрізі; (б) зовнішній вигляд паливної частки [113]

Такі радіонукліди, як ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{99}Mo , $^{141,144}\text{Ce}$, $^{154,155}\text{Eu}$, $^{137,139}\text{Np}$, $^{238-242}\text{Pu}$, $^{241,243}\text{Am}$, $^{242,244}\text{Cm}$ були викинуті з аварійного блоку тільки в складі паливних часток. Більше 90 % витоку активності $^{89,90}\text{Sr}$ та $^{103,106}\text{Ru}$ також припало на паливні частки [105]. Дисперсний склад паливних часток у первісних радіоактивних опадах на віддаленні 2–60 км від ЧАЕС описується логнормальним законом розподілу з медіанним радіусом паливних часток близько 3 мкм [106]. На основі численних результатів досліджень властивостей «гарячих часток» створено the “Hot particles” базу даних [332].

Крім того, внаслідок пожежі при Чорнобильській аварії та за високої температури при аварії у Фукусімі в атмосферу викидалися пари легколетких високорухливих продуктів розпаду (радіоізотопів йоду, телуру, цезію та, у значно меншій мірі, стронцію та рутенію), які згодом в атмосфері осідають на різних поверхнях (мікрочастинки води, органічні та неорганічні пили, дим) [104, 114]. Однак з хімічної точки зору, якщо йод випаровується у вигляді молекул I_2 та погано реагує з киснем атмосфери, то такі метали як телур та цезій дуже активно окислюються і в атмосферу викидаються вже у вигляді оксидів – TeO_x , CsO_2 . Також при контакті з парами атмосферної води може утворюватися $\text{Cs}_x(\text{OH})_y$ за схемою:



Для Чорнобильської аварії є характерним викид великої кількості радіоактивного графіту. У процесі експлуатації ядерного реактора в результаті реакцій нейтронів із домішкою ізотопу ^{13}C , наявного у графіті в кількості 1,1 %, в останньому накопичується радіонуклід ^{14}C :



Цей радіонуклід відноситься до малорадіотоксичних, та його допустима концентрація в повітрі становить $5 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$. Основні ядерно-фізичні властивості ^{14}C наведені в табл. 2.6 [333].

Таблиця 2.6

Основні ядерно-фізичні властивості ^{14}C

Нуклід	Період напіврозпаду	Випромінювання	Продукт розпаду	Активність
^{14}C	5730 років	β^- (100%)	^{14}N (стабільний)	$1.65 \cdot 10^{14} \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$

Ступінь накопичення ^{14}C у графіті залежить від часу експлуатації реактора. Для графіту 4-го енергоблоку Чорнобильської АЕС питома активність графіту по радіонукліді ^{14}C становила $10^7 - 10^8 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$. Враховуючи те, що при Чорнобильській аварії в навколишнє середовище було викинуто більше 800 тонн радіоактивного графіту, цей фактор являє собою більшу загрозу екологічній безпеці регіону. При цьому частина графіту у вигляді дрібнодисперсного аерозолі потрапила в атмосферу та повітряними потоками поширилася на велику територію. Частки графіту як високопористої речовини у своїй структурі можуть містити й мікрочастинки широкого спектру радіонуклідів. Тому під радіоактивним графітом слід розуміти графітовий каркас із вкрапленнями радіоактивних речовин, їх оксидів та їх оксидних комплексів.

Таким чином, у разі виникнення аварій на об'єктах атомної промисловості як продукти осадження атмосферними опадами необхідно

розглядати: газоподібний інертний газ ксенон; хімічно інертні «гарячі частки»; мікрочастинки органічного та неорганічного пилу з конденсованою на поверхні парою радіоактивних речовин; рідкі мікрокраплі, що містять сконденсовані радіоактивні речовини; мікрочастинки радіоактивного графіту.

2.4. Особливості ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій з викидом в атмосферу небезпечних хімічних та радіоактивних речовин шляхом штучного ініціювання опадів

Існуюче протиріччя, яке потребує розв'язання, полягає у наступному: при виникненні НС природного та техногенного характеру небезпечні викиди в атмосферне повітря конвективними потоками поширюється на висотах до 1 км, при цьому існуючі методи та способи мінімізації наслідків НС для атмосферного повітря здатні впливати на зону ураження на висотах до 20 м. Відповідно існує суттєве протиріччя між зоною ураження атмосферного повітря та зоною активної мінімізації наслідків НС для атмосферного повітря. Для вирішення поставлених задач необхідно розробити фізичну модель процесу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій для атмосфери методами штучного опадотворення. Розроблений метод оснований на принципах сорбції падаючими краплями атмосферних опадів забруднюючих хімічних та радіоактивних речовин у газоподібному, рідкому та твердому аерозольних станах. При цьому нижня частина атмосфери, висотою до 5 км, розбивається на дві умовні зони (рис. 2.8) [334].

До першої зони відноситься безпосередньо зона ураження атмосферного повітря від НС. Границі зони ураження визначаються границями перевищення гранично допустимих концентрацій для хімічно небезпечних речовин та санітарними нормами експозиційної дози для радіоактивного забруднення.

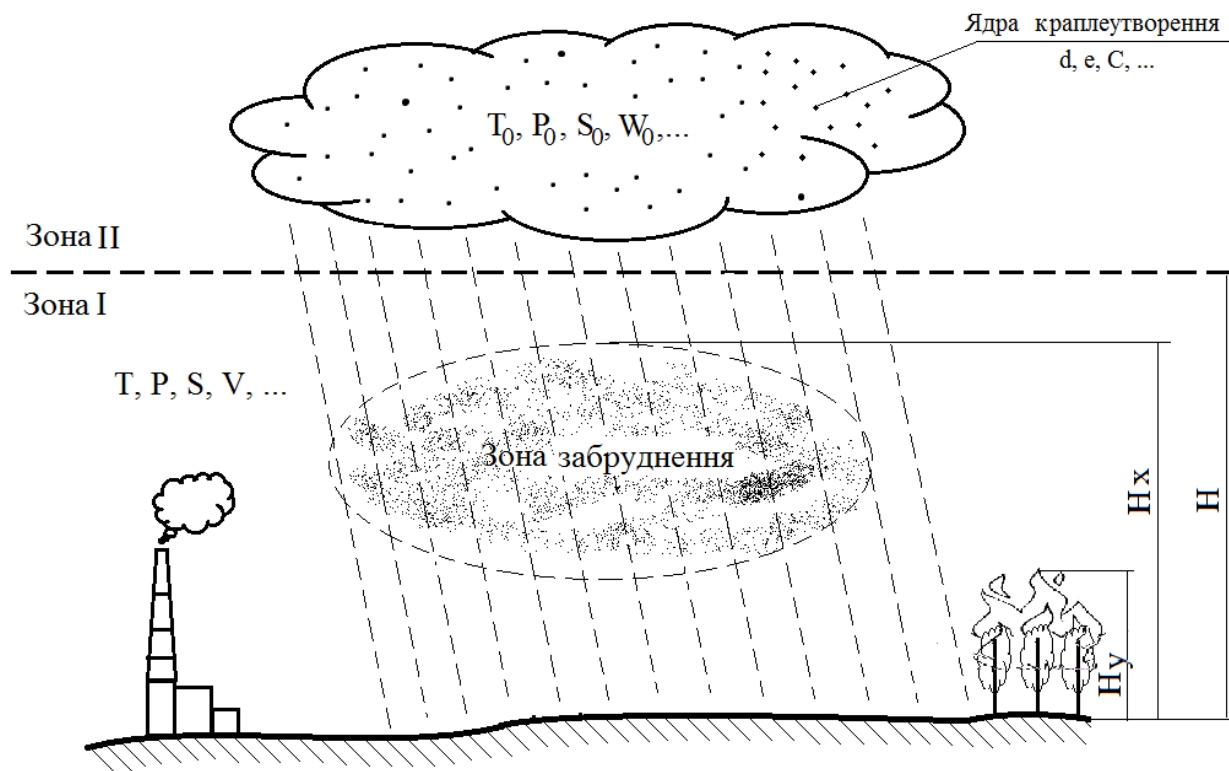


Рис. 2.8. Загальна схема методів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій для атмосферного повітря шляхом штучного ініціювання опадів

При НС техногенного характеру в атмосфері утворюється хмара хімічного або радіаційного ураження, яка інтенсивно збільшується до локалізації джерела викиду. При виникненні масштабних природних пожеж в атмосферу викидається значна кількість газоподібних та аерозольних продуктів горіння. Інтенсивність викиду залежить від інтенсивності та площі горіння. Суттєвим фактором при осадженні забруднюючих речовин є їх фізичні та хімічні властивості, які проаналізовані нижче.

За рахунок горизонтальних та вертикальних атмосферних потоків зона ураження швидко поширюється, що обумовлює необхідність оперативного прогнозування зони ураження залежно від швидкості та напрямку вітру. За площею I зона співпадає з дійсною та прогнозованою зонами ураження та по висоті поширюється від поверхні землі до нижньої границі хмарності. В I зоні можуть знаходитись хмари хімічного та радіаційного зараження та територія природної пожежі як потужне джерело викиду в атмосферу

небезпечних речовин. При прольоті крізь зону I краплі опадів різної інтенсивності частково або повністю випаровуються; сорбують небезпечні речовини, осаджуючи їх на поверхню ґрунту; збільшують вологість повітря та горючої речовини, знижуючи інтенсивність пожежі.

Другою зоною є зона хмарності від нижньої до верхньої границі хмар, потенційно придатних до опадоутворення. Залежно від метеорологічних умов висоти верхньої та нижньої границь II зони можуть змінюватись. В цій зоні відбувається безпосередньо процес опадоутворення, на який впливають метеорологічні умови (тиск P_0 , температура T_0 , вологість S_0 , та вологозапас хмари W_0 та ін.) та властивості природних або штучних ядер краплеутворення (дисперсність d , концентрація C , електричний заряд e та ін.). Однак не всі види хмар мають потенціал опадоутворення при штучному впливі на них. Оцінка опадоутворювального потенціалу потребує більш детального розгляду.

Хмари в основному перебувають у нижніх шарах атмосфери – тропосфері. Залежно від температури хмари можуть складатися як винятково із крапель або кристалів льоду, так мати й змішаний склад. Так, за температур повітря в зоні хмароутворення вище $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ хмари в основному складаються з рідких крапель, за температур нижче $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ – переважно із кристалів льоду. У діапазоні температур від $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ спостерігаються змішані хмари [290].

Розмір дисперсних часток у хмарах також може перебувати в широкому діапазоні. Для висотних крижаних хмар розмір часток становить до 10 мкм. Розмір рідких крапель у більшості хмар перебуває в діапазоні від 4 до 25 мкм. У дощових хмарах розмір краплі дещо вище й може досягати 1 мм [335].

Відповідно до міжнародної класифікації [336] хмари можна розділити на класи, представлені у табл. 2.7.

При розгляді питання штучного ініціювання опадів важливими характеристиками хмар є їх водність та вологозапас. Водність хмари

визначається вмістом рідиннокрапельної або кристалічної води в ньому. Водність більшості хмар становить порядку $\sim 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$. Водність зливових хмар може досягати $\sim 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ [336]. Однак вміст води у сконденсованому стані завжди набагато менший, ніж пароподібної.

Вологозапас хмари – це сумарний вміст води в будь-якому агрегатному стані в хмарі, що для шарувато-купчастих хмар становить до $10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, а для шарувато-дощових досягає $1 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Визначення водності та вологозапасу хмари здійснюється за допомогою наземних та повітряних засобів моніторингу. До наземних відносяться автоматичні та керовані метеорологічні радіолокаційні комплекси, які працюють за принципом опромінення досліджуваної зони електромагнітним випромінюванням та прийомом відбитого сигналу.

Однак при використанні таких систем для визначення характеристик дощових хмар стикаються із проблемою високої похибки, що пов'язано зі слабкою проникаючою здатністю електромагнітних хвиль по всьому об'єму хмари, насиченої рідкими краплями або кристалами.

Більш точні дані можуть бути отримані при використанні пілотованих та безпілотних літальних апаратів, які проводять моніторинг характеристик хмари методом відбору проб у конкретній зоні. Атмосферні опади підрозділяються залежно від їхньої інтенсивності та агрегатного стану на зливі дощі, дощі, мряку, сніг, крупу, град.

Краплі дощу мають у діаметрі від 0,5 до 5 мм. Краплі з більшими розмірами при падінні розпадаються на більш дрібні за рахунок опору повітря. Краплі мряки характеризуються розмірами в діапазоні 0,05–0,5 мм. Природно опади відрізняються швидкістю падіння краплі, відповідно до їхнього розміру.

Опади характеризуються кількістю (у міліметрах) того шару, що вони утворили б на землі за умови відсутності випаровування. Однак у практиці штучного ініціювання опадів більш актуальним є визначення інтенсивності опадів ($\text{мм} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$).

Таблиця 2.7

Класифікація хмар

Рід	Вид	Різновид	Висота	Умови утворення	Склад хмари	Опади
1	2	3	4	5	6	7
Хмари верхнього ярусу (у середніх широтах від 6 до 12 км)						
Cirrus (пір'ясті, Ci)	fibratus, uncinus, spissatus, castellanus, floccus	intortus, radiatus, vertebratus, duplicatus	6–12 км	Хмари висхідного ковзання	Кристалічні дисперсії	Не випадають
Cirrostratus (пір'ясто- шаруваті, Cs)	fibratus, nebulosus	duplicatus, undulatus	8–11 км	Хмари висхідного ковзання	Кристалічні дисперсії	Не випадають
Cirrocumulus (пір'ясто- купчасті, Cc)	stratiformis, lenticularis, castellanus, floccus	undulatus, lacunosus	8–11 км	Хвилясті хмари	Кристалічні дисперсії	Не випадають
Хмари середнього ярусу (у середніх широтах від 2 до 6 км)						
Altostratus (високошаруваті, As)	-	translucidus, opacus, duplicatus, undulates, radiatus	3–6 км	Хмари висхідного ковзання	Кристалічні дисперсії	Слабкі
Alto cumulus (висококупчасті, Ac)	stratiformis, lenticularis, castellanus, floccus	translucidus, perlucidus, opacus, duplicatus, undulatus, radiatus	2–5 км	Хвилясті хмари	Краплинні дисперсії	Дуже слабкі

Продовження таблиці 2.7						
1	2	3	4	5	6	7
Хмари нижнього ярусу (у середніх широтах до 2 км)						
Nimbostratus (шарувато- дощові, Ns)	-	-	1–5 км	Хмари висхідного ковзання	Змішані дисперсії	Інтенсивні затяжні
Stratus (шаруваті, St)	nebulosus, fractus	opacus, translucidus, undulatus	До 1 км	Хмари турбулентного перемішування	Краплинні дисперсії	Не випадають
Stratocumulus (шарувато- купчасті, Sc)	stratiformis, lenticularis, castellanus	translucidus, perlucidus, opacus, duplicatus, undulates, radiatus, lacunosus	0,7–5 км	Хвилясті хмари	Краплинні дисперсії	Не випадають
Cumulus (купчасті, Cu)	humilis, mediocris, congestus, fractus	radiatus	0,5–3 км	Конвективні хмари	Краплинні дисперсії	Слабкі
Cumulonimbus (купчасто- дощові, Cb)	calvus, capillatus	-	0,5–12 км	Конвективні хмари	Змішані дисперсії	Зливові дощі, сніг, град

Потенційно придатними для штучного впливу є хмари нижнього ярусу, серед яких найбільшу водність та вологозапас мають шарувато-дощові (Ns) та купчасто-дощові (Cb). Інші види хмар здатні до утворення опадів лише після фази їхньої трансформації в Ns або Cb види.

Таким чином, загальний підхід до ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводить до викиду в атмосферу небезпечних хімічних та радіоактивних речовин, полягає у розробці нових організаційно-технічних методів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду в атмосферу небезпечних речовин, шляхом штучного ініціювання опадів. Перший метод має бути спрямований на осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин. Другий метод повинен бути спрямований на локалізацію осередків інтенсивного горіння.

Висновки по розділу 2

1. Одним із пріоритетних напрямків ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій є захист атмосферного повітря, який необхідно реалізовувати в рамках функціонування в Україні Єдиної державної системи цивільного захисту методами штучного опадоутворення на основі класичного контуру управління, що забезпечує збір, обробку та аналіз інформації, моделювання розвитку небезпечної ситуації в зоні ураження та використання ефективних методів і способів штучного ініціювання опадів над зоною забруднення.

2. Особливістю надзвичайних ситуацій техногенного характеру є те, що в зоні ураження наявні такі небезпечні хімічні речовини, як аміак, хлор або сірководень, що потрапляють в атмосферу при аваріях із розгерметизацією технологічного устаткування без виникнення пожежі. У випадку виникнення пожеж на промислових об'єктах особливу небезпеку становлять оксиди вуглецю, азоту та сірки, галогенводні, особливо небезпечні – синільна кислота, фосген та оксиди фосфору. Окрему групу небезпечних викидів при

пожежах становлять тверді аерозолі сажі та золи, які за масою є основними компонентами продуктів горіння багатьох речовин.

3. При виникненні аварій на об'єктах атомної промисловості як продукти осадження атмосферними опадами необхідно розглядати: газоподібний інертний газ ксенон; хімічно інертні «гарячі частки»; мікрочастинки органічного та неорганічного пилу з конденсованою на поверхні паром радіоактивних речовин; рідкі мікрокраплі, що містять сконденсовані радіоактивні речовини; мікрочастинки радіоактивного графіту.

4. Загальний підхід до ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводить до викиду в атмосферу небезпечних хімічних та радіоактивних речовин, полягає у розробці нових організаційно-технічних методів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду в атмосферу небезпечних речовин, шляхом штучного ініціювання опадів. Перший метод має бути спрямований на осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин. Другий метод повинен бути спрямований на локалізацію осередків інтенсивного горіння.

РОЗДІЛ 3.

ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНИЙ МЕТОД ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ПРИРОДНОГО ТА ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ ШЛЯХОМ ОСАДЖЕННЯ З АТМОСФЕРИ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗОПОДІБНИХ ТА ДИСПЕРСНИХ РЕЧОВИН

Вирішувати третю задачу наукових досліджень будемо наступним чином:

Першочергово опишемо розроблену математичну модель осадження штучно ініційованими атмосферними опадами газоподібних та дисперсних небезпечних речовин, що потрапляють в атмосферу внаслідок природних та техногенних катастроф.

Далі розглянемо керуючий алгоритм організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, який реалізує розроблену математичну модель.

Після чого надамо опис процедур використання організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин.

3.1. Математична модель осадження штучно ініційованими атмосферними опадами газоподібних та дисперсних небезпечних хімічних та радіоактивних речовин, що викидаються в атмосферу внаслідок надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру

Розробляти математичну модель будемо наступним чином: по-перше, розглянемо термодинаміку фазових переходів води в атмосферному повітрі за наявності ядер конденсації та сублімації. Після цього визначимо особливості процесу штучного ініціювання опадів шляхом введення хімічних

реагентів. Наступним кроком буде моделювання динаміки процесів осадження небезпечних газоподібних та дисперсних речовин із атмосфери. Після цього, узагальнюючи отримані результати, розробимо математичну модель осадження штучно ініційованими атмосферними опадами газоподібних та дисперсних небезпечних хімічних та радіоактивних речовин, що викидаються в атмосферу внаслідок надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру.

3.1.1. Термодинаміка фазових переходів води в атмосферному повітрі в присутності ядер конденсації та сублімації

Хмарами називаються зважені в атмосфері дрібнодисперсні краплі та/або кристали льоду, видимі неозброєним оком. Однак більш точно варто вказати, що хмари в основному перебувають у нижніх шарах атмосфери – тропосфері. Залежно від температури хмари можуть складатися як винятково із крапель або кристалів льоду, так мати і змішаний склад. Так, за температур повітря в зоні хмароутворення вище -10°C хмари в основному складаються з рідких крапель, за температур нижче -15°C – переважно із кристалів льоду. У діапазоні температур від -10°C до -15°C спостерігаються змішані хмари [290].

Розмір дисперсних часток у хмарах також може перебувати в широкому діапазоні. Для висотних крижаних хмар розмір часток становить до 10 мкм. Розмір рідких крапель у більшості хмар перебуває в діапазоні від 4 до 25 мкм. У дощових хмарах розмір краплі дещо вище й може досягати 1 мм [335].

Відповідно до міжнародної класифікації [336] хмари можна розділити на класи залежно від їх властивостей.

При розгляді питання штучного ініціювання опадів важливими характеристиками хмар є їх водність та вологозапас. Водність хмари

визначається вмістом рідиннокрапельної або кристалічної води в ній. Водність більшості хмар становить порядку $\sim 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Водність зливових хмар може досягати $\sim 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ [288]. Однак вміст води у сконденсованому стані завжди набагато менший, ніж пароподібної.

Вологозапас хмари – це сумарний вміст води в будь-якому агрегатному стані в хмарі, що для шарувато-купчастих хмар становить до $10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, а для шарувато-дощових досягає $1 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Визначення водності та вологозапасу хмари здійснюється за допомогою наземних та повітряних засобів моніторингу. До наземних відносяться автоматичні та керовані метеорологічні радіолокаційні комплекси, які працюють за принципом опромінення досліджуваної зони електромагнітним випромінюванням та прийомом відбитого сигналу.

Однак при використанні таких систем для визначення характеристик дощових хмар стикаються із проблемою високої похибки, що пов'язано зі слабкою проникаючою здатністю електромагнітних хвиль по всьому об'єму хмари, насиченої рідкими краплями або кристалами.

Більш точні дані можуть бути отримані при використанні пілотованих та безпілотних літальних апаратів, які проводять моніторинг характеристик хмари методом відбору проб у конкретній зоні.

Атмосферні опади підрозділяються залежно від їхньої інтенсивності та агрегатного стану на зливові дощі, дощі, мряку, сніг, крупу, град. Існують також наземні опади – роса, іній, паморозь, ожеледь. Однак їх детальний розгляд не відноситься до тематики даної роботи.

Краплі дощу мають у діаметрі від 0,5 до 5 мм. Краплі з більшими розмірами при падінні розпадаються на більш дрібні за рахунок опору повітря. Краплі мряки характеризуються розмірами в діапазоні 0,05–0,5 мм. Природно опади відрізняються швидкістю падіння краплі, відповідно до їхнього розміру.

Опади характеризуються кількістю (у міліметрах) того шару, що вони утворили б на землі за умови відсутності випаровування. Однак у практиці

штучного ініціювання опадів більш актуальним є визначення інтенсивності опадів ($\text{мм} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$).

Потенційно придатними для штучного впливу є хмари нижнього ярусу, серед яких найбільшу водність та вологозапас мають шарувато-дощові (Ns) та купчасто-дощові (Cb). Інші види хмар здатні до утворення опадів лише після фази їхньої трансформації в Ns або Cb види.

Співвідношення енергій Гіббса водяної пари та рідкої води визначає можливість протікання процесів конденсації або випаровування. Система завжди прямує у бік зменшення енергії Гіббса.

Для гомогенної конденсації термодинамічний потенціал для води та пари визначається як [21, 288, 289]:

$$G_B = U_B + E \cdot v_B - T \cdot s_B, \quad (3.1)$$

$$G_{\Pi} = U_{\Pi} + E \cdot v_{\Pi} - T \cdot s_{\Pi}, \quad (3.2)$$

де U_B , U_{Π} – внутрішня енергія води та пари відповідно; E – тиск насичення водяної пари; v_B , v_{Π} – питомий об'єм води та пари відповідно; T – температура води та пари (у рівноважному стані $T_B = T_{\Pi} = T$); s_B , s_{Π} – ентропія води та пари відповідно.

У рівноважному стані вільні енергії рівні:

$$G_B = G_{\Pi} \rightarrow dG_B = dG_{\Pi}. \quad (3.3)$$

Відповідно, виходячи з рівнянь (3.1)–(3.3), закону збереження енергії (перший початок термодинаміки) та другого початку термодинаміки для оборотних процесів, одержуємо рівняння Клаузіуса-Клапейрона [21]:

$$\frac{dE}{dT} = \frac{s_{\Pi} - s_B}{v_{\Pi} - v_B}. \quad (3.4)$$

При ізотермічному процесі:

$$s_{\Pi} - s_B = \frac{L}{T}, \quad (3.5)$$

де L - питома теплота конденсації (паротворення).

Враховуючи вираз (3.5), рівняння стану водяної пари, а також те, що питомих об'єм пари набагато більший питомого об'єму води ($v_B < v_{\Pi}$), інтегрування рівняння (3.4) дає наступний результат:

$$\ln S_0 = \ln \frac{E}{E_0} = \frac{L \cdot M}{R_0} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right), \quad (3.6)$$

де S_0 – ступінь пересичення пари відносно тиску насичення при 0°C ; M – молярна маса води, $M = 0,018 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$; R_0 – універсальна газова стала, $\text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; E_0 – тиск насичення водяної пари при 0°C , $E_0 = 610,78 \text{ Па}$; $T_0 = 273,15 \text{ К}$. Відповідно необхідний ступінь пересичення пари для протікання процесу конденсації буде визначатися:

$$S_0 = \exp \left[\frac{L \cdot M}{R_0} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]. \quad (3.7)$$

Далі розглянемо гетерогенну конденсацію на водяній краплі. У цьому випадку вільна енергія пари визначається сумою енергій молекул g_{Π} [21, 288]:

$$G_{\Pi} = g_{\Pi} \cdot n. \quad (3.8)$$

Вільна енергія води, крім енергії молекул, також залежить і від енергії поверхневого натягу [21, 288]:

$$G_B = g_B \cdot n + 4\pi \cdot r^2 \cdot \sigma, \quad (3.9)$$

де r – радіус краплі (ядро конденсації), на яку конденсується пара;
 σ - коефіцієнт поверхневого натягу.

Приймаючи

$$g_B - g_\Pi = -k \cdot T \cdot \ln S \quad (3.10)$$

та

$$n = \frac{4\pi \cdot N_A \cdot \rho \cdot r^3}{3 \cdot M}, \quad (3.11)$$

де k – постійна Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹; N_A – число Авогадро, $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹; ρ – густина води, отримаємо:

$$\Delta G = -(k \cdot T \cdot \ln S) \cdot \frac{4\pi \cdot N_A \cdot \rho \cdot r^3}{3 \cdot M} + 4\pi \cdot r^2 \cdot \sigma, \quad (3.12)$$

де S – ступінь пересичення пари відносно тиску насичення за тієї самої температури без крапель. Рівняння (3.12) має екстремум по радіусу краплі

$$\left[\frac{d(\Delta G)}{dr} = 0 \right]:$$

$$r_{кр} = \frac{2\sigma \cdot M}{\rho \cdot N_A \cdot k \cdot T \cdot \ln S}. \quad (3.13)$$

Як було відзначено вище, екстремум ΔG визначає можливість протікання конденсації або випаровування. Отже, при розмірах краплі більше $r_{кр}$ на неї буде конденсуватися пара; у протилежному випадку крапля сама буде випаровуватися. З рівняння (3.13) можна одержати формулу Томпсона

[288] для визначення необхідного ступеня пересичення для конденсації пари на рідкій краплі води:

$$S_r = \exp\left(\frac{2\sigma \cdot M}{\rho \cdot N_A \cdot k \cdot T \cdot r}\right). \quad (3.14)$$

У реальній атмосфері первісні краплі утворюються на твердих ядрах конденсації, в якості яких можуть виступати як розчинні у воді солі (насамперед NaCl), так і нерозчинні часточки сажі, пилу та ін.

Виходячи з того, що поверхня краплі розчину, крім молекул води, також зайнята молекулами розчиненої речовини, то з поверхні розчину відривається менша кількість молекул води. Із цього випливає, що тиск насичення над поверхнею розчину завжди менше тиску насичення над поверхнею чистої води. Тиск насиченої пари над розчином, а отже, і критичний ступінь пересичення для конденсації пари на поверхні розчину визначається із закону Рауля [337]:

$$S'_r = \exp\left(\frac{2\sigma'}{R_{\text{п}} \cdot \rho'_k \cdot T \cdot r'}\right) \cdot \left(1 + \frac{m}{\frac{4}{3}\pi \cdot r'^3 \cdot \rho'_k - m}\right)^{\frac{\rho_k}{\rho'_k}}, \quad (3.15)$$

де σ' – коефіцієнт поверхневого натягу розчину; ρ'_k – густина краплі розчину; r' – радіус краплі розчину; m – маса солі, розчиненої в краплі; ρ_k – густина води.

При розгляді конденсації пари на нерозчинному ядрі (пил, сажа та ін.) скористаємося формулою Дюпре для визначення роботи змочування ядра [337]:

$$f = 4\pi \cdot r_{\text{я}}^2 \cdot (\sigma_{\text{я-к}} - \sigma_{\text{я-п}}), \quad (3.16)$$

де $r_{\text{я}}$ – радіус ядра конденсації (порошини); $\sigma_{\text{я-к}}$ та $\sigma_{\text{я-п}}$ – коефіцієнти поверхневого натягу на границях ядро-конденсат та ядро-пара відповідно.

Однак асимптотика роботи змочування має експонентний вигляд, що обумовлений структурними силами [206]:

$$f^* = f \left[1 - \frac{\sigma_{\text{я-к}} - \sigma_{\text{я-п}} - \sigma}{\sigma_{\text{я-к}} - \sigma_{\text{я-п}}} \exp\left(-\frac{h}{l}\right) \right], \quad (3.17)$$

де h – товщина плівки води на поверхні ядра; l – кореляційна довжина в рідкій плівці, що утворюється навколо ядра.

Відповідно, використовуючи (3.16)–(3.17), зміна енергії Гіббса для нерозчинного ядра визначається як:

$$\begin{aligned} \Delta G = & -(k \cdot T \cdot \ln S) \cdot \frac{4\pi \cdot N_A \cdot \rho \cdot r_{\text{я}}^3}{3 \cdot M} + \\ & + 4\pi \cdot r_{\text{я}}^2 \cdot (\sigma_{\text{я-к}} - \sigma_{\text{я-п}}) \cdot \left[1 - \left(\frac{\sigma_{\text{я-к}} - \sigma_{\text{я-п}} - \sigma}{\sigma_{\text{я-к}} - \sigma_{\text{я-п}}} \right) \exp\left(-\frac{h}{l}\right) \right]. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Звідси одержуємо критичний ступінь пересичення для конденсації на нерозчинному ядрі:

$$S_{\text{я}} = \exp \left[\left(\frac{2(\sigma_{\text{я-к}} - \sigma_{\text{я-п}})}{R_{\text{п}} \cdot \rho \cdot T \cdot r_{\text{я}}} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{\sigma_{\text{я-к}} - \sigma_{\text{я-п}} - \sigma}{\sigma_{\text{я-к}} - \sigma_{\text{я-п}}} \right) \exp\left(-\frac{h}{l}\right) \right) \right]. \quad (3.19)$$

У випадку, коли ядро конденсації має електричний заряд, його енергетичний внесок у загальний потенціал краплеутворення визначається за виразом [21, 289, 338, 339]:

$$f_{\text{q}} = \frac{q^2}{8\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r_{\text{q}}}, \quad (3.20)$$

де q – заряд ядра конденсації; ε – діелектрична проникність атмосфери; ε_0 – електрична постійна, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$; r_q – радіус зарядженого ядра.

Відповідно одержуємо (приклад для зарядженої краплі води):

$$\Delta G = -(k \cdot T \cdot \ln S) \frac{4\pi \cdot N_A \cdot \rho \cdot r^3}{3 \cdot M} + 4\pi \cdot r^2 \cdot \sigma + \frac{q^2}{8\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r}. \quad (3.21)$$

Звідки

$$S_q = \exp \left[\frac{M}{\rho \cdot N_A \cdot k \cdot T} \left(\frac{2\sigma}{r} - \frac{q^2}{32\pi^2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r^4} \right) \right]. \quad (3.22)$$

Відповідно отримані вирази – (3.7), (3.14), (3.15), (3.19), (3.22) – дозволяють визначити критичний ступінь пересичення водяної пари, необхідний для протікання процесів конденсації в атмосфері. Результати виконаних розрахунків [340] для найпоширеніших видів ядер конденсації наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Критичний ступінь пересичення водяної пари ($S_{кр}$) для краплеутворення на різних ядрах конденсації

	Вид ядра	$S_{кр}$
1	Без ядер конденсації ($r < r_{кр}$, гомогенна конденсація)	5,47
2	Водяні краплі ($r > r_{кр}$)	1,00
3	Краплі 10 %-го розчину NaCl	0,74
4	Частка пилу Si_2	0,81
5	Сажа	0,95
6	Одиничний іон (O_2^+)	1,75
7	Крапля води із зарядом 10^{-16} Кл	0,63
8	Краплі 10 %-го розчину NaCl із зарядом 10^{-16} Кл	0,43
9	Сажа із зарядом 10^{-16} Кл	0,82

Результати розрахунків показали (табл. 3.1), що найбільшою здатністю до краплеутворення (найменший ступінь пересичення) володіють заряджені краплі розчинів солей. Як видно з таблиці 3.1, для протікання гомогенної конденсації необхідно більш ніж п'ятикратне пересичення, що є недосяжним у реальних умовах атмосфери. Однак у складі атмосфери знаходиться велика кількість часточок солі, пилу, сажі, пилка та ін. Сформована конвективна хмара являє собою масив дрібних крапель води або розчину солей, тому штучний заряд краплі дозволяє знизити критичний ступінь пересичення в 1,3-2 рази у порівнянні з незарядженими частками. Низька краплеутворююча здатність у сажі пояснюється великою гідрофобністю сажі у порівнянні з SiO_2 .

3.1.2. Особливості процесу штучного ініціювання опадів шляхом введення хімічних реагентів

Всі піротехнічні сполуки для штучного ініціювання опадів складаються із чотирьох класів компонентів, залежно від їхнього функціонального призначення (рис. 3.1) [341].

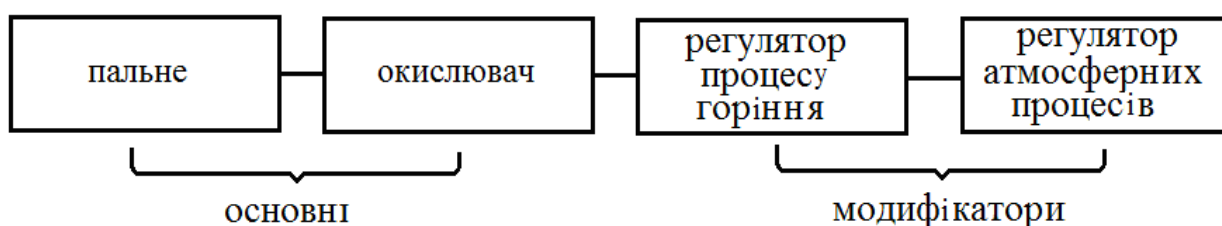


Рис. 3.1. Основні класи компонентів піротехнічних сполук

Підбір найбільш ефективної речовини в якості будь-якої складової пірозаряду необхідно розглядати в комплексі з іншими компонентами, тому що на робочому етапі відбувається загальна хімічна реакція горіння всіх компонентів заряду.

Першим фактором, що визначає хімічний склад реагенту для штучного опадоутворення, є агрегатний стан ініційованих опадів, тобто орієнтація на процес твердофазного льодоутворення або рідиннофазного краплеутворення. Причому визначальну роль відіграє агрегатний стан опадів не біля поверхні землі, а в зоні ініціювання, тому що, наприклад, часто спостерігається явище утворення в переохолодженій хмарі кристалів льоду, які в процесі випадіння через зону теплого повітря тануть, і на рівні землі спостерігаються опади у вигляді дощу.

Крижаний кристал на поверхні частки реагенту може утворюватися двома шляхами – шляхом безпосередньої десублімації з пари у кристал (п-к) та поетапною конденсацією пари в рідку фазу з наступною кристалізацією (п-р-к). Процес утворення гетерофазного зародка носить імовірнісний характер, що визначається ймовірністю (Ω) флуктуаційного утворення молекулярних скупчень із щільністю та структурою стабільної фази [289]:

$$\Omega \approx \exp \left[-\frac{4\pi r^2 \sigma}{3kT} \right], \quad (3.23)$$

де r – радіус утвореного зародка; σ – поверхнева енергія зародка; k – постійна Больцмана; T – температура зародка.

Для визначення найбільш імовірного процесу фазового переходу порівнюємо ймовірності:

$$\Omega_p \leftrightarrow \Omega_k, \text{ або } r_p^2 \sigma_{p-p} \leftrightarrow r_k^2 \sigma_{p-k}. \quad (3.24)$$

Якщо характеризувати пересичення водяної пари відносно вологістю повітря S

$$S = \frac{P}{P_H},$$

де p – тиск повітря на великій відстані від краплі (кристала); p_n – тиск насиченої пари над краплею (кристалом), з урахуванням рівняння Томсона [289]:

$$\frac{2\sigma M}{\rho N_A} \cdot \frac{1}{r} = kT \ln \frac{p}{p_n}, \quad (3.25)$$

де M – молекулярна маса води; ρ – густина краплі; N_A – число Авогадро, то одержимо:

$$\ln f \leftrightarrow \frac{\ln \frac{p_{n(p)}}{p_{n(k)}}}{\frac{\rho_p}{\rho_k} \left(\frac{\sigma_{p-k}}{\sigma_{p-p}} \right)^{3/2} - 1}. \quad (3.26)$$

Аналіз залежності (3.26) показав, що процес кристалізації за схемою п-к з досить істотною інтенсивністю протікає при температурах нижче -30°C . Відповідно при температурах у діапазоні $0^\circ\text{C} - -30^\circ\text{C}$ енергетично більш імовірним є процес п-к.

В якості кристалоутворюючого реагенту в практиці опадоутворення використовують AgJ . Єдиного теоретичного підходу до пояснення його високої кристалоутворюючої ефективності немає, однак основною теоретичною передумовою процесу кристалізації води на поверхні AgJ є подібність структур кристалічних решіток солі AgJ та кристалів льоду.

Кристалоутворююча активність реагенту, крім саме хімічної природи, визначається й дисперсністю часток. З одного боку, збільшення дисперсності ядер конденсації підвищує площа активної поверхні часток; з іншого боку, відповідно до закону Томсона, існує деяке рівноважне значення розміру ядра, за менших значень якого конденсація на його поверхні не відбувається [289]:

$$r_{п-к} = \frac{2\sigma_{п-к}M}{\rho_k k N_A T \ln \frac{p_{н(р)}}{p_{н(к)}}}. \quad (3.27)$$

У рівнянні (3.27) необхідно враховувати поверхневі властивості не ядра конденсації, а крижаного кристала. Це пояснюється тим, що поверхневі властивості ядра конденсації впливають лише на конденсацію першого моношару, тоді як подальша конденсація відбувається на звичайній поверхні лід/водяна пара. Залежність розмірів рівноважного крижаного кристала представлена на рис. 3.2.

З результатів розрахунку видно, що при температурах більше $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ починається зростання рівноважного радіуса та в області $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ він прямує до нескінченності. Це пояснюється тим, що саме в районі значення температур $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ перебуває максимум різниці парціальних тисків пари над поверхнею води та льоду (крива 2, рис. 3.2).

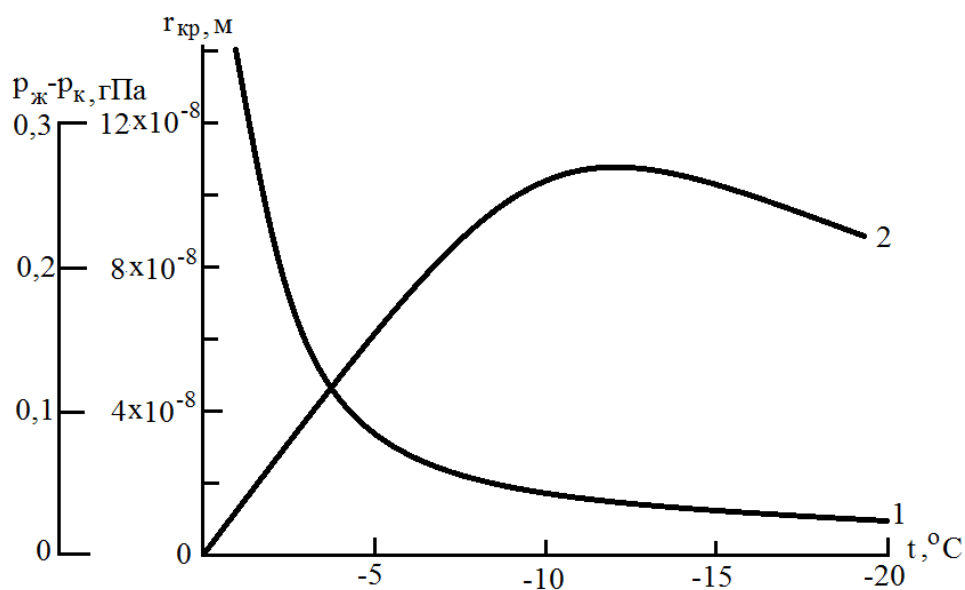


Рис. 3.2. Залежність радіуса рівноважного крижаного кристала $r_{кр}$ (кр. 1) та різниці парціальних тисків $p_v^{\infty} - p_k^{\infty}$ (кр. 2) від температури

Тобто, з фізичної точки зору, процес конденсації водяної пари на ядрі з $r < r_{кр}$ відбуватися буде, однак кристалізація сконденсованої води не

відбувається. Виходячи із цього, при температурах вище $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ефективність використання кристалоутворюючих реагентів, таких як AgI , падає та визначальну роль починає відігравати процес конденсації на поверхні ядра рідкої води. У цьому випадку важливою властивістю опадоутворюючих реагентів є їх гігроскопічність.

Під гігроскопічністю розуміється здатність матеріалів поглинати вологу з повітря. Високу гігроскопічність мають солі NaCl , CaCl_2 та деякі кислоти. Опадоутворюючу активність розчинних гігроскопічних матеріалів можна оцінити за критичним ступенем пересичення, вище якого може відбуватися краплеутворення на гігроскопічному ядрі, що визначається із закону Рауля, розглянутого вище [289].

Краплеутворююча ефективність гігроскопічних ядер конденсації істотно залежить від концентрації розчиненої речовини в розчині. Відповідно з ростом краплі падає концентрація розчиненого в ній ядра, що призводить до падіння ефективності даного ядра конденсації.

Як основні параметри горіння пірозаряду розглянемо температуру горіння та швидкість горіння (швидкість та температура горіння визначають тягу та, відповідно, розпил реагентів). Нижче проаналізуємо основні фактори, що впливають на процес горіння, та існуючі моделі для опису цього процесу.

Як окислювач у твердотільних піротехнічних сполуках в основному використовуються перхлорат амонію (NH_4ClO_4) та нітрат амонію (NH_4NO_3). Найбільшу окисну активність має перхлорат амонію, однак у процесі його горіння утворюється шкідливий галогенід HCl . Заміна NH_4ClO_4 на NH_4NO_3 призводить до різкого зниження швидкості горіння та реактивної тяги.

В якості горючого в піротехнічних зарядах використовуються лужні та лужноземельні метали. З найбільш доступних до них відносяться берилій (Be), натрій (Na), магній (Mg) та алюміній (Al). Натрій є нестабільним у повітряному середовищі та пожежонебезпечним, що ускладнює його зберігання. Берилій має добрі горючі властивості, однак продукти його

горіння є вкрай токсичними. Серед стабільних металів найбільшою теплою та швидкістю горіння володіє магній, тому використання даного металу як горючого пірозарядів набуло широкого поширення [342, 343]. У практиці штучного впливу на атмосферні опади найбільш часто використовуються сполуки на основі алюмінію [344, 345]. Однак в усіх раніше проведених дослідженнях з розробки та оптимізації піротехнічних сполук для штучного ініціювання опадів дуже мало уваги приділялося питанню фізикохімії процесу горіння основних компонентів. Тим часом, саме від фізико-хімічних властивостей горючих матеріалів залежить процес встановлення ефективного співвідношення горючого та окислювача, хімічний склад продуктів горіння та їх поверхневі властивості, швидкість горіння та ін.

Горюче як основний компонент піротехнічних сполук являє собою дрібнодисперсний ($d \sim 10$ мкм) порошок металу (Mg, Al), часточки якого покриті найтоншим шаром (до 0,5 мкм) оксиду (MgO, Al_2O_3) (рис. 3.3) [346].

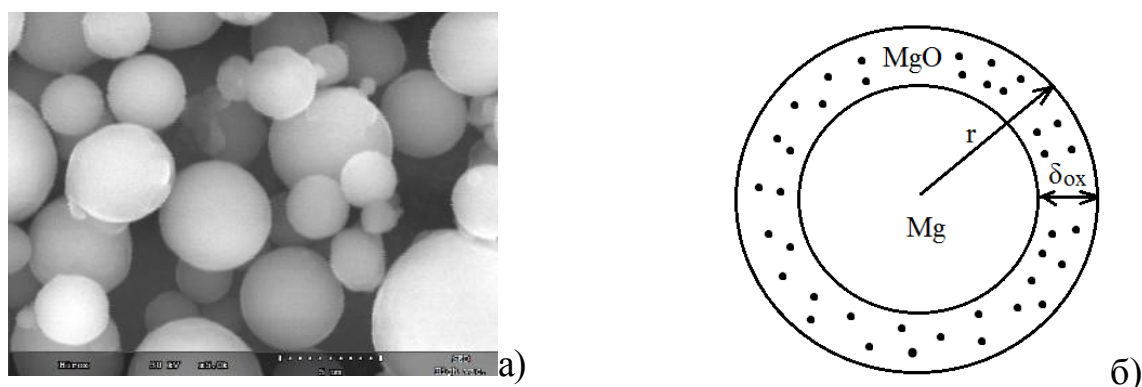


Рис. 3.3. Зовнішній вигляд (а) та структура (б) горючого порошку пірозаряду

Оскільки оксиди металів мають значно більш високі температури плавлення та кипіння, то наявність оксидної плівки буде знижувати швидкість та температуру горіння металу.

Виходячи з того, що розміри часток малі, вплив оксидної плівки буде істотним. Динаміка руйнування оксидної плівки буде залежати від її товщини

та пористості, що визначається умовами зберігання та температурою горіння [347 - 349].

Розглянемо особливості процесу горіння суміші порошку алюмінію (АСД-2, АСД-4), дисперсністю $d \approx 50-200$ мкм, із хлоридом амонію, дисперсністю $d \approx 1 \sim 10$ мкм. Оскільки дисперсність горючого та окисника порівнянні, відповідно до розглянутих вище умов фронт полум'я буде сильно скривлений, що додатково ускладнює моделювання процесу горіння.

Крім цього, на процес горіння впливає полідисперсність як часток горючого, так і окисника, а також розходження в дисперсності між окисником та горючим і, нарешті, нерівномірність розподілу часток порошку по об'єму зв'язуючого.

На основі результатів аналізу факторів, що впливають на процес горіння піросполук, та існуючих теоретичних моделей розрахунку параметрів горіння, слід зазначити, що для багатокomпонентних піротехнічних сполук, що розробляються для осадження шкідливих речовин атмосферними опадами, використання математичних моделей є малоефективним та недоцільним. Тому надалі під час проведення досліджень багатокomпонентних піротехнічних сполук будемо спиратися на експериментальні дані. У тих випадках, коли це є припустимим для вирішення окремих завдань, будуть використовуватися спеціалізовані моделі.

Дослідимо основні горючі властивості піротехнічних сполук з Al та Mg як горючого та NH_4ClO_4 , NH_4NO_3 і KNO_3 як окисника. Як вже зазначено вище, з міркувань безпеки доцільно в якості окисника використати нітрати амонію або калію.

Одним з основних параметрів вибору ефективної піротехнічної сполуки є підбір оптимального співвідношення горючого та окисника. Стехіометричні співвідношення при цьому виявляються заниженими, тому що у процесі горіння беруть участь і компоненти повітря. Тому скористаємося комплексом програм термодинамічного розрахунку

багатокомпонентних систем «TERMO-CALC». Як критерій оцінки оберемо температуру горіння (рис. 3.4) [350, 351].

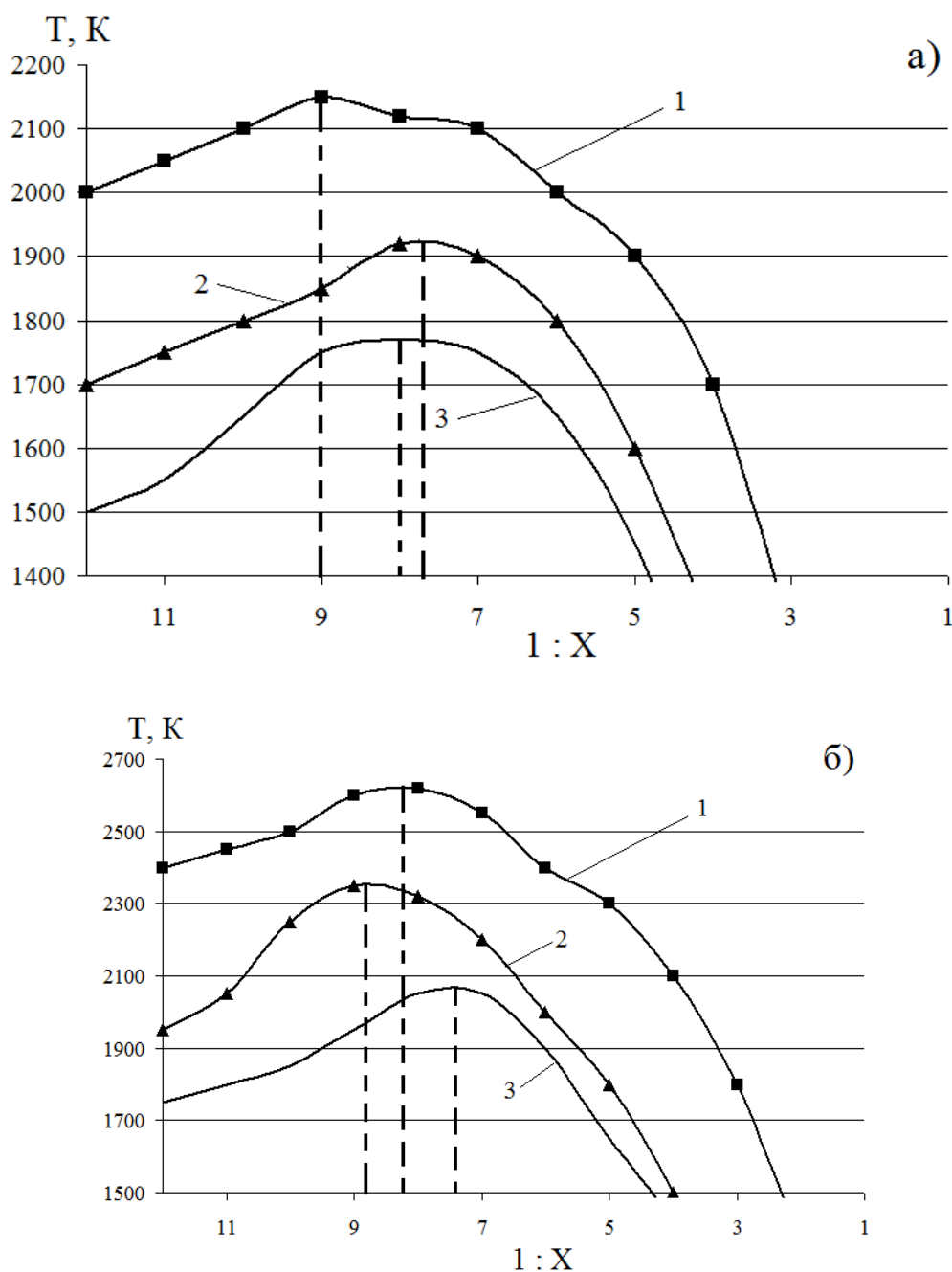


Рис. 3.4. Температура горіння піросполук з різним співвідношенням горючого та окисника: а – Al; б – Mg; 1 – NH₄ClO₄; 2 - NH₄NO₃; 3 – KNO₃

Як видно з рис. 3.4, температура горіння магнію з усіма розглянутими окислювачами набагато вище температури горіння алюмінію. При цьому серед окислювачів найбільшу активність має перхлорат амонію, та ряд

активності окислювачів має такий вигляд: $\text{NH}_4\text{ClO}_4 > \text{NH}_4\text{NO}_3 > \text{KNO}_3$. Також у процесі горіння магнію з перхлоратом амонію найбільш ефективно співвідношення горючого та окисника зміщується у бік зниження частки окисника, тоді як у випадку використання нітрату амонію спостерігається зворотна залежність. При вмісті окисника нижче 3 масових частин горіння практично всіх розглянутих сумішей не відбувається. Однак, як відзначалося вище, використання амонійних окислювачів, особливо перхлорату амонію, може призводити до утворення високотоксичних NH_3 та HCl . Використовуючи програмний комплекс «TERMO-CALC», проведемо оцінку вмісту аміаку та хлориду водню в продуктах горіння досліджуваних сумішей при оптимальних співвідношеннях горючого та окисника [350].

Розрахунковим шляхом встановлено, що у процесі горіння піросполук з амонійними окислювачами утворюється досить велика кількість токсичного аміаку та гідрату хлору. Слід зазначити підвищений вміст HCl під час горіння сполуки ПС-0-4. Це пояснюється зміною динаміки протікання хімічної реакції за більш високої температури горіння. З табл. 3.2 випливає, що для підвищення рівня безпеки у разі використання піротехнічних сполук з метою штучного опадоутворення краще застосовувати в якості окисника сполуки на основі нітрату калію.

Таблиця 3.2

Вміст NH_3 та HCl у продуктах горіння піросполук

Сполуки	моль/кг	
	NH_3	HCl
ПС-0-1 $[\text{Al} + \text{NH}_4\text{ClO}_4 (1:9)]$	18,22	6,34
ПС-0-2 $[\text{Al} + \text{NH}_4\text{NO}_3 (1:7,8)]$	22,73	—
ПС-0-3 $[\text{Al} + \text{KNO}_3 (1:8,1)]$	—	—
ПС-0-4 $[\text{Mg} + \text{NH}_4\text{ClO}_4 (1:8,4)]$	13,51	8,31
ПС-0-5 $[\text{Mg} + \text{NH}_4\text{NO}_3 (1:8,9)]$	15,42	—
ПС-0-6 $[\text{Mg} + \text{KNO}_3 (1:7,3)]$	—	—

На сьогодні існує два підходи до розробки нових піротехнічних сполук для штучного ініціювання опадів. Перший підхід ґрунтується на тому, що

основні речовини – активатори процесів конденсації та коагуляції води – наявні у піросполуці як добавки та участі в хімічній реакції горіння не беруть. У другому підході основні активні ядра конденсації формуються в результаті хімічної реакції горіння вихідних компонентів.

Найбільш привабливим є другий варіант, тому що не вимагає додаткових горючих компонентів піросполуки, та в результаті горіння й наступної десублімації деяких продуктів горіння утворюються ультрадисперсні ядра краплеутворення. Тому розглянемо процеси горіння таких сполук більш докладно. Для аналізу візьмемо найбільш вивчену сполуку, розглянуту у роботах [301]: Pb – 20 - 25 %, NH_4I – 25–34 %, $\text{NH}_4\text{C1O}_4$ – 20–30 %, смола (ідітол) – 10–20 %. У цих сполуках як основна горюча речовина використовується порошок свинцю, у результаті горіння якого утворюються активні ядра конденсації PbI_2 . Використання в якості горючого дрібнодисперсного Ag для утворення більш активних ядер конденсації AgI є недоцільним з економічних міркувань. Ідітол, крім зв’язуючих функцій, бере участь також у процесі горіння.

Ефективність запропонованої хімічної сполуки пірозаряду можна визначити за складом продуктів горіння. Виходячи із цього, використовуючи комплекс програм термодинамічного розрахунку багатокомпонентних систем «TERMO-CALC», дослідимо хімічний склад продуктів горіння пірозаряду ПС-2-2. Розрахунковим методом встановлено, що масовий склад продуктів горіння наступний: MgO – 14,5 %; PbI_2 – 24,3 %; PbO – 7,8 %; PbCl_2 – 4,4 %; NH_3 – 3,2 %; HI – 1,8 %; HCl – 1,2 %; CO_2 – 13,5 %; N_2 – 9,3 %; H_2O – 18,7 % та інші продукти в незначній кількості.

За результатами моделювання видно, що вихід активної речовини – йодиду свинцю є невисоким; інші продукти горіння являють собою такі високотоксичні речовини, як оксиди та хлориди свинцю, аміак та галогенводні. Відповідно як базовий склад доцільно використати піротехнічні сполуки, у яких активна речовина виступає як наповнювач. Такі сполуки дозволяють використати більш активний кристалоутворюючий

реагент – йодид срібла, гігроскопічні солі, ПАР та інші модифікуючі добавки.

Як вже відзначено вище, залежно від температури області активного впливу на хмари, за низьких температур як активні ядра кристалізації використовуються солі AgI. За більш високих температур як ядра конденсації використовуються речовини з високою гігроскопічністю, такі, наприклад, як хлорид кальцію (CaCl_2).

Основні теоретичні результати, стосовно процесу кристалоутворення льоду, розглянуті в параграфі 3.1.1, де встановлено, що найбільш ефективно кристалоутворюючі властивості ядер конденсації проявляються за температур нижче $-12\text{ }^\circ\text{C}$.

З рівняння (3.27) видно, що на кристалоутворюючу ефективність істотний вплив справляє дисперсність ядер AgI. Найбільша інтенсивність процесу кристалоутворення льоду спостерігається в діапазоні розмірів центрів конденсації 0,05-0,2 мкм (залежно від температури області впливу) (рис. 3.2). Такі частки відносяться до ультрадисперсних, та використання порошків такої дисперсності є вкрай складним, тому що виробництво та зберігання таких порошків є трудомісткими, високотехнологічними та, відповідно, дорогими. Існуючі промислові технології одержання монодисперсних порошків дозволяють одержувати порошки дисперсністю до 10 мкм. Використання ядер конденсації таких розмірів знижує ефективність використання реагенту, через те, що активною є лише поверхня ядра та значна маса реагенту не бере участі у процесі кристалоутворення.

Забезпечити необхідну дисперсність ядер конденсації можна шляхом сублімації первинного порошку AgI при горінні піротехнічної сполуки з наступною десублімацією реагенту при остиганні продуктів горіння.

Використовуючи програмний комплекс «TERMO-CALC», проведено розрахунок процесу випаровування AgI за різних температур (рис. 3.5) [350].

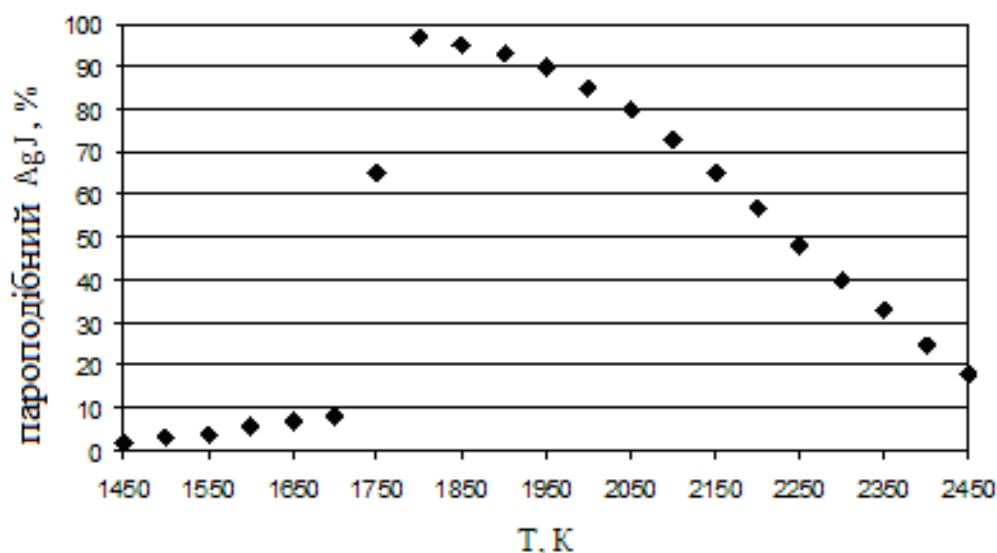


Рис. 3.5. Вплив температури горіння піросполуки на масову частку випарованого AgI

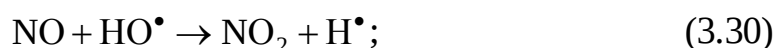
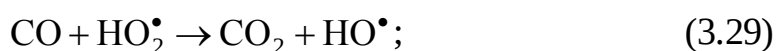
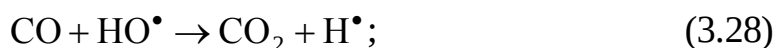
З розрахункових результатів видно, що існує різкий стрибок масової частки випарованого AgI в області температур ~ 1800 К. Наявність даного піка пов'язана з температурою кипіння йодиду срібла $T_{\text{кип}} = 1779$ К. За збільшенні температури спостерігається зниження концентрації випарованого AgI, особливо за температур вище 2000 К. Це можна пояснити термічним розкладанням AgI з утворенням оксидів AgO та Ag₂O. Відповідно температура горіння піротехнічного заряду, в якому як наповнювач використовується порошок йодиду срібла, повинна перебувати в діапазоні $\sim 1800\text{--}1900$ К.

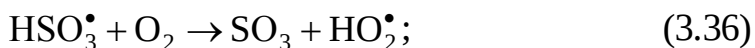
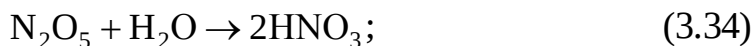
Як ми вже відзначали вище, за температури повітря в зоні впливу вище -12 °С більшу ефективність у процесі краплеутворення проявляють гігроскопічні речовини, такі як хлорид кальцію. З огляду на той факт, що температура кипіння (сублімації) хлориду кальцію становить 2210 К, то досягти ефекту підвищення дисперсності за рахунок термічної сублімації неможливо. Тому немає чітких вимог до забезпечення певної температури горіння таких сполук.

Випадання атмосферних опадів над територією ураження істотно прискорює процес очищення атмосфери. Однак інтенсивність процесу

очищення можна підвищити за рахунок введення в атмосферу спеціальних хімічних реагентів, що підвищують інтенсивність сорбції краплями дощу, або нейтралізують їх негативний вплив. Оскільки різні отруйні та радіоактивні речовини істотно розрізняються за своїми фізико-хімічними властивостями, то хімічні реагенти ефективно можуть впливати тільки на певний клас забруднюючих речовин зі схожими властивостями. Найбільш широкий спектр різних небезпечних речовин потрапляє в атмосферу внаслідок великих природних та техногенних пожеж. Тому в таких випадках можливе використання комбінації декількох реагентів. Нижче розглянуті модифікатори піротехнічних сполук, що підвищують ефективність очищення атмосфери від забруднюючих речовин різних класів.

Якісний та кількісний склад продуктів горіння істотно залежить від виду горючої речовини та умов горіння (температура, концентрація окислювача), однак їхніми основними компонентами є CO_2 , CO , NO , NO_2 , SO_2 , сажа та зола [26, 59, 61, 331]. Із цього переліку найбільшу хімічну активність мають CO , NO , NO_2 , SO_2 . При потраплянні в атмосферу ці продукти горіння реагують із атмосферними газами. У нижній тропосфері, крім H_2O , O_2 та інертних CO_2 та N_2 , містяться високоактивні радикали – гідроксильний $\text{HO}^\bullet$, гідропероксидний $\text{HO}_2^\bullet$ та нітрат-іони NO_3^- [46]. Такі радикали з'являються в атмосфері під дією ультрафіолетового випромінювання, та, відповідно, їхня концентрація зростає з висотою, однак за рахунок своєї високої активності вони роблять істотний внесок у хімічні процеси й у нижній тропосфері. Хімічно активні складові продуктів горіння реагують із радикалами за наступними схемами:



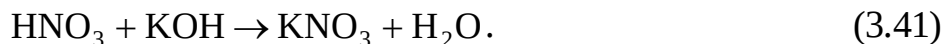
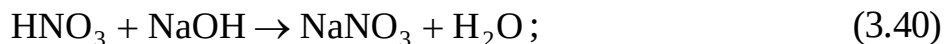
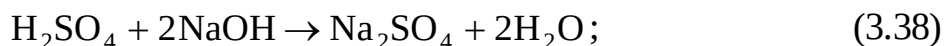


Як видно з реакцій (3.28)–(3.37), у результаті хімічних перетворень NO , NO_2 , SO_2 в атмосфері утворюються азотна та сірчана кислоти. Ці кислоти сорбуються мікрокраплями води. За певних метеорологічних умов краплі водяних розчинів кислот випадають, завдаючи істотної шкоди сільськогосподарським культурам та іншій рослинності.

Виходячи із цього, одним з методів боротьби з кислотними опадами запропоновано метод нейтралізації кислоти до моменту її потрапляння на поверхню Землі за рахунок розпилення дрібнодисперсного луку. Введення в атмосферу дрібнодисперсного луку може здійснюватися за рахунок використання розглянутих вище піротехнічних сполук.

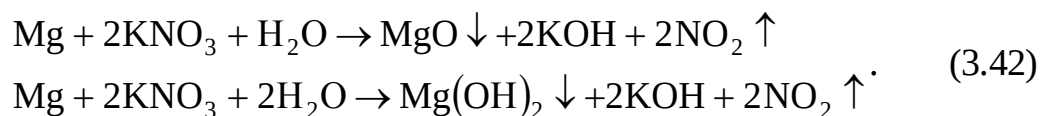
Найбільш доступними лугами є гідроксиди натрію та калію (NaOH , KOH). Крім того, ці луги добре розчиняються у воді, розкладаючись на іони, що приводить до їхньої високої активності при нейтралізації водно-кислотних розчинів. У якості основних горючих компонентів піротехнічної сполуки для розпилення луку, з метою уніфікації сполук, розглядаються компоненти із представлених вище пірозарядів (ПС-3-71). Сполука ПС-4-0: МПФ-4 – 7 %; АСД-4 – 4 %; KNO_3 – 79 %; СКН- 26 – 10 %.

Дрібнодисперсні луги (NaOH , KOH) як наповнювачі в пірозаряді не беруть участі у процесі горіння. У результаті згоряння пірозаряду частки луку розпорошуються, контактуючи з кислотними атмосферними утвореннями, та нейтралізують їх за реакціями (3.38)–(3.41):



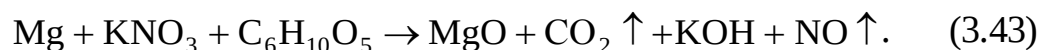
Оскільки зазначені луги мають досить низьку температуру кипіння ($T_{\text{кип}}(\text{NaOH}) - 1676 \text{ K}$; $T_{\text{кип}}(\text{KOH}) - 1600 \text{ K}$), у процесі горіння пірозаряду відбувається їхня сублімація, що призводить до додаткового диспергування часток лугу.

Додаткова кількість лугу може утворюватися в результаті реакції горіння металів із нітратом калію за схемами:



Однак, як видно з рівнянь 3.42, для додаткового утворення гідроксиду калію необхідна наявність молекул води. Незважаючи на те, що в атмосфері постійно присутня волога, потрапляння молекул води в зону реакції горіння на поверхні пірозаряду вкрай ускладнене за рахунок потужного потоку перегрітих продуктів реакції.

Вирішити проблему забезпечення реакційного об'єму водою дозволяє введення горючих воденьумісних компонентів у сам пірозаряд. Такими компонентами можуть бути органічні сполуки. Природно, з технологічної точки зору, для формування пірозаряду органічні речовини повинні бути у твердому стані за нормальних умов. В якості такої добавки можна використати целюлозу. Горіння пірозаряду з добавкою целюлози на молекулярному рівні відбувається за схемою:



При цьому практично всі атоми калію, що беруть участь у процесі горіння, утворюють калійний луг, що під час горіння піротехнічної суміші додатково збільшує інтенсивність нейтралізації кислотних атмосферних утворень [352].

Після вибору компонентів піротехнічного заряду необхідно визначитися з масовим складом.

Визначення масового складу ефективної піротехнічної сполуки проводилося експериментальним шляхом з визначенням температури горіння та часу вигорання пірозаряду. Результати експериментальних досліджень представлені в таблицях 3.3. та 3.4 [353]. Спочатку було досліджено сполуку із додаванням тільки калійного лугу як основного нейтралізатора кислотності [350].

Таблиця 3.3

Основні параметри горіння піротехнічних сполук для нейтралізації кислотності без додавання целюлози

Сполука	Вміст КОН, % мас.	Швидкість вигорання, $10^3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$	Температура горіння, К
ПС-4-0	0	$3,3 \pm 0,1$	1870 ± 20
ПС-4-1	10	$3,1 \pm 0,1$	1850 ± 20
ПС-4-2	20	$3,1 \pm 0,1$	1820 ± 20
ПС-4-3	30	$2,9 \pm 0,1$	1820 ± 20
ПС-4-4	40	$2,7 \pm 0,1$	1810 ± 20
ПС-4-5	50	$2,6 \pm 0,1$	1800 ± 20
ПС-4-6	60	$2,3 \pm 0,1$	1780 ± 20
ПС-4-7	70	$\sim 2,1$ (зрив полум'я)	1750 ± 20
ПС-4-8	80	$\sim 2,0$ (зрив полум'я)	1720 ± 20

Результати експерименту показали, що додавання калійного лугу до 60 – 65 % (масових) дозволяє зберігати стійке горіння піротехнічної сполуки. Додавання целюлози знижує горючі властивості пірозаряду в результаті заміни деякої кількості активних горючих компонентів целюлозою. Однак сполука ПС-4-61 з 60 % КОН та 5 % целюлози має стійке горіння та може використовуватися при нейтралізації кислотних опадів. Крім того, утворені у

процесі горіння оксиди магнію та алюмінію є центрами краплеутворення, що призводить до додаткового ініціювання процесу опадоутворення. Додатково прискорити процес опадоутворення можна за рахунок введення в піросполуку AgI або NaCl з розрахунку, що загальна кількість модифікуючих добавок не повинна перевищувати 65 % масових [354].

Таблиця 3.4

Основні параметри горіння піротехнічних сполук для нейтралізації кислотності з додаванням целюлози

Сполук	Вміст KOH, % мас.	Вміст целюлози, % мас.	Швидкість вигорання, 10^3 $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	Температура горіння, К
ПС-4-51	50	5	$2,4 \pm 0,1$	1790 ± 20
ПС-4-52	50	10	$2,4 \pm 0,1$	1780 ± 20
ПС-4-53	50	15	$2,4 \pm 0,1$	1760 ± 20
ПС-4-61	60	5	$2,1 \pm 0,1$	1750 ± 20
ПС-4-62	60	10	(зрив полум'я)	1720 ± 20
ПС-4-63	60	15	(зрив полум'я)	1710 ± 20
ПС-4-71	70	5	(зрив полум'я)	1700 ± 20

Використання запропонованої сполуки для штучного опадоутворення дозволяє ініціювати опади над зоною великих природних та техногенних пожеж, що приводить до осадження з атмосфери шкідливих продуктів горіння й запобігає утворенню кислотних атмосферних опадів шляхом їхньої нейтралізації.

Однією з характерних хімічних властивостей аміаку є його висока розчинність у воді (89,9 г/100 г). Ця властивість і визначає найефективніший спосіб очищення атмосфери від викидів аміаку за рахунок осадження дрібнодисперсним водним аерозолем. У розчині спочатку утворюється гідратований комплекс аміаку $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (NH_4OH), який потім частково розпадається на іони NH_4^+ та OH^- . Умовно NH_4OH вважають слабкою основою; при розрахунку її ступеня дисоціації передбачається, що весь аміак в розчині знаходиться у вигляді NH_4OH , а не у вигляді гідрату.

З іншого боку, водяні розчини аміаку мають властивість, що негативно позначається на ефективності осадження газу з атмосфери. Так, високий тиск насиченої пари, що над 4%-вим розчином – 26 мм.рт.ст. (3500 Па), і навіть над дуже розведеним 0,4%-вим розчином становить 3 мм.рт.ст. (400 Па), призводить до інтенсивного випару аміаку з розчину. Особливо це істотно в приземному шарі атмосфери, де температура вище, ніж у верхніх шарах тропосфери.

З урахуванням сказаного, основним методом нейтралізації аміаку є вплив на нього кислот. У результаті хімічної реакції утворюються солі, як, наприклад, при реакції з азотною кислотою:



Однак використати хімічно небезпечні кислоти для нейтралізації аміаку, у жорстких умовах забезпечення безпеки навколишнього середовища, неприпустимо. Особливо це небезпечно у випадку використання методу засіву хмар, коли відсутня можливість забезпечити повноту взаємодії реагентів (кислоти та аміаку).

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

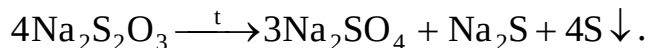
Низька розчинність хлору та фосгену свідчить про низьку інтенсивність осадження цих газів атмосферними опадами. Отже, для збільшення швидкості очищення атмосфери необхідно додатково приймати нейтралізуючі речовини.

Найбільш активним нейтралізатором хлору є тіосульфат натрію:



Із рівняння (3.45) можна визначити, що для нейтралізації 1 т хлору необхідно приблизно 0,5 т $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$. Як видно з (3.45), реакція протікає у

водяних розчинах. Однак тіосульфат натрію є горючою та вибухонебезпечною речовиною. Крім того, при нагріванні до 220 °C він розпадається за схемою:



Виходячи із цього, використання $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ як добавки в пірозаряди категорично заборонено.

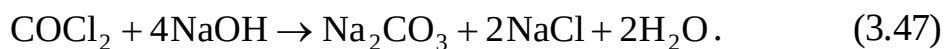
Ефективним нейтралізатором хлору є гідроксид натрію:



Для нейтралізації 1 т хлору необхідно 1,2 т NaOH. Гідроксид натрію добре розчинний у воді, тому в практиці дегазації звичайно використовують водяні розчини. Як видно з (3.46), при нейтралізації хлору лугом додатково утворюються солі, які десублімуються в гігроскопічні кристали, та вода. Утворення таких продуктів реакції (гігроскопічних кристалів) позитивно впливає на процес опадоутворення, як нами раніше було встановлено.

Не менш небезпечною речовиною, що потрапляє в атмосферу при техногенних аваріях (особливо у разі виникнення великих пожеж), є фосген (COCl_2). У спеціальній літературі фосген має назву «дихлорангідрид вугільної кислоти». У природі фосген не існує. Він був вперше синтезований в 1812 р. та набув широкого поширення в хімічній промисловості, де він використовується як проміжний продукт при виробництві, зокрема, барвників, пестицидів, фармацевтичних препаратів, полімерів, смол та затверджувачів. Щорічне виробництво становить приблизно 5 млн тонн. Фосген утворюється при термічному розкладанні або фотоокислюванні хлорованих розчинників, а також у процесі спалювання полівінілхлориду (ПВХ).

Незважаючи на те, що фосген має слабку розчинність у воді, він так само, як і хлор, активно нейтралізується гідрооксидом натрію:



Із рівняння реакції (3.47) можна визначити, що для нейтралізації 1 т фосгену необхідно 1,6 т натрієвого лугу або 16 т його 10%-го водяного розчину.

Піротехнічні сполуки з додаванням лугів розглянуті раніше. Схожі властивості калійного та натрієвого лугів дозволяють замінити їх у складі пірозаряду без істотних змін параметрів горіння. Так, за аналогією зі сполукою ПС-4-6, де в якості негорючої добавки наявний 60 % КОН, досліджено властивості сполуки ПС-4-61 з 60 % NaOH. У результаті експериментальних досліджень встановлено, що вказана сполука має швидкість вигорання $(2,4 \pm 0,1) \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ та температуру горіння $(1790 \pm 20) \text{ К}$. В межах похибки ці параметри відповідають параметрам горіння сполуки ПС-4-6 [350].

У випадку несприятливих метеорологічних умов для штучного ініціювання опадів доцільним є використання методу розпилення дрібнодисперсного реагенту (NaOH) пневматичним способом з легкомоторних пілотованих та безпілотних літальних апаратів.

Зважаючи на те, що молярна маса хлору та фосгену більша за молярну масу повітря, найбільша концентрація цих небезпечних газів локалізується в приземному шарі атмосфери. Це дає можливість ефективно використовувати для засіву хмари хлору або фосгену легкомоторні літальні апарати, що дозволяє істотно знизити матеріальні витрати при ліквідації викиду.

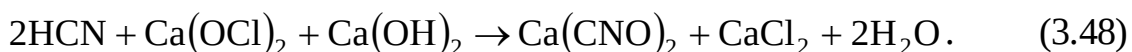
До високонебезпечних речовин, які виділяються в значній кількості при горінні, відноситься ціаністий водень (HCN). Однак у літературі зустрічається його більш розповсюджена назва – «синильна кислота». Синильна кислота є швидкодіючим смертельним агентом, що придушує

аеробний подих на клітинному рівні, перешкоджаючи клітинам використовувати кисень.

Молярна маса HCN близька до маси повітря, що сприяє швидкому поширенню газу конвективними потоками в атмосфері. Однак, виходячи з того, що температура кипіння синильної кислоти становить 26 °С, дана речовина в атмосфері перебуває у вигляді мікрокрапель або кластерів.

Крім високих токсичних властивостей, HCN має вкрай важливу особливість, що сприяє його ефективному осадженню – це висока розчинність у воді. Тому, за аналогією з методом осадження аміаку, за сприятливих для штучного ініціювання опадів метеоумов, для осадження синильної кислоти доцільно використовувати піротехнічні сполуки із кристалоутворюючими та/або гігроскопічними добавками типу ПС-3-71 або ПС-3-8.

Ціаністий водень також нейтралізується гіпохлоритом кальцію за реакцією:



Введення гідроксиду кальцію є необхідним для нейтралізації побічного продукту реакції HCl. Розрахунки показують, що для нейтралізації 1 т синильної кислоти буде потрібно 4,2 т суміші гіпохлориту та гідроксиду кальцію або 40–45 т їх 10%-го водяного розчину. Однак $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ розкладається при 175 °С, тому його неможливо використовувати в пірозарядах. При цьому такі суміші можна ефективно використати при осадженні хмари синильної кислоти без атмосферних опадів методом пневматичного розпилення з літальних апаратів [350].

Для осадження твердих аерозолів атмосферними опадами, які мають пористу структуру та гідрофобні властивості, пропонується використовувати поверхнево-активні речовини (ПАР) [355–357].

3.1.3. Моделювання динаміки процесів осадження небезпечних газоподібних речовин атмосферними опадами

При потраплянні хімічно небезпечного газу у тропосферу із природного або антропогенного джерела він може контактувати з молекулами інших газів, що містяться в атмосфері, та з поверхнями твердих і рідких часток атмосферного аерозолі. Як відомо, до складу атмосфери входить велика кількість різних газів; крім того, поверхня поділу фаз при контакті газу із частками аерозолі ініціює протікання додаткових гетерофазних реакцій. При цьому всі хімічні реакції в атмосфері протікають під дією ультрафіолетового випромінювання. Взаємодія речовин у таких складних системах характеризується великою розмаїтістю маршрутів реакції, тобто багатостадійністю процесу.

Концентрація твердих часток в атмосфері при нормальних умовах (за винятком димів, продуктів виверження вулканів та піщаних бур) порівняно невелика ($\sim 10^7 \text{ м}^{-3}$, $r \approx 10^{-2} - 10^2 \text{ мкм}$), тому ймовірність контакту НХР з такими частками низька. Концентрація рідиннофазних часток на 3 порядки більше, ніж твердих ($\sim 10^{10} \text{ м}^{-3}$, $r \approx 10^{-3} - 10^1 \text{ мкм}$); крім того, ймовірність контакту з рідким аерозолем істотно зростає при потраплянні НХР у зону хмарності ($\sim 10^{14} \text{ м}^{-3}$, $r \approx 10^{-3} - 10^3 \text{ мкм}$) [9, 12, 21]. Оскільки взаємодія на границі розподілу: газоподібна НХР/поверхня краплі виявляється істотною для атмосфери, тому цей тип хімічної взаємодії й буде розглянутий нижче.

Моделювання процесів сорбції газу рідкими аерозолями є досить складною та багатofакторною задачею. На сьогодні існує три принципово різних підходи до вирішення цього завдання. Переваги та недоліки кожного з них проаналізовано у розділі 1. Найбільшу точність математичного опису процесу абсорбції та універсальності розрахункових методів мають симуляційні моделі. Однак такі розрахунки є досить трудомісткими та вимагають значного розрахункового часу, спеціального програмного

забезпечення та значної кількості вхідних даних. Ці умови складно забезпечити в умовах ліквідації надзвичайної ситуації.

Швартц С. [358] запропонував процес абсорбції розглядати як окремі фізико-хімічні етапи. Однак математичні виведення по запропонованій моделі зроблені з деякими спрощеннями: наприклад, не враховано вплив інтенсивності потоку аерозолію на кінетику абсорбції та недостатньо уваги приділено визначенню коефіцієнта акомодациї, що в остаточному підсумку істотно звужує можливості застосування даної моделі. Тому нижче запропоновано доопрацьований та уточнений варіант моделі, описаної в [358].

Відповідно до запропонованої в [358] моделі, процес вимивання забруднюючих атмосферних газів краплями води можна розділити на кілька окремих етапів. Схематично ці етапи представлені на рис. 3.6.

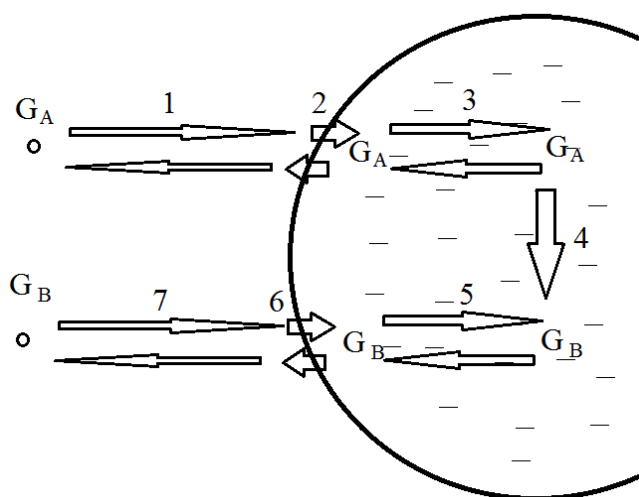


Рис. 3.6. Схема етапів абсорбції хімічно небезпечних газів краплями атмосферних аерозолів

Зміст етапів:

1. Транспортування молекул газу (G_A) до поверхні краплі за рахунок дифузії в газовій фазі;
2. Поглинання молекул газу (G_A) поверхнею краплі та досягнення рівноваги в локальній області поверхні розподілу за рахунок десорбції газу;

3. Транспортування поглинених молекул газу (G_A) в об'єм краплі за рахунок дифузії в рідині;
4. Хімічні реакції поглиненого газу (G_A) та води в об'ємі краплі з утворенням продуктів реакції (G_B);
5. Транспортування продуктів реакції (G_B) в об'ємі краплі;
6. Досягнення рівноваги в локальному об'ємі поверхні краплі за рахунок адсорбції-десорбції продуктів хімічної реакції;
7. Транспортування молекул продуктів (G_B) від поверхні краплі в газову фазу за рахунок дифузії.

Швидкість поглинання хімічно небезпечного газу атмосферним аерозолем визначається різницею швидкостей процесу десорбції V_{des} та абсорбції V_{abs} :

$$\frac{dC_g}{d\tau} = V_{des} - V_{abs}, \quad (3.49)$$

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

Відповідно до етапів 1–7 математичний вираз для швидкості абсорбції має такий вигляд [359]:

$$V_{abs} = V_{col} \cdot \alpha \cdot K_{dif} \quad \text{або} \quad V_{abs} = V_{col} \cdot \alpha \cdot K_r, \quad (3.50)$$

де V_{col} – швидкість взаємодії молекул газу із краплями води; α – коефіцієнт, що визначає ймовірність поглинання молекул газу поверхнею краплі; K_{dif} – коефіцієнт, що визначає швидкість дифузії газу усередині краплі. При протіканні хімічної реакції абсорбованого газу в об'ємі краплі коефіцієнт K_{dif} замінюється на K_r – коефіцієнт, що враховує дифузію молекул газу в краплі та швидкість хімічної реакції газу з рідиною.

Для вирішення рівнянь (3.49) нижче розглянемо особливості кожного етапу.

Кількісно зіткнення молекул газу з поверхнею краплі визначається коефіцієнтом дифузії певного газу в повітрі та імовірністю зіткнень молекул газу з поверхнею краплі. Ці параметри легко визначаються на основі положень молекулярно-кінетичної теорії, однак тут вноситься свої особливості такий параметр як розмір краплі аерозолі. У нормальній атмосфері вода в молекулярному вільному стані практично відсутня. Вільні молекули води взаємодіють або з іншими компонентами атмосфери, залежно від їхньої хімічної природи, або поєднуються у водні кластери, які можна розглядати як високодисперсний аерозоль із розміром часток до 1000 Å. В атмосфері таким часткам відповідає число Кнудсена $Kn > 1$. Такі частки характеризуються активним броунівським рухом та практичною відсутністю процесу седиментації. Тому взаємодію газів з водними кластерами можна формально розглядати як взаємодію молекул газів між собою. Таким умовам відповідають безхмарні зони нижньої тропосфери.

Для визначення швидкості вимивання отруйних газів з атмосфери нам необхідно обчислити ймовірність або частоту зіткнень молекул газів з водними кластерами. Для цього можна скористатися стандартним розподілом Максвелла [360]:

$$dP(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv, \quad (3.51)$$

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

Однак М. Смолуховським та А. Ейнштейном [361] було запропоновано більш просту модель частоти зіткнень молекул двох газів, де коефіцієнт частоти зіткнень (k_{col}) визначається з використанням коефіцієнтів дифузії:

$$k_{\text{col}}^k = 4\pi \cdot (R_g + R_k) \cdot (D_g + D_k), \quad (3.52)$$

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

Коефіцієнти дифузії молекул газів або водяних кластерів (D_g , D_k) визначаються із загального співвідношення:

$$D = D_0 \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,75}, \quad (3.53)$$

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

У випадку, коли не відомий коефіцієнт дифузії для певного газу за стандартних умов, можна скористатися напівемпіричним рівнянням Фуллера, Шетлера та Гідінгса [291]:

$$D = \frac{0,986 \cdot 10^{-8} \cdot T^{1,75}}{P \cdot \left(v_{gk}^{1/3} + v_a^{1/3} \right)^2} \sqrt{\frac{1}{M_{gk}} + \frac{1}{M_a}}, \quad (3.54)$$

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

При розмірах крапель (R_{drop}) більше 1 мкм $Kn \rightarrow 0$. При таких розмірах зіткнення з молекулами газів не чинять істотного впливу на рух крапель, та вони витають під дією повітряних потоків. У цьому випадку взаємодію газ-аерозоль можна розглядати як взаємодію молекули з нерухомою поверхнею

краплі води. Таким умовам відповідає $R_g \ll R_{\text{drop}}$ та $D_g \gg D_{\text{drop}}$, відповідно вираз (3.52) набуде вигляду:

$$k_{\text{col}}^{\text{drop}} = 4\pi \cdot R_{\text{drop}} \cdot D_g. \quad (3.55)$$

Таке співвідношення є справедливим для великих крапель у зоні хмарних атмосферних утворень, що сформувалися, та в період рясних опадів.

У діапазоні розмірів краплі 0,1–1 мкм реалізується перехідний процес, при цьому функцію розподілу можна обчислити шляхом вирішення кінетичного рівняння Больцмана, приймаючи деякі спрощення. Автори роботи [362] запропонували для таких режимів використати вирази:

$$k_{\text{col}}^{\text{m}} = \frac{4\pi \cdot D_g \cdot (R_g + R_k)}{1 + \lambda \cdot \text{Kn}}, \quad \text{де} \quad \lambda = \frac{1,33 + 0,71/\text{Kn}}{1 + \text{Kn}}. \quad (3.56)$$

Використовуючи розглянуті вище коефіцієнти k_{col} , можна визначити частоту зіткнень молекул газу із краплями аерозолі в певних умовах:

$$V_{\text{col}} = k_{\text{col}} \cdot C_{\text{drop}} \cdot C_g, \quad (3.57)$$

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

Концентрацію крапель води в одиничному об'ємі атмосфери можна прийняти постійною ($C_{\text{drop}} = \text{const}$) за умови, що краплі води тільки поглинають газ і не коагулюють між собою. Умови повної відсутності коагуляції в реальній атмосфері звичайно неможливі, однак квазіпостійна середньооб'ємна концентрація водних кластерів цілком відповідає атмосфері з постійними метеорологічними умовами, або опадам з постійною інтенсивністю.

Однак у реальній атмосфері аерозоль полідисперсний, тому в рівняння (3.57) необхідно вводити функцію розподілу краплі за розмірами $f(R_{\text{drop}})$ [363].

Наведені вище рівняння дозволяють характеризувати процес надходження молекул забруднюючих газів до поверхні краплі води на різних стадіях формування опадів, починаючи з моменту, коли ще не сформувалися хмари.

Раніше нами розглянуті закономірності частоти взаємодії молекул газу з поверхнею крапель атмосферного аерозолі. Однак молекули газу, що зіштовхнулися із краплею, проникають в об'єм через поверхневий шар товщиною $\Delta x \rightarrow 0$ з імовірністю α (коефіцієнт акомодатії). Відповідно швидкість поглинання (адсорбції) молекул газу поверхнею V_{ads} буде визначатися як:

$$V_{\text{ads}} = V_{\text{col}} \cdot \alpha. \quad (3.58)$$

Оскільки в умовах атмосфери для процесу розчинення є справедливим закон Генрі, то швидкість встановлення рівноваги в поверхневому шарі краплі з (3.58) визначається як

$$V_{\text{ads}}^{\text{H}} = \frac{V_{\text{col}} \cdot \alpha}{4\pi \cdot H \cdot R_0 \cdot T}, \quad (3.59)$$

де H – постійна Генрі; R_0 – універсальна газова стала. У роботі [358] коефіцієнт α пропонується вибрати з експериментальних даних, при цьому зазначений діапазон $\alpha \approx 10^{-2} - 1$, що звужує область застосування моделі та знижує її адекватність. Тому нами зроблена спроба розрахунку α .

Раніше відзначалося, що багато авторів при розгляді процесів абсорбції приділяють недостатньо уваги питанню визначення коефіцієнта акомодатії α . Першим процес взаємодії молекул газу з поверхнею розглянув

Кнудсен [364] та визначив міру ефективності енергообміну на границі розподілу «газ–поверхня» коефіцієнтом акомодаци α . Коефіцієнт акомодаци показує частку молекул газу, які поглинені поверхнею краплі, від загального числа молекул, що проконтактували з поверхнею краплі.

Чисельний розрахунок коефіцієнта акомодаци, з використанням загальних молекулярних законів та рівняння Максвелла, є досить складним завданням через невизначеність взаємодії молекул газу з молекулами поверхні краплі. Крім того, такі розрахунки проводяться без урахування фізико-хімічних властивостей поверхні краплі та закономірностей хімічної взаємодії газу з рідиною. Тому на цей час існує два основних підходи до вирішення завдання з визначення коефіцієнтів акомодаци.

Перший полягає в експериментальному визначенні α [365, 366]. Вказаний метод враховує всі види можливих фізико-хімічних взаємодій, однак дозволяє визначити коефіцієнт акомодаци тільки для контакту конкретного газу з конкретною поверхнею за певних умов, крім того, результати визначень α у різних дослідників дещо різняться через розходження в методиках проведення експерименту.

Другий підхід до визначення α ґрунтується на математичному програмуванні процесу адсорбції, що розглянуто вище, а також у літературних джерелах [367-370]. І хоча такий метод розрахунку α є найбільш точним, але для вирішення завдання оперативного очищення атмосфери від хімічно небезпечних газів має ряд недоліків, які зазначалися вище.

Виходячи із цього, було запропоновано більш простий розрахунковий метод, що ґрунтується на двох граничних умовах взаємодії вільної молекули газу та поверхні води. При зіткненні із краплею молекули газу з кінетичною енергією, більшою енергією зв'язку молекул води на поверхні краплі ($E_g > E_{d-d}$), розривають зв'язок H_2O-H_2O та проникають в поверхневий шар краплі. У випадку $E_g < E_{d-d}$ поверхневий молекулярний шар не руйнується та при швидкостях зіткнення, що відповідають швидкості польоту вільної молекули

газу, рідина поводить ся як нестислива та абсолютно пружна. Оскільки маса краплі набагато більше маси молекули газу ($m_g \ll m_d$), то молекула газу після зіткнення відскакує з тією ж енергією, що й була до зіткнення. Однак при відстанях менше радіуса Дебая між поверхневими молекулами краплі та молекулою газу діють сили хімічної взаємодії E_{g-d} , які притягують молекулу газу до поверхні. За умови $E_g \leq E_{g-d}$ молекула газу адсорбується на поверхні краплі. З огляду на те, що енергії молекули небезпечного газу в атмосфері розподілені за законом Максвелла-Больцмана ($f(E_g)$), на основі описаних вище міркувань нами запропоновано наступну формулу для визначення коефіцієнта акомодатії [359]:

$$\alpha = 1 - \int_{E_{g-d}}^{E_{d-d}} f(E_g, T_g) dE_g. \quad (3.60)$$

Результати розрахунків для адсорбції деяких газів на поверхню краплі води по моделі (3.60) наведені у табл. 3.5. Для порівняння в таблиці наведено дані з літератури, отримані експериментальним шляхом та за допомогою моделей KM- GAP та MD.

Таблиця 3.5

Коефіцієнти акомодатії деяких газів із поверхнею води

($T=273K$, $E_{d-d}=0,12e$)

Контактуючий газ	Значення α по моделі (3.30)	Значення α з літературних джерел	Відносна похибка, %
H ₂ O	1	0,99 [203]	1,0
CH ₄	0,11	0,12 [201]	8,3
NH ₃	0,58	0,61 [371]	3,3
NO ₂	0,72	0,75 [371]	4,0
SO ₂	0,75	0,81 [371]	7,4
HCl	0,38	0,43 [201]	9,3

Як видно з таблиці 3.5, розрахунки по моделі (3.60) трохи розходяться з літературними даними. 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 та довгострокового прогнозування метеорологічної обстановки доцільніше використати розрахункові комплекси KM-GAP та MD. У той же час при вирішенні завдань оперативного очищення атмосфери від хімічно небезпечних забруднень у разі виникнення аварій, де подібне значення похибок не критичне, а більшої значущості набувають час розрахунку та обмеженість у вихідних даних, доцільніше використати запропоновану модель (3.60).

Запропонована в роботі [358] залежність для оцінки впливу швидкості дифузії газу в об'ємі краплі багаторазово перевірена іншими дослідниками [292, 293] та показала високу адекватність експериментальним даним. Згідно [292, 293, 358] коефіцієнт, що враховує швидкість дифузії молекул газу в об'ємі краплі, визначається як

$$K_{d.a} = \frac{4H \cdot R_0 \cdot T}{\bar{v}_g} \sqrt{\frac{D_a}{\pi \cdot \tau}}, \quad (3.61)$$

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

Однак слід врахувати, що вираз (3.61) є справедливим тільки для газів, які не дисоціюють та не вступають у хімічну реакцію з рідиною краплі.

За аналогією з (3.61) можна записати вираз, що визначає дифузійну продуктів реакції:

$$K_{d.a}^r = \frac{4H \cdot R_0 \cdot T}{\bar{v}_g^r} \sqrt{\frac{D_a^r}{\pi \cdot \tau}}, \quad (3.62)$$

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

Вплив паралельного протікання в об'ємі краплі двох процесів: дифузії газу та хімічної реакції молекул газу з молекулами води, враховується коефіцієнтом K_r (3.49), що визначається як [292, 293, 358]

$$K_r = \frac{4N \cdot R_0 \cdot T}{\bar{v}_g} \sqrt{D_a \cdot \nu}, \quad (3.63)$$

де ν – константа швидкості хімічної реакції.

З урахуванням паралельного протікання процесів адсорбції та десорбції з поверхні краплі молекул газу, нами виведене рівняння для V_{des} , що визначається змістом газу в поверхневому шарі та парціальному тиску газу продуктів реакції в атмосфері (P_g) [359]:

$$V_{des} = \frac{4\pi \cdot R_0 \cdot T \cdot C_g \cdot V_{col} \cdot \alpha}{P_g}. \quad (3.64)$$

У випадку протікання в об'ємі краплі хімічної реакції (за винятком дисоціації, тому що іони дисоційованих молекул при десорбції утворюють молекули вихідного газу) з поверхні краплі відбувається десорбція продуктів реакції. Як показано вище (3.64), швидкість десорбції продуктів реакції визначається їхнім вмістом у поверхневому шарі, що змінюється залежно від швидкості їхнього утворення та дифузії до поверхні краплі [359]:

$$V_{des}^r = \frac{4\pi \cdot R_0 \cdot T \cdot C_g^r \cdot V_{abs} \cdot \alpha \cdot (K_r + K_{d,a}^r)}{P_g^r}, \quad (3.75)$$

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

На основі вищевикладеного підходу з аналізу доповненої поетапної моделі зроблено висновок про зниження швидкості абсорбції в часі та досягнення умов рівності швидкостей абсорбції та десорбції, тобто абсорбційно-десорбційна рівновага на границі газ/крапля.

Для перевірки моделі проведено розрахунковий порівняльний аналіз впливу інтенсивності потоку аерозолу на швидкість вимивання аміаку водним аерозолем (рис. 3.7) [359]. Як приклад аміак обрано з тієї причини, що для цього газу досить повно розглянуті та багаторазово перевірені моделі з використанням критеріальних рівнянь та симуляційних математичних моделей [201-203, 372].

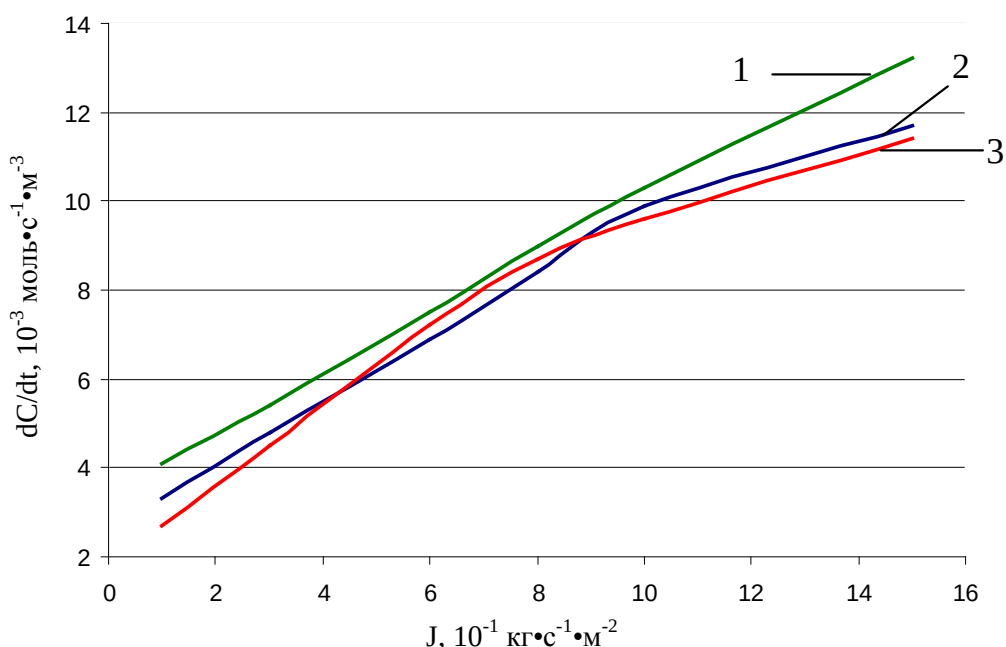


Рис. 3.7. Розрахункові залежності швидкості поглинання аміаку водним аерозолем від інтенсивності потоку: 1 – розрахунок за допомогою критеріального рівняння; 2 – розрахунок за допомогою доповненої поетапної моделі; 3 – розрахунок за допомогою симуляційної математичної моделі MD

З урахуванням сказаного раніше про те, що найбільшою точністю володіє симуляційна математична модель MD (крива 3), то з рис. 3.7 можна зробити висновок про те, що доповнена нами поетапна модель має більшу точність розрахунку, у порівнянні з результатами визначення за

критеріальною моделлю. Діапазон похибок розрахунків відносно кривої 3 становить 4–14 % для кривої 1 та 0–6 % для кривої 2. Між кривими 2 та 3 є точки перетину, що свідчить про адекватність їх у зонах $J = 4,2 \cdot 10^{-1}$ та $8,7 \cdot 10^{-1} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$. Іншим важливим моментом поетапної моделі абсорбції є те, що вона дозволяє врахувати більшість основних фізико-хімічних закономірностей абсорбції.

Необхідно враховувати, що розрахункові комплекси КМ-GAP та MD приймають при обчисленнях певні допущення, що призводить до деякої похибки, тому для адекватного порівняльного аналізу існуючих моделей необхідне проведення експериментальних досліджень.

Як видно із представлених вище залежностей (3.49)–(3.65) поетапної моделі, фізико-хімічні властивості газу істотно впливають на процес абсорбції. У зв'язку із цим у таблиці 3.6 розглянуті константи Генрі, коефіцієнт дифузії в повітрі та можливі хімічні реакції у воді для основних небезпечних газів, що потрапляють в атмосферу при аваріях.

Таблиця 3.6

Деякі фізико-хімічні властивості забруднюючих газів, що впливають на процес абсорбції ($T=273\text{K}$, $P=10^5 \text{ Па}$)

Газ	$H \cdot 10^4 [373]^*$, $\text{моль} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{Па}^{-1}$	$D_g \cdot 10^4 [291]$, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	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 в різних джерелах залежно від методу визначення

Як видно з таблиці 3.6, коефіцієнти дифузії в повітрі для різних газів відрізняються між собою несуттєво, тоді як константа Генрі деяких газів розрізняється на два – три порядки, що, безумовно, буде позначатися на кінетиці абсорбції. Для тих газів, які у воді дисоціюють на іони, коефіцієнт дифузії продуктів дисоціації у воді повинен бути дещо вище, оскільки він визначається, в основному, за продуктами реакції. Для гідратованих молекул NH_3 , COCl_2 , HCl коефіцієнти дифузії у воді будуть нижче через збільшення розмірів та маси молекул за рахунок гідратної оболонки. Надалі врахуємо ці особливості при розрахунку інтенсивності вимивання небезпечних газів опадами.

Оскільки швидкість вимивання залежить від часу, то доцільно розглядати не миттєву швидкість вимивання, а час вимивання речовини з певною початковою концентрацією. При цьому приймається, що весь газ рівномірно розподілений у приземному шарі висотою 1 км. Через десорбцію газу та можливість встановлення рівноваги повного вимивання досягти неможливо, тому задамося граничним ступенем очищення 0,9. Гранично допустимі концентрації хімічно небезпечних газів істотно відрізняються (табл. 3.7), тому для аналізу задамося початковою концентрацією $C_g^0 = 1$ моль·м⁻³. Залежність часу вимивання хімічно небезпечних речовин за різної інтенсивності опадів представлено на рис. 3.8.

Таблиця 3.7

ГДК_{сд} деяких небезпечних газів, що потрапляють в атмосферне повітря при НС [48]

Газ	NO_2	SO_2	HCl	HCN
C_g^0 , моль·м ⁻³	0,83	0,78	0,25	0,37
Газ	COCl_2	H_2S	Cl_2	NH_3
C_g^0 , моль·м ⁻³	0,033	0,24	0,65	2,35

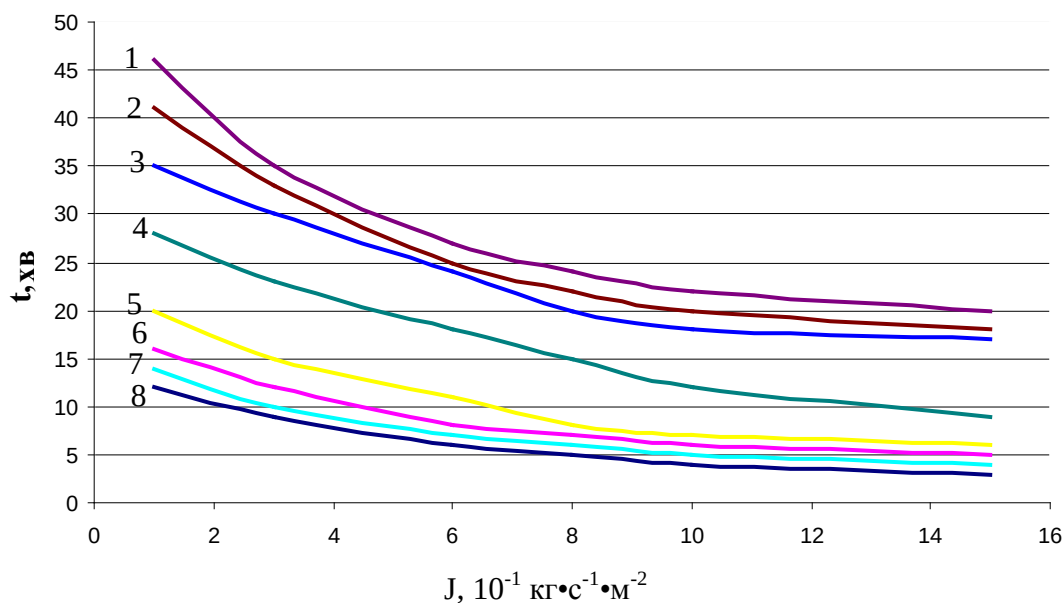


Рис. 3.8. Залежність часу вимивання небезпечних газів в атмосфері від інтенсивності опадів: 1 – NO_2 ; 2 – Cl_2 ; 3 – H_2S ; 4 – SO_2 ; 5 – HCN ; 6 – COCl_2 ; 7 – HCl ; 8 – NH_3

З рис. 3.8 видно, що час вимивання газів з атмосфери перебуває у чіткій залежності від їхньої розчинності (див. табл. 3.8), тобто чим більше розчинність газу, тим меншим є час вимивання. Найбільшу ефективність вимивання опади мають у випадку забруднення атмосфери аміаком, що пояснюється найбільшою розчинністю аміаку серед розглянутого переліку газів. Слід вказати на низьку інтенсивність вимивання хлору та сірководню, які відносяться до речовин II класу небезпеки.

Однак, зважаючи на те, що час існування представлених у табл. 3.7 речовин в атмосфері без опадів становить від декількох діб до місяця [9, 11, 21, 37, 38, 46], штучне ініціювання опадів дозволяє істотно скоротити час «життя» хімічно небезпечного газу в атмосфері, а отже, і скоротити зону забруднення.

3.1.4 Моделювання процесу осадження дисперсних небезпечних речовин із атмосфери

На характер взаємодії дисперсних часток істотно впливає розмір аерозольних часток. Характеристичним параметром розміру часток є число Кнудсена (K_n). Часткам із розміром $r_p \approx 0,1$ мкм відповідає $K_n \gg 1$. Такі частки характеризуються активним броунівським рухом та практичною відсутністю процесу седиментації. При розмірах крапель більше 1 мкм, $K_n > 0$. За таких розмірів зіткнення дисперсних часток із молекулами газів не чинять істотного впливу на рух часток, і вони переміщуються в просторі під дією повітряних потоків.

Спочатку розглянемо взаємодію дрібних крапель у хмарних утвореннях при $K_n \gg 1$, коли реалізується броунівський режим їхнього руху. Взаємодія таких часток відноситься до теплової коагуляції, теоретичні основи якої розроблені Смолуховським [205]. Відповідно до цієї теорії рівняння швидкості взаємодії має вигляд:

$$-\left(\frac{dC_p}{d\tau}\right) = K_{Br} C_d C_p, \quad (3.66)$$

де C_p – концентрація дисперсних часток в момент часу τ ; C_d – концентрація дощових крапель; K_{Br} – константа швидкості броунівської коагуляції, що визначається як

$$K_{Br} = 8\pi \cdot r_p \cdot D_p, \quad (3.67)$$

де r_d – розміри (радіус) аерозольних часток; D_d – коефіцієнти дифузії аерозольних часток. Коефіцієнти дифузії можна визначити з рівняння Стокса – Ейнштейна:

$$D = \frac{kT}{6\pi\mu_a r}, \quad (3.68)$$

де k – постійна Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹; μ_a – коефіцієнт динамічної в'язкості повітря.

Беремо до уваги, що в моделі (3.67) не враховано наявність електричного заряду у взаємодіючих часток. У початковий період можна прийняти, що заряд краплі дощу є нейтральним ($q_d = 0$) (насправді будь-яка крапля опадів має поверхневий заряд ($q_d \neq 0$) за рахунок дипольних властивостей молекул H_2O и адсорбції на її поверхні природних атмосферних іонів). Надалі з поглинанням вільних іонів заряд краплі пропорційно збільшується. Для врахування електричного заряду взаємодіючих часток в (3.67) уводиться додатковий коефіцієнт β [205]:

$$K_{Br} = 8\pi\beta r_p D_p, \quad (3.69)$$

де

$$\beta = 1 / \int_{2r_p}^{\infty} \frac{1}{L^2} \exp\left[\frac{\psi(L)}{kT}\right] dL, \quad \psi(L) = \int_L^{\infty} F(L) dL, \quad (3.70)$$

L – відстань між центрами взаємодіючих часток; $F(L)$ – електростатична сила.

Природно, що визначальну роль буде мати знак заряду взаємодіючих часток. Якщо взаємодіючі частки будуть мати різнойменний заряд, то інтенсивність коагуляції буде збільшуватися; при однойменному заряді часток спостерігається протилежний ефект.

Процес захоплення великими краплями ($K_n > 0$) більш дрібних можна віднести до гравітаційної коагуляції. Цей механізм є основним механізмом росту краплі у хмарі у період перед дощем.

Сутність механізму гравітаційної коагуляції полягає у захопленні великою краплею дощу при падінні дрібних дисперсних часток. Дрібні аерозольні частки з радіусом r_p і концентрацією C_p під дією повітряних потоків витають у повітрі ($V_0 \approx 0$). Під дією сил тяжіння краплі опадів розміром r_d рухаються вниз із деякою швидкістю V_d . При падінні великої краплі її обтікає потік повітря, що захоплює за собою дрібні аерозольні частки. Однак оскільки аерозольні частки володіють відмінною від нуля масою, на них діють інерційні сили, що прагнуть зберегти прямолінійну траєкторію. Імовірність зіткнення великої краплі із дрібною (коефіцієнт захоплення K_g) залежить від їх взаємних розмірів, в'язкості середовища (η) та швидкості руху (рис. 3.9).

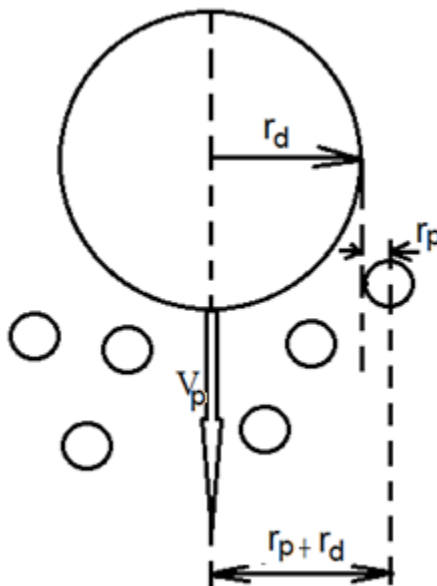


Рис. 3.9. Схема захоплення дисперсних часток краплями опадів при гравітаційній коагуляції

Опис даного процесу розглянуто в роботах [204–206, 80].

Кількість дрібних часток, які приєднує до себе одна велика крапля дощу, визначається як

$$-\left(\frac{dC_p}{d\tau}\right) = C_d \frac{\pi}{4} \int_0^R K_g \cdot (r_p + r_d)^2 \cdot V_d \cdot C_p dr_p. \quad (3.71)$$

Для визначення коефіцієнта захоплення K_g найчастіше використовується теорія подібності (для побудови напівемпіричних моделей).

В роботі [206] запропоновано модель для визначення K_g , що враховує числа Рейнольдса, Стокса та Шмідта.

Однак автором роботи [205] запропоновані більш прості моделі, результати розрахунків за якими також задовільно погоджуються з експериментальними результатами. Сутність спрощеного підходу полягає в наступному:

– при великих числах $Re > 10^4$ (турбулентний рух), коли можна не враховувати в'язкість повітря, запропонована наступна залежність:

$$K_g = \frac{(St)^2}{(St + 0,125)^2}; \quad (3.72)$$

– при малих значеннях числа $Re < 2300$ (ламінальний рух) великий вплив справляє в'язкість повітря:

$$K_g = \left(1 + \frac{3}{4} \ln \frac{2St}{St - 1,214}\right)^{-2}; \quad (3.73)$$

– для проміжних режимів руху (Re в інтервалі 2300–10 000) Ленгмюром запропоновано коефіцієнт захоплення обчислювати шляхом інтерполяції залежностей (3.72) та (3.73).

Однак жодна з розглянутих вище моделей не враховує впливу заряду часток. Перша спроба чисельного моделювання процесу коагуляції зарядженого аерозоллю виконана в роботах [374, 375]:

$$K_g = \frac{4\alpha}{1-\mu}, \quad (3.74)$$

де $\alpha = \frac{q_{sd}q_d}{24\pi^2\epsilon_0\eta r_d^2 r_p u_\infty}$, $\mu = \left(\frac{r_p}{r_d}\right)^2$, $u_\infty = \frac{2}{9} \frac{\rho g r_d^2}{\eta}$, ϵ_0 – електрична постійна; η – динамічна в'язкість повітря; ρ – густина краплі; u_∞ – потенційна швидкість падіння краплі; g – прискорення вільного падіння.

При гравітаційній коагуляції також істотну роль відіграє вид заряду взаємодіючих часток, однак цей вплив значно менший, порівняно із броунівською коагуляцією, через інерційні сили великих крапель [376].

Протікання процесу сорбції сажі та золи краплями води визначається їхніми фізико-хімічними властивостями. Оскільки частки сажі та золи мають складну структуру та хімічний склад, які залежать від виду палива та умов горіння, розглянемо окремо основні властивості сажевих часток та золи.

Великий вміст вуглецю, наявність на поверхні частки функціональних груп та висока пористість частки будуть визначати особливості абсорбції сажі рідкими опадами.

Частки золи мають зовсім відмінну від сажі хімічну природу і являють собою комплекси з оксидів металів зі сферичною пористою структурою [377] (рис. 3.10).

Хімічний склад золи також визначається видом горючої речовини та умовами горіння, однак якщо при формуванні сажі ключовими були саме умови горіння, то для золи вміст окислювача та температурний режим відіграють значно меншу роль, склад золи, в основному, визначається видом горючого матеріалу [56]. Так, якщо горючі матеріали розділити на групи, то хімічний склад золи, що утворюється при їхньому горінні, можна представити в такий спосіб [378]:

– целюлозовмісні горючі матеріали – CaO (до 40 %), SiO_2 (до 32 %), Fe_xO_y (до 20 %), Al_2O_3 (до 8 %), MgO (до 3 %), Na_2O (до 2 %), оксиди титана, марганцю, фосфору та ін. (до 1 %);

– нафтопродукти – V_xO_y (до 55 %), CaO (до 20 %), SiO_2 (до 12 %), NiO (до 8 %), Te_xO_y (до 5 %), оксиди свинцю, хрому, цинку та ін. (до 1 %);

– штучні полімери – CaO (до 32 %), SiO_2 (до 14 %), Fe_xO_y (до 8 %), V_xO_y (до 7 %), Al_2O_3 (до 4 %), MgO (до 2 %), TiO_2 (до 2 %), NiO (до 2%), оксиди свинцю, хрому, цинку та ін. (до 1 %).

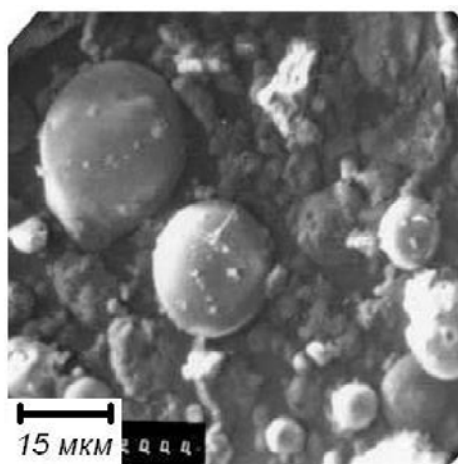


Рис. 3.10. Мікрофотографія золи

Серед оксидів заліза в золі значну частину становить магнетит (Fe_3O_4) [377] із сильними магнітними властивостями, що також впливає на процеси сорбції золи атмосферними опадами.

У роботах [379-381] встановлено, що потужними конвективними потоками, що виникають над великими пожежами, продукти горіння можуть підніматися на висоти до 10 км. Надалі, у процесі остигання повітряних потоків, на відстані ~ 1 км від осередку горіння вони осідають або, залежно від метеорологічних умов, витають на висотах до 3 км. Оскільки основні процеси опадоутворення протікають на висотах 3-5 км, то в процесі утворення опадів над зоною горіння беруть участь і аерозольні продукти горіння. Однак основна маса аерозольних часток перебуває нижче зони

опадотворення, де процес конденсації водяної пари на сажевих та зольних частках практично не протікає, а відбувається їх сорбція краплями води. Виходячи із цього, розглянемо два різних механізми – сорбцію молекул води твердою часткою аерозолі та сорбцію аерозольної частки краплею води. На вуглецевмісних частках, до яких і відноситься сажа, первинна адсорбція молекул води відбувається на активних центрах, якими можуть бути кисеньовмісні та інші функціональні групи, розглянуті вище [382]. При цьому в роботі [383] встановлено, що процес адсорбції пари води на поверхні сажі може відбуватися й за досить низької вологості, що свідчить про домінування електричної природи взаємодії функціональної групи на поверхні краплі з дипольною молекулою води. Однак електричні сили функціональних груп швидко зменшуються із відстанню, а також екрануються молекулами води, тому такий механізм конденсації дозволяє адсорбувати до 10 моношарів молекул води, після чого конденсація припиняється. Із цієї причини сажі відносяться до часток із гідрофобними властивостями та, відповідно, є малоактивними ядрами краплеутворення в атмосфері. Однак комплекси сажі, що утворилися в результаті первинної конденсації, з водяною оболонкою, повинні володіти схожими із краплями води поверхневими властивостями. При цьому розміри таких комплексів порівнянні з розмірами часток сажі та можуть досягати до $d \approx 100$ мкм. Маючи зазначені фізико-хімічні властивості, аквакомплекс часток сажі, потрапляючи у верхні шари тропосфери з відповідними метеоумовами, можуть виступати в ролі ядер краплеутворення. Тому при врахуванні впливу сажевих часток на процеси опадотворення їх можна розглядати як частки з поверхневими властивостями води. Здатність до конденсації на таких частках визначається зі співвідношення (3.14).

Крім цього, в роботі [384] встановлено, що деякі сажі мають аномально високу гігроскопічність. На думку авторів, це пояснюється наявністю на поверхні сажевих часток розчинних сірковмісних сполук. У процесі первинної конденсації на поверхні частки утворюється шар водяного розчину

сірковмісних сполук. Такі сажі утворюються при горінні нафтопродуктів та, відповідно до своїх властивостей, можуть виступати активними центрами краплеутворення. Інтенсивність конденсації води на поверхні розчинів визначається із закону Рауля (3.15) [337].

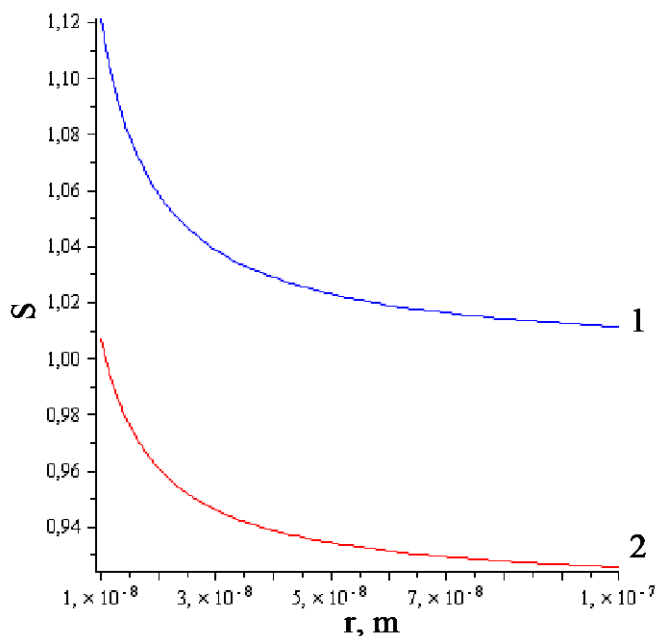


Рис. 3.11. Вплив критичного ступеня пересичення від розмірів ядра конденсації: 1 – сажа з водною оболонкою на поверхні; 2 – сажа з 10%-вим розчином сірчаної кислоти на поверхні

З рис. 3.11 видно, що сажеві частки, що містять на поверхні розчинні залишки сірчаної кислоти, мають більш низький критичний ступінь пересичення. Відповідно можна відзначити, що сажеві частки можуть виступати в ролі ядер конденсації при опадоутворенні, при цьому більшою активністю володіють частки сажі, утворені при горінні нафтопродуктів. Однак наявність кислотних залишків на сажі призводить до утворення «кислотних дощів». Поводження в зоні опадоутворення сажі від целюлозовмісних матеріалів з первинним сконденсованим шаром аналогічно поведженню великих водних крапель, які також, за певних умов, є центрами краплеутворення [378].

Вище розглядалося поведження сажі в атмосфері без врахування динаміки первинної стадії конденсації. Такий спрощений підхід можна

прийняти для реальних атмосферних умов, де на поверхні сажі, що піднімається в конвективному потоці на висоту 3–5 км (зона опадоутворення), встигає пройти первинна стадія конденсації. Для більш суворого розгляду кінетики конденсації пари на поверхні сажі необхідно володіти інформацією про фізико-хімічні властивості конкретної сажі. Як ми вже відзначали вище, ці властивості залежать як від виду горючої речовини, так і від умов горіння. Крім того, властивості окремих часток сажі в одному масиві продуктів горіння також можуть дещо відрізнятися. У зв'язку із цим завдання більш точного математичного опису процесу конденсації на частці сажі для реальних пожеж становить значні труднощі та на сьогоднішній день не вирішено.

Процес конденсації водяної пари на поверхні золи має свої особливості. Як зазначено вище, частки золи являють собою комплекси з оксидів металів. Процес гідратації таких комплексів є складним багатофакторним процесом, тому для одержання оцінних параметрів спростимо розглянутий склад. Домінуючими компонентами комплексів золи є, по-перше, CaO , SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 для продуктів горіння природних та штучних полімерів та, по-друге, V_xO_y , NiO для золи, що утворилася при спалюванні нафтопродуктів. Математичний опис кінетики гідратації навіть подвійних комплексів викликає значні труднощі та похибки, тому під час вивчення таких процесів в основному проводяться експериментальні дослідження [385], або для одержання оцінних даних з комплексу вибирається найбільш активний при реакції з водою компонент.

Як видно з реакцій (3.28)–(3.37), у результаті хімічних перетворень NO , NO_2 , SO_2 в атмосфері утворюється азотна та сірчана кислоти. Швидкість таких перетворень (v) визначається за законом діючих мас:

$$v = k \cdot C_1^{\alpha_1} \cdot C_2^{\alpha_2}, \quad (3.75)$$

де k – константа швидкості реакції; C_1, C_2 – концентрації першого та другого реагенту; α_1, α_2 – стехіометричні коефіцієнти першого та другого реагенту.

Константи швидкості реакцій (3.28)–(3.37) є довідниковими величинами, а концентрації NO , NO_2 , SO_2 можна оцінити виходячи з виду горючої речовини.

За рахунок злиття кислот із кластерами та водних кластерів між собою відбувається їх укрупнення та зниження концентрації кислоти, що веде до утворення мікрокрапель розчину азотної або сірчаної кислот. При малих розмірах мікрокрапель, коли їм відповідає число Кнудсена $\text{Kn} > 1$, вони характеризуються активним броунівським рухом та практичною відсутністю процесу седиментації. За рахунок броунівського руху вони зіштовхуються та коагулюють. За достатньої вологості, коли швидкість росту краплі за рахунок коагуляції вище швидкості випаровування рідини, відбувається укрупнення крапель.

Методика чисельного моделювання процесу броунівської коагуляції розглянута вище. Графічний вид швидкості коагуляції мікрокраплі розчинів кислот представлено на рис. 3.12 [386]. Атмосферні умови: – вологість повітря – 70 %; температура – 0 °C. Розмір водного кластера – 1000 Å.

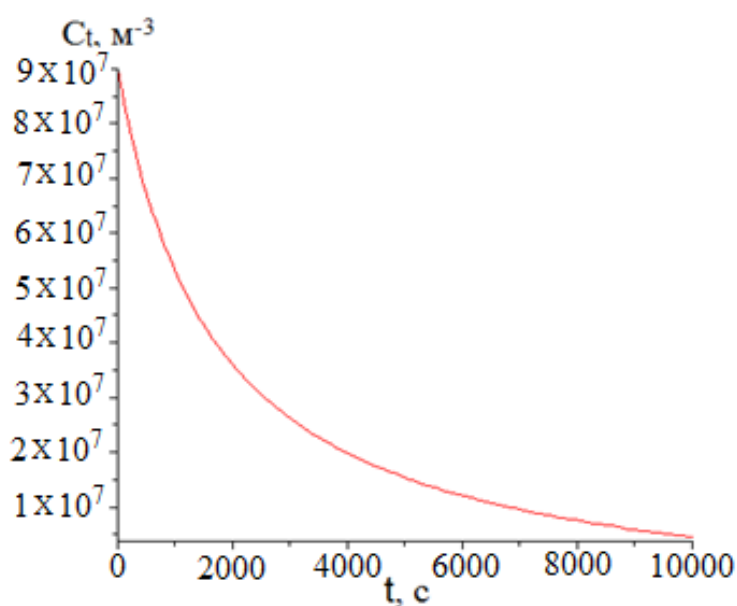


Рис. 3.12. Швидкість коагуляції водно-кислотних кластерів

З рисунка видно, що швидкість коагуляції кластерів є низькою, й тому їх укрупнення буде відбуватися в основному за рахунок конденсації на поверхні пари води за достатньої вологості повітря. Відповідно процес осадження кислоти з атмосфери починається з її переносу конвективними потоками в зону опадоутворення, звідки вона згодом випадає у вигляді «кислотних дощів».

У міру укрупнення краплі починається гравітаційна коагуляція. Докладно механізм гравітаційної коагуляції розглянутий вище.

Результати оцінних розрахунків ефективності захоплення представлені на рис. 3.13 [386].

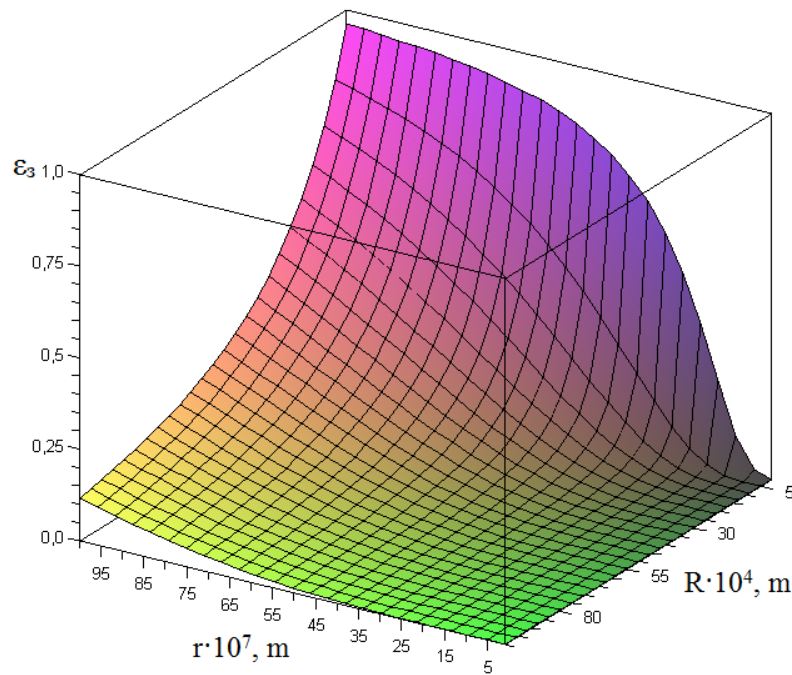


Рис. 3.13. Залежність ефективності захоплення від розмірів крапель опадів (R) та аерозольних часток (r)

Із представленої на рис. 3.13 залежності видно, що ефективність захоплення часток падає зі збільшенням розмірів краплі. Це пов'язано з тим, що великі краплі створюють навколо себе потужні обтікаючі потоки повітря, які відносять дрібні частки убік. Також слід зазначити, що в деякій області дрібних аерозольних часток залежність прагне до нуля та можна

припустити, що аерозольні частки з $r < 0,1$ мкм із атмосферними опадами практично не контактують. Внаслідок того, що утворені за рахунок броунівської коагуляції кислотні аерозолі знаходяться у межах 1 мкм, ефективність їхнього вимивання опадами досить низька.

З урахуванням ефективності захоплення, інтенсивність вимивання залежить від інтенсивності опадів, дисперсності аерозолю та його концентрації в повітрі.

Графічна залежність (рис. 3.14) демонструє підвищення ефективності вимивання зі зростанням інтенсивності опадів. Однак при цьому проявляється особливість збільшення інтенсивності вимивання зі зростанням дисперсності потоку за однакової інтенсивності опадів, що пояснюється збільшенням вільної поверхні краплі [386].

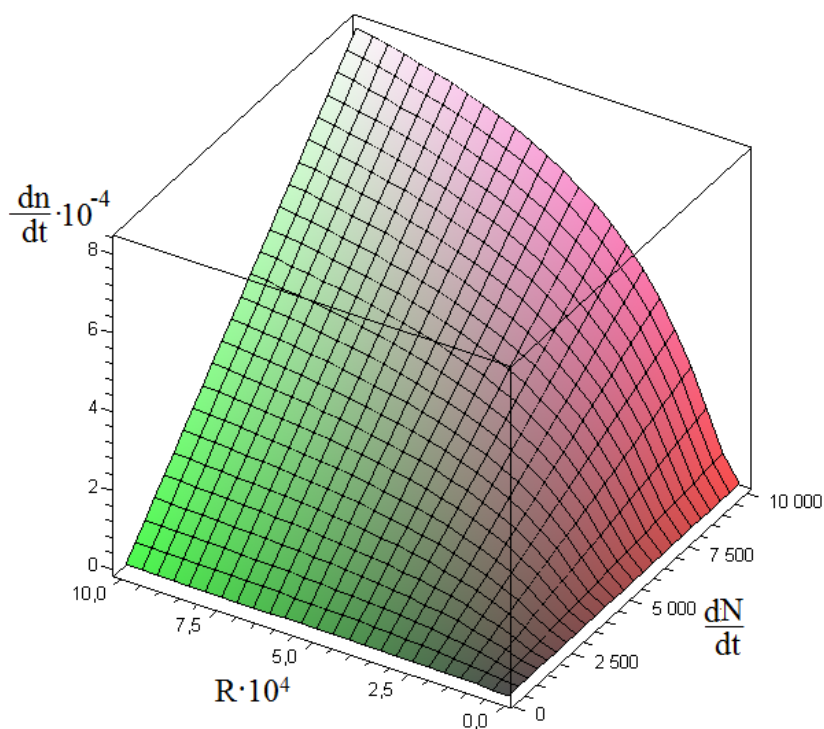


Рис. 3.14. Залежність інтенсивності вимивання аерозольних продуктів горіння ($dn/d\tau$, $r = 5$ мкм, $n_0 = 10^6$) від інтенсивності опадів (R , $d/d\tau$)

На основі закономірностей кінетики повного циклу поведінки в атмосфері продуктів горіння, які призводять до утворення кислотних рідких

аерозолів, проведено оцінку ефективності вимивання таких продуктів горіння як NO , NO_2 , SO_2 з атмосфери опадами, з урахуванням метеорологічних умов та особливостей пожежі. Отримані результати свідчать про низьку ефективність очищення атмосфери від кислотних аерозолів атмосферними опадами, що призводить до значної зони забруднення та необхідності їхньої нейтралізації.

У роботах [387-389] встановлено, що радіоактивні частки можуть накопичувати електричний заряд. Наявність у дисперсній частки електричного заряду може істотно інтенсифікувати процес сорбції радіонукліда краплями дощу [205, 390, 391].

Аналіз розчинності та гідрофобних властивостей радіоактивних часток дозволяє спрогнозувати поведінку частки після її захоплення краплею дощу (рис. 3.15).

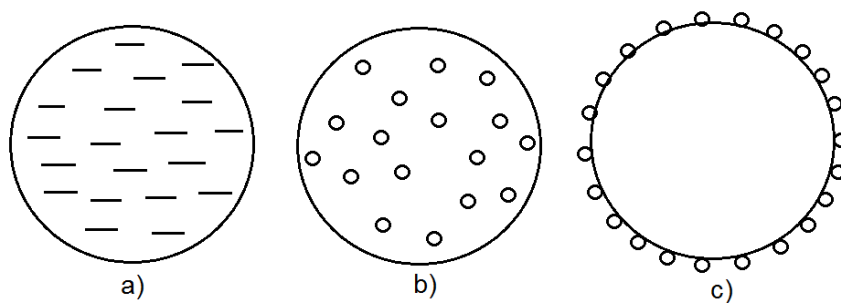


Рис. 3.15. Поглинання краплями дощу радіоактивних часток із різними поверхневими властивостями: а) розчинні радіоактивні речовини; б) гідрофільні нерозчинні радіоактивні речовини; в) гідрофобні нерозчинні радіоактивні речовини

Розчинні частки рівномірно розчиняються по всьому об'єму краплі, змінюючи при цьому її фізико-хімічні властивості (а). Процес поглинання розчинних часток значно більш інтенсивний, ніж нерозчинних – за інших рівних умов. Дисоціація кристалів солей відбувається порівняно швидко, а відведення продуктів розчинної речовини від поверхні краплі в її об'єм визначається об'ємною дифузією гідратованих іонів, що через малі розміри

часток, що дифундують, значно вище швидкості дифузії великих нерозчинних радіоактивних часток. Як відзначалося раніше, до розчинних радіоактивних часток відносяться рідкі мікрокраплі й рідкі кластери, що містять сконденсовані радіоактивні речовини. В атмосфері в якості рідкої краплі-носія виступає вода. Серед твердих розчинних радіоактивних часток основну частину становлять солі NaCl , MgCl_2 , CaSO_4 , Na_2SO_4 , K_2SO_4 та інші, які надходять в атмосферу при випаровуванні морської води та ерозії ґрунту.

Нерозчинні гідрофільні частки проникають в об'єм краплі зі швидкістю, що відповідає їх ступеню гідрофільності (b). Об'ємна дифузія таких часток визначається коефіцієнтом поверхневого натягу на границі вода/нерозчинна радіоактивна частка. За рахунок більш низької швидкості проникнення вглиб краплі адсорбованих на її поверхні радіоактивних часток, інтенсивність захоплення таких часток буде меншою, ніж розчинних часток. Основну частину твердих радіоактивних часток, які поширюються на більші відстані, становлять мікрочастинки SiO_2 з конденсованими на поверхні парами радіоактивних речовин (^{137}Cs). До нерозчинних гідрофільних часток відносяться органічний пил, пилок, мікрочастинки рослинності. Гідрофільні властивості мають частки золи, які містять продукти горіння, що утворюються при пожежах. Частки золи являють собою комплекси з оксидів металів зі сферичною пористою структурою [392, 393]. Домінуючими компонентами комплексів золи є CaO , SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 .

Основну частину радіоактивних часток у ближній зоні до епіцентру викиду становлять нерозчинні гідрофобні частки, до яких відносяться графіт та хімічно інертні «гарячі частки». Нерозчинні гідрофобні частки накопичуються на поверхні краплі (c). За рахунок високого поверхневого натягу вони не проникають углиб краплі. У граничному випадку, коли вся поверхня краплі покривається твердими частками, такі краплі за поверхневими властивостями можна розглядати як тверді радіоактивні частки. Відповідно згодом вільна площа дощової краплі буде зменшуватися, знижуючи інтенсивність захоплення радіоактивних часток. Відповідно

можна зазначити, що при інших однакових умовах, найбільша інтенсивність захоплення краплею радіоактивних часток буде в розчинних у воді часток, а найменша – у нерозчинних гідрофобних часток.

Авторами [394] встановлено утворення навколо атомів Хе сольватної оболонки, що містить у середньому близько 21 молекул води, що призводить до зниження швидкості дифузії атомів ксенону в об'ємі води. Це призводить до того, що радіоактивний ^{133}Xe не абсорбується на всю глибину великих крапель опадів за час ≈ 1 хв, і отже, крапля дощу за час падіння не встигає повністю насититися атомами ксенону.

При розгляді процесу теплової коагуляції, крім фізико-хімічних властивостей взаємодіючих часток, необхідно враховувати їх взаємний електричний заряд. Природно, що визначальну роль буде відігравати полярність зарядів. Оскільки заряд краплі дощу в основному визначається зарядом абсорбованих радіоактивних часток, то в розглянутому нами випадку приймемо однойменний заряд взаємодіючих часток, що за рахунок кулонівських сил буде перешкоджати тепловій коагуляції (рис. 3.16) [378, 395]. Взаємний заряд двох взаємодіючих часток визначається сумарною кількістю елементарних зарядів (n_e).

З аналізу проведених розрахунків можна зробити висновок, що наявність заряду істотна для дрібних часток та зі збільшенням розміру вплив заряду падає, що пов'язано із впливом розмірів часток на їх дифузійну активність. Зниження коефіцієнта теплової коагуляції з ростом розмірів радіоактивних часток пояснюється зниженням коефіцієнта дифузії. У більш дрібних часток швидкість теплової дифузії більша, а опір повітряному потоку меншим, що призводить до активної взаємодії часток.

За збільшення розміру радіоактивних часток вплив теплової дифузії падає, та при розмірах $r_{\text{гр}} > 1$ мкм нею можна знехтувати. У такому випадку напрямок та швидкість руху часток визначається тільки рухом повітряних мас та у локальному об'ємі атмосфери можна прийняти частку нерухомою. Інтенсивність коагуляції залежить від розмірів дощових крапель, розмірів

радіоактивних часток, їхньої концентрації та коефіцієнта захоплення. Розрахунок коефіцієнта захоплення проведемо з урахуванням наявності електричного заряду у взаємодіючих часток. Так само прийнемо однойменний заряд дощової краплі та радіоактивної частки. Результати оцінних розрахунків ефективності захоплення представлені на рис. 3.17 [395].

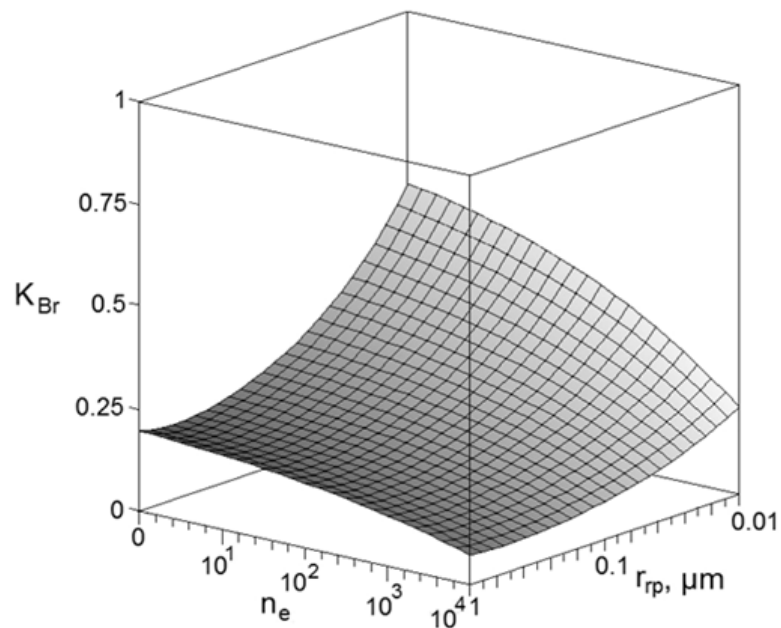


Рис. 3.16. Вплив взаємного заряду краплі дощу та радіоактивної частки (n_e) і розмірів радіоактивної частки (r_{gr}) на інтенсивність коагуляції (K_{Br}) при $r_d = 0,1$ мм, $Kn \rightarrow \infty$

На представленому рисунку видно, що ефективність захоплення часток при гравітаційній коагуляції зростає зі збільшенням розмірів радіоактивних часток. Це пов'язано з тим, що великі частки мають більші інерційні сили та не відштовхуються від падаючої краплі дощу обтікаючими повітряними потоками. Необхідно відзначити, що за рахунок інерційності часток вплив взаємного заряду до 10^4 елементарних зарядів суттєвий лише для дрібних часток. З ростом розміру радіоактивних часток вплив електростатичних сил падає, та для великих часток ($r_{gr} \approx 100$ мкм) впливом електростатичного заряду часток на інтенсивність гравітаційної коагуляції можна знехтувати.

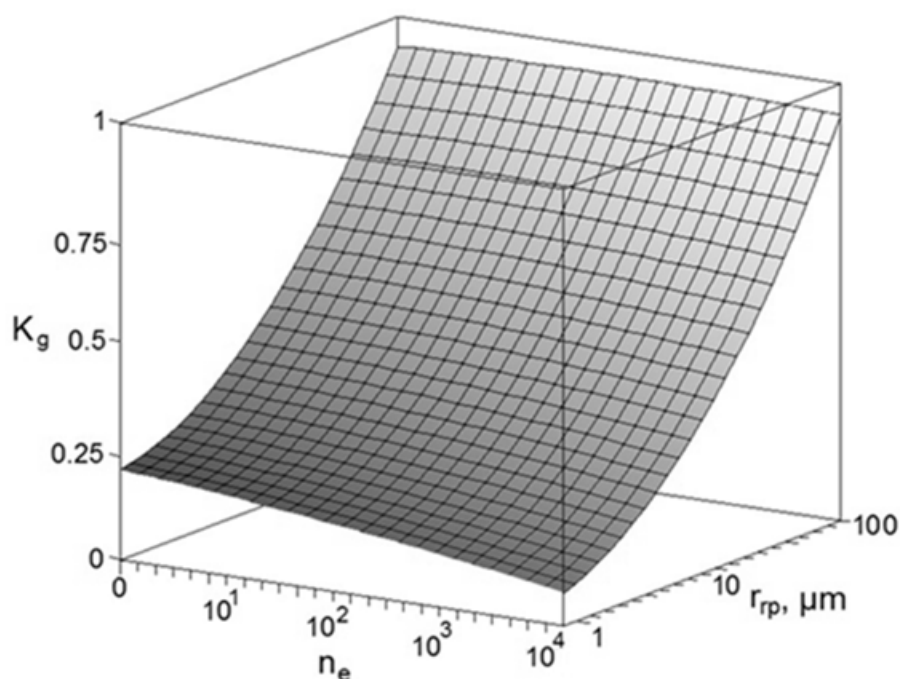


Рис. 3.17. Вплив загального заряду краплі дощу та радіоактивної частки (n_e) і розмірів радіоактивної частки (r_{gr}) на інтенсивність коагуляції при $r_d = 1$ мм, $K_n \rightarrow 0$

Якщо проаналізувати рис. 3.16 та 3.17, то видно, що найменша інтенсивність очищення атмосфери буде для радіоактивних часток з розміром у діапазонах 0,1–1,0 та 1,0–10,0 мкм відповідно. Це пов'язано з тим, що при таких розмірах теплова дифузія вже не чинить істотного впливу, опір повітря зростає, при цьому інерційних сил таких часток недостатньо для подолання омиваючого падаючу краплю дощу повітряного потоку. У зв'язку із цим частки таких розмірів обтікають дощову краплю, не контактуючи з нею. При цьому важливо відзначити, що саме в цьому діапазоні (0,1–10 мкм) перебуває основна маса радіоактивних часток, викинутих в атмосферу [100-103].

З урахуванням ефективності захоплення інтенсивність вимивання залежить від інтенсивності опадів, дисперсності аерозолю та його концентрації в повітрі, тому можна змодельовати інтенсивність вимивання аерозольних радіоактивних речовин (рис. 3.18).

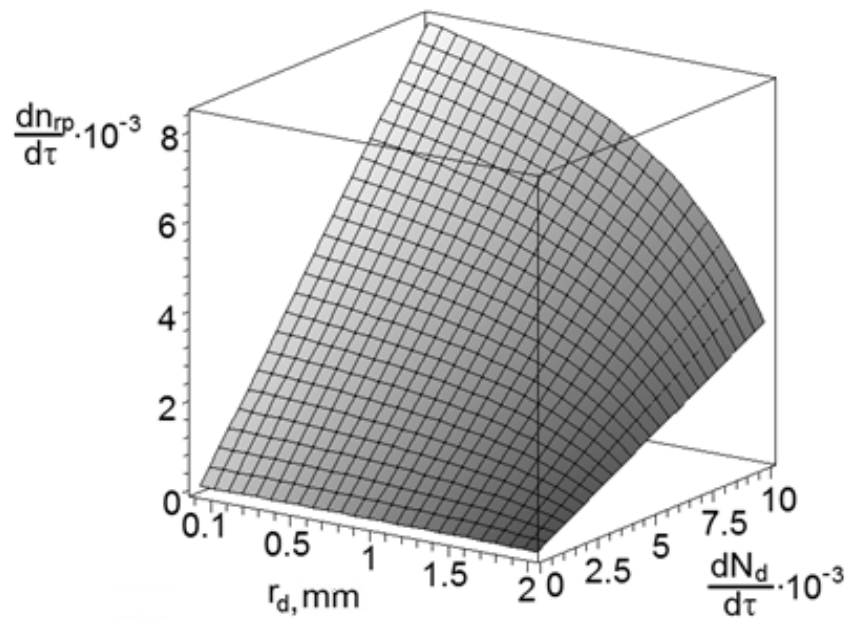


Рис. 3.18. Залежність інтенсивності вимивання аерозольних радіоактивних речовин ($dn_{rp}/d\tau$, $r_p = 5$ мкм, $n_p^0 = 10^6 \text{ м}^{-3}$) від інтенсивності опадів (r_d , $dN_d/d\tau$)

Графічна залежність (рис. 3.18) демонструє підвищення ефективності вимивання зі зростанням інтенсивності опадів. При цьому спостерігається особливість: інтенсивність вимивання збільшується зі зростанням дисперсності потоку за однакової інтенсивності опадів, що пояснюється збільшенням вільної поверхні краплі та меншою швидкістю обтікаючого повітряного потоку, що призводить до зменшення відштовхування радіоактивних часток, які перебувають на траєкторії польоту краплі.

3.1.5. Розробка математичної моделі осадження штучно ініційованими атмосферними опадами газоподібних та дисперсних небезпечних хімічних та радіоактивних речовин, що викидаються в атмосферу внаслідок надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру

Вирішуючи поставлену задачу, відмітимо, що осадження газоподібних небезпечних речовин атмосферними опадами описується залежністю (3.49):

$$\frac{dC_g}{d\tau} = V_{des} - V_{abs}.$$

Як було розглянуто вище, швидкість зміни концентрації небезпечних речовин $\frac{dC_g}{d\tau}$ визначається різницею швидкостей десорбції газу V_{des} та абсорбції газу V_{abs} . Різниця цих швидкостей є керуючим впливом на осадження небезпечних газоподібних речовин та визначає процес ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження небезпечних газоподібних речовин.

Як було описано вище, різниця швидкостей адсорбції та десорбції залежить від хімічних властивостей небезпечного газу (K_{chem}), метеорологічних умов протікання процесу осадження (K_{met}) та характеристик опадів, які, в свою чергу, визначаються способами штучного ініціювання опадів (K_{in}). Іншими словами, вплив на осадження небезпечних газоподібних речовин можна представити як функціональну залежність:

$$V_{des} - V_{abs} = f_1(K_{chem}, K_{met}, K_{in}). \quad (3.76)$$

Процес осадження небезпечних дисперсних речовин, що викидаються в атмосферу у наслідок надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, залежно від дисперсності часток описується рівняннями (3.66) або (3.71):

$$-\left(\frac{dC_p}{d\tau}\right) = K_{Br} C_p C_d$$

або

$$-\left(\frac{dC_p}{d\tau}\right) = C_d \frac{\pi}{4} \int_0^R K_g \cdot (r_p + r_d)^2 \cdot V_d \cdot C_p dr_p.$$

Ці частки, як було описано вище, можуть потрапляти в атмосферу внаслідок масштабних природних або техногенних пожеж, або при аваріях на об'єктах атомної промисловості з викидом радіоактивного графіту та пилу. Їх концентрація в атмосфері C_p визначається як інтенсивністю викиду цих речовин, так і інтенсивністю їх осадження з атмосфери штучно ініційованими опадами.

З представлених рівнянь видно, що керуючими параметрами, на які впливає процес штучного ініціювання опадів, є розмір крапель дощу (r_d) та його інтенсивність (C_d).

Поєднуючи рівняння (3.49), (3.80), (3.66) та (3.71) в одну систему, отримаємо математичну модель [350, 359]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dC_g}{d\tau} &= V_{des} - V_{abs} \\ V_{des} - V_{abs} &= f_1(K_{chem}, K_{met}, K_{in}) \\ -\left(\frac{dC_p}{d\tau}\right) &= K_{Br} C_p C_d \quad \text{при } r_p \ll 0,1 \text{ мкм} \\ -\left(\frac{dC_p}{d\tau}\right) &= C_d \frac{\pi}{4} \int_0^R K_g \cdot (r_p + r_d)^2 \cdot V_d \cdot C_p dr_p \quad \text{при } r_p \gg 0,1 \text{ мкм} \end{aligned} \right\} \cdot \quad (3.77)$$

Отримана модель дозволяє визначити швидкість осадження газоподібних та дисперсних небезпечних речовин, що викидаються в атмосферу при надзвичайних ситуаціях природного та техногенного характеру.

Таким чином, математична модель осадження штучно ініційованими атмосферними опадами газоподібних та дисперсних небезпечних хімічних та радіоактивних речовин, що викидаються в атмосферу внаслідок

надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, являє собою систему з чотирьох залежностей. Перша залежність описує процес осадження газоподібних небезпечних речовин, що викидаються унаслідок надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру. Друга залежність описує вплив на процес осадження газоподібних небезпечних речовин, хімічних властивостей небезпечного газу, метеорологічних умов та обраного управлінського рішення на атмосферні процеси. Третя та четверта залежності описують процес осадження дисперсних небезпечних речовин в широкому діапазоні розмірів, що утворюються при надзвичайних ситуаціях природного та техногенного характеру, залежно від обраного керуючого впливу на атмосферні процеси.

3.2. Керуючий алгоритм організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин

Схема керуючого алгоритму організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин представлено на рис. 3.19 [396]. Він складається із 14 блоків, розміщених на трьох ієрархічних рівнях, пов'язаних прямими та зворотними зв'язками.

На першому ієрархічному рівні знаходяться 4 блоки. На першому етапі відбувається отримання інформації про аварію або від встановлених засобів автоматичної сигналізації, або від чергової на об'єкті особи. Для проведення якісного прогнозування зон хімічного або радіоактивного забруднення необхідно отримати точну інформацію про основні метеорологічні параметри.

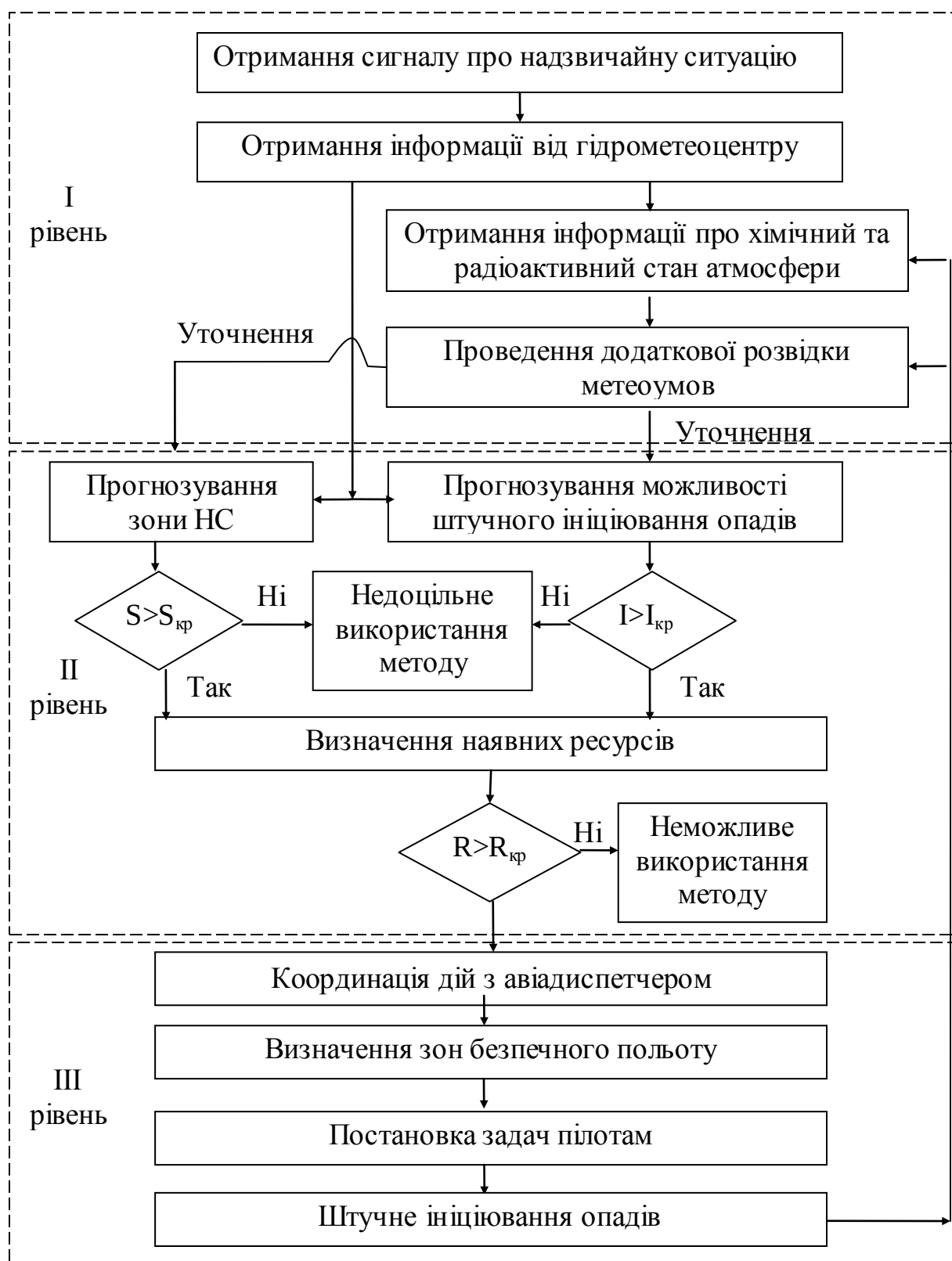


Рис. 3.19. Керуючий алгоритм реалізації організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та

техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин

Оперативну інформацію надає державна чи регіональна служба гідрометеорології. Уточнення отриманих та отримання додаткових даних про характер аварії та метеорологічні умови здійснюється шляхом проведення розвідки зони надзвичайної ситуації та метеоумов з використанням супутникових, стаціонарних та оперативних засобів моніторингу.

На другому ієрархічному рівні знаходиться 6 блоків. Володіючи даними про характер надзвичайної ситуації та метеорологічні умови, проводиться прогнозування зон ураження від надзвичайної ситуації та оцінка можливості штучного ініціювання опадів. Наступним кроком є порівняльна оцінка результатів прогнозування для визначення доцільності використання організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин.

Якщо використання методу є доцільним, то визначаємо наявні ресурси для використання організаційно-технічного методу ліквідації наслідків. За наявності необхідної кількості сил та засобів переходимо до третього ієрархічного рівня. За умов відсутності необхідних ресурсів використання запропонованого методу є неможливим.

На третьому ієрархічному рівні розташовано 4 блоки. У разі отримання управлінського рішення про використання організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин проводиться координація дій з авіадиспетчерською службою району. Після чого визначаються зони безпечних польотів та ставляться задачі пілотам по засіву хмар реагентом. З урахуванням інерційності процесу проводиться штучне ініціювання опадів.

Активні дії з виконання керівного рішення з впливом на атмосферні процеси замикають контур управління.

Таким чином, керуючий алгоритм організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин складається із 14 блоків, розміщених на трьох ієрархічних рівнях, пов'язаних прямими та зворотними зв'язками.

3.3. Описання процедур застосування організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин

Розроблений організаційно-технічний метод призначений для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин штучно ініційованими опадами.

Використання даного методу передбачає виконання наступних процедур:

1. Отримання моніторингової інформації.
2. Розрахунок часу вільного поширення зони ураження у атмосфері;
3. Визначення розмірів прогнозованої зони атмосферного ураження;
4. Проведення оцінки належності площі НС області допустимих рішень;
5. Залучення сил та засобів для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

Детальний опис процедур наведено нижче.

1. Отримання керівником ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій необхідного комплексу моніторингової інформації, яка включає: час та місце виникнення аварії; вид та кількість викинутої в атмосферу

небезпечної речовини; метеорологічні параметри атмосфери; існуючі у розпорядженні сили та засоби; характеристика району, де виникла надзвичайна ситуація (наявність небезпечних об'єктів, кількість населення, характер забудови, рельєф місцевості та ін.).

2. Розрахунок часу вільного поширення зони ураження у атмосфері τ (визначається часом від початку викидання небезпечної речовини до початку випадіння атмосферних опадів над зоною ураження):

$$\tau = \tau_{\text{виявл.}} + \tau_{\text{спов.}} + \tau_{\text{п.р.}} + \tau_{\text{збору}} + \tau_{\text{слід.}} + \tau_{\text{розгорт.}} + \tau_{\text{інерції}}, \quad (3.78)$$

де $\tau_{\text{виявл.}}$ – час виявлення надзвичайної ситуації; $\tau_{\text{спов.}}$ – час сповіщення потенційного керівника ліквідації НС; $\tau_{\text{п.р.}}$ – час прийняття управлінського рішення відповідальною особою; $\tau_{\text{збору}}$ – час збору залучених сил та засобів; $\tau_{\text{слід.}}$ – час прямування залучених сил та засобів до місця активного впливу на атмосферні процеси; $\tau_{\text{розгорт.}}$ – час розгортання технічних засобів та приготування їх до роботи; $\tau_{\text{інерції.}}$ – час інерції від початку активного впливу до випадіння опадів.

Час виявлення виникнення надзвичайної ситуації залежить від класу НС. Мінімальний час виявлення буде на об'єктах атомної промисловості за рахунок великого ступеня автоматизації. Найбільший час може бути при виявленні природних пожеж в лісах та торф'яниках. Час сповіщення потенційного керівника ліквідації НС визначається часом передачі необхідної інформації відповідним інстанціям об'єктового, місцевого, регіонального та державного рівнів. При цьому необхідно спрогнозувати можливу зону ураження за затвердженими методиками [397, 398] з урахуванням часу до початку процесу осадження забруднення. Час збору залучених сил та засобів визначається часом збору залучених людей та часом підготовки техніки до виїзду (вильоту) та до виконання поставлених задач. Для літаків $\tau_{\text{збору.}} \approx 30\text{-}40$ хв. Час прямування до місця активного впливу визначається відстанню від місць базування (L) та швидкістю руху

транспортного засобу (v). Літаки після прибуття у зону впливу відразу починають засівання хмари. Час інерції від початку активного впливу до випадіння опадів залежить від методу впливу та метеорологічних умов та перебуває в межах $\tau_{\text{інерції}} \approx 15-30$ хв.

3. Визначення розмірів прогнозованої зони атмосферного ураження.

Користуючись даними щодо інтенсивності викиду (I) та часом викиду (τ), визначається кількість викинутої речовини: $C = I \cdot \tau$.

Далі за «Методикою прогнозування наслідків розливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах та транспорті» [397] визначаються розміри зони ураження ($S_{\text{НС}}$) та її географічні координати. Відповідно до даної методики при розрахунку розмірів зони хімічного забруднення враховується кількість викинутої хімічної речовини, температура, напрямок та ступінь вертикальної стійкості повітря. У практичних підрозділах ДСНС України при розрахунках розмірів зон радіоактивного забруднення користуються методикою 1988 року [398]. Дана методика аналогічна методиці [397]. Однак в цих методиках не враховується наявність опадів в зоні НС, що призводить до звуження умов використання цих методик.

Аварійне прогнозування зон забруднення при виникненні аварії на підприємстві відіграє важливу роль для правильної організації евакуації населення й проведення аварійно-рятувальних робіт. На розміри зони хімічного та радіаційного забруднення впливають масштаб існуючої або прогнозованої аварії, вид небезпечної речовини, що викидається в атмосферу, та метеорологічні умови. Серед метеоумов, крім температури повітря, швидкості та напрямку вітру, найважливішу роль відіграє наявність та інтенсивність опадів над зоною забруднення. Виходячи із цього, проблемою, що підлягає вирішенню, є врахування впливу інтенсивності атмосферних опадів над зоною надзвичайної ситуації на розміри зон хімічного та радіаційного забруднення.

З урахуванням того, що в роботі встановлено, що атмосферні опади здатні ефективно осаджувати небезпечні хімічні та радіоактивні речовини з атмосфери, наявність опадів над зоною викиду може істотно зменшити розміри зони забруднення та знизити витрати на проведення евакуаційних та аварійно-рятувальних робіт і підвищити рівень екологічної безпеки регіону.

Вище було показано, що інтенсивність очищення атмосфери опадами залежить від інтенсивності опадів і фізико-хімічних властивостей речовин, що осаджують. У роботі [203] проведено аналіз моделей, що описують процес абсорбції газів краплями води. Модель вимивання твердих аерозольних часток, які є основними носіями радіонуклідів, розглянуто в роботі [80]. Однак загальної методики, що дозволяє використати теоретичні результати на практиці, на даний момент не створено.

Як об'єкт осадження при виникненні хімічної аварії розглянемо хлор та аміак. Ці речовини за нормальних умов перебувають у газоподібному виді та можуть поширюватися повітряними потоками на більші відстані. Виробничі та господарські запаси хлору та аміаку на території України є досить великими, що істотно підвищує ймовірність виникнення аварій. При цьому необхідно враховувати, що ці речовини відносяться до першого класу небезпеки.

Значна кількість аміаку зумовлена наявністю на території України Міжнародного аміакопроводу Тольятті-Одеса та великих підприємств хімічної промисловості в Донецькій, Луганській, Черкаській та Одеській областях. Велика кількість хлору пов'язане з наявністю в кожній адміністративно-територіальній одиниці водоочисних споруджень.

Порівняльний аналіз радіонуклідів, що потрапили в навколишнє середовище внаслідок аварій на атомних електростанціях у Чорнобилі та у Фукусімі, проведений у роботі [86]. Хімічний та кількісний склад радіонуклідів, викинутих в атмосферу при цих аваріях різний. У першу чергу це пов'язане з різними типами ядерних реакторів, характером руйнування та складом ядерного палива. Докладний аналіз фізико-хімічних

та поверхневих властивостей радіоактивних продуктів викидів проведено у параграфі 3.1.4. Відповідно при моделюванні процесу осадження радіоактивних речовин як об'єкт осадження атмосферними опадами будемо розглядати тверді аерозольні частки оксидів урану, графіту та пилу (SiO_2).

Відповідно до методики [397] геометричні розміри зони забруднення визначаються глибиною зони забруднення Γ :

– площа зони можливого хімічного забруднення:

$$S_{\text{звхз}} = 8,72 \cdot 10^{-3} \cdot \Gamma^2 \cdot \varphi; \quad (3.79)$$

– площа прогнозованої зони хімічного зараження:

$$S_{\text{пзхз}} = K \cdot \Gamma^2 \cdot N^{0,2}, \quad (3.80)$$

де φ – коефіцієнт, що умовно дорівнює кутовому розміру; K – коефіцієнт, що залежить від ступеня вертикальної стійкості повітря; N – час, на який розраховується глибина зони.

Площа та ширина прогнозованої зони хімічного зараження залежить від ступеня вертикальної стійкості повітря, що, залежно від відношення температур повітря на поверхні Землі, розділяється на конvekцію, інверсію та ізотермію. Хмарній погоді, при якій і випадають опади, відповідно до Методики, відповідає інверсія. Як видно із залежностей (3.79) та (3.80), розміри зони зараження визначаються її глибиною. Для простоти використання методики в практичній діяльності значення глибини зони хімічного зараження перелічені для певної швидкості вітру та для конкретної хімічної речовини. Наявність опадів над зоною забруднення ($\Gamma_{\text{опаді}}$) враховується шляхом введення поправочного коефіцієнта k :

$$\Gamma_{\text{опаді}} = \Gamma \cdot k. \quad (3.81)$$

Оскільки зона забруднення може мати довжину до 100 км, то опади можуть випадати не над всією зоною. Тому запропоновано розбити зону забруднення на три ділянки (рис. 3.20), за областю випадіння опадів [399].

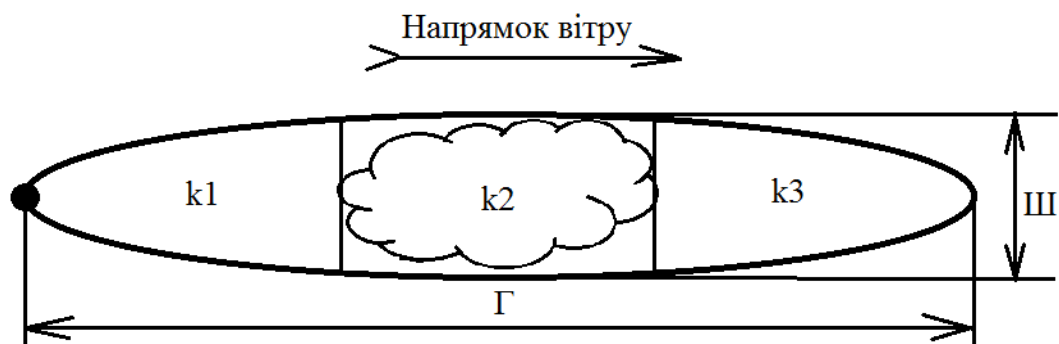


Рис. 3.20. Схема області забруднення за зонами випадіння опадів:
 k_i - поправочні коефіцієнти для конкретної зони випадіння опадів

Той самий принцип закладено й у методиці прогнозування зон радіоактивного забруднення. Єдина відмінність полягає в методі визначення ширини зони забруднення. Якщо в методиці [397] для хімічного забруднення ширина зони розраховується на основі даних глибини зони, то при оцінці розмірів зон радіоактивного забруднення [398] ширина зони вже приводиться в обчисленому табличному вигляді.

Оскільки концентрація небезпечної речовини при віддаленні від осередку викиду знижується, то й поправочні коефіцієнти є різними по зонах. Опади можуть випадати й у декількох зонах (рис. 3.20) одночасно, при цьому поправочні коефіцієнти складаються:

$$k = \frac{k_1 + k_2 + k_3}{3}. \quad (3.82)$$

Відповідно, за відсутності опадів над певною зоною, поправочний коефіцієнт для цієї зони дорівнює одиниці. Розбиття на зони дозволить

врахувати нерівномірність опадів по зоні забруднення, не ускладнюючи при цьому методику прогнозування.

Поправочні коефіцієнти k_i розраховувалися зі співвідношення:

$$k_i = \frac{\Gamma'_{i(\text{опаді})}}{\Gamma}, \quad (3.83)$$

де $\Gamma'_{i(\text{опаді})}$ – глибина зони забруднення при випадінні опадів над i -тою зоною, розрахована з використанням моделей динаміки осадження забруднень опадами.

Глибина зони визначається відстанню від джерела викиду до точки, у якій концентрація небезпечної речовини досягає гранично допустимої концентрації (ГДК). Відповідно нам необхідно визначити розподіл концентрації небезпечної речовини за напрямком вітру ($C_g(x)$) із граничною умовою:

$$x = \Gamma, C_g(\Gamma) = C_{\text{ГДК}}.$$

Основним документом, що регламентує розсіювання та визначення приземних концентрацій домішок із джерел викидів в Україні, є «Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий ОНД-86». За вказаною методикою й визначається початковий (до випадання опадів) розподіл концентрацій за напрямком вітру ($C_g(x)$ та $C_a(x)$). Методика ОНД-86 використовувалася і для розрахунків Γ та Π у методиках [397, 398]:

$$\Gamma = \sqrt{153,4 + \frac{64 \cdot M \cdot \eta}{V \cdot C_{\text{ГДК}}}} - 12,5, \quad (3.84)$$

де M – інтенсивність надходження небезпечної речовини в атмосферу; η – коефіцієнт, що залежить від рельєфу місцевості (для горизонтальної поверхні $\eta = 1$); V – швидкість вітру.

Нижче розглянемо існуючі підходи до опису динаміки осадження газоподібних та аерозольних речовин рідким аерозолем (у нашому випадку – дощем).

Кінетика абсорбції газу рідкими аерозолями є досить складною та багатофакторною. На цей час існує три принципово різних теоретичних підходи до вирішення цієї задачі. Ці підходи розрізняються рівнем точності вирішення, кількістю витраченого необхідного розрахункового часу, кількістю вхідних даних та необхідністю попередніх експериментальних досліджень.

У роботі [203] проведено порівняльний аналіз кінетичної багатошарової моделі (kinetic multilayer model for gas-particle (KM-GAP)) та моделі розрахунку молекулярної динаміки (molecular dynamics (MD) simulations) та отримано високий ступінь збіжності результатів розрахунків. І хоча для більшості математичних моделей у комплексах моделювання KM-GAP та MD приймаються деякі допущення, що спрощують розрахунок, зазначені моделі є на сьогодні найбільш точними методами чисельного розрахунку швидкості абсорбції газу рідиною. При цьому кінетична багатошарова модель дозволяє врахувати більш широке коло вихідних параметрів.

Зазначена модель дозволяє визначити зміну концентрації газу в атмосфері через швидкість абсорбції V_{abs} :

$$\frac{dC_g(x)}{d\tau} = V_{abs}, \quad (3.85)$$

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

Відповідно до [359] математичний вираз для швидкості абсорбції має такий вигляд (3.50).

Частота зіткнень молекул газу із краплями аерозолі в певних умовах:

$$V_{\text{col}} = k_{\text{col}} \cdot C_{\text{drop}} \cdot C_g(x), \quad (3.86)$$

де C_{drop} – концентрація водяних крапель у повітрі; k_{col} – коефіцієнт зіткнення, що визначається через коефіцієнт дифузії газу в повітрі D і розмір крапель дощу R [359].

З рівнянь (3.85)–(3.86) одержимо кінцеву формулу для визначення $\Gamma'_{i(\text{опаді})}$ для газів:

$$\Gamma'_{i(\text{опаді})} = \sqrt{153,4 + \frac{64 \cdot k_{\text{col}} \cdot C_{\text{drop}} \cdot \tau \cdot M \cdot \eta}{n \cdot V \cdot C_{\text{ГДК}}}} - 12,5, \quad (3.87)$$

де n – коефіцієнт, що враховує зону випадіння опадів. За умови нормального розподілу викиду від джерела та з урахуванням падіння швидкості осадження забруднюючих речовин, за зниження їхньої концентрації:

$i=1 \rightarrow n=0,75$; $i=2 \rightarrow n=0,36$; $i=3 \rightarrow n=0,12$.

Концентрація водяних крапель (C_{drop}) та їх розмір (R) визначаються інтенсивністю опадів (I), що й є основним визначальним критерієм інтенсивності осадження хімічно небезпечних речовин.

Використовуючи існуючі теоретичні моделі динаміки сорбції небезпечних речовин атмосферними опадами, доповнимо існуючі методики розрахунку зон хімічного та радіаційного зараження через 1 годину випадіння опадів (табл. 3.8, 3.9) [399].

Таблиця 3.8

Поправочні коефіцієнти для розрахунку глибини зони хімічного забруднення

Інтенсивність опадів, мм·год ⁻¹	Аміак			Хлор		
	k1	k2	k3	k1	k2	k3
0,25	0,83	0,91	0,95	0,89	0,96	0,98
0,5	0,69	0,77	0,83	0,76	0,83	0,90
1	0,57	0,68	0,76	0,64	0,72	0,81
5	0,46	0,56	0,65	0,57	0,62	0,73
10	0,38	0,47	0,58	0,49	0,57	0,68
20	0,33	0,42	0,51	0,42	0,51	0,59
30	0,27	0,36	0,44	0,37	0,44	0,52
40	0,24	0,32	0,39	0,31	0,39	0,46
50	0,21	0,27	0,35	0,28	0,32	0,38
70	0,15	0,21	0,28	0,22	0,26	0,32
100	0,11	0,14	0,22	0,18	0,22	0,25

Оскільки ширина зони набагато менше її довжини, то для розрахунку ширини зони радіаційного забруднення розбиття її на підзони є недоцільним. Для простоти використання методик та швидкості прогнозування поправочні коефіцієнти наведені в розрахованому вигляді з певним кроком інтенсивності опадів (табл. 3.8, 3.9).

Таблиця 3.9

Поправочні коефіцієнти для розрахунку глибини та ширини зони радіаційного зараження

Інтенсивність опадів, мм·год ⁻¹	Глибина зони			Ширина зони
	k1	k2	k3	
0,25	0,78	0,89	0,92	0,97
0,5	0,65	0,77	0,83	0,91
1	0,57	0,65	0,71	0,85
5	0,46	0,53	0,62	0,79
10	0,35	0,44	0,56	0,72
20	0,30	0,37	0,45	0,66
30	0,23	0,30	0,39	0,61
40	0,19	0,22	0,32	0,57
50	0,16	0,18	0,26	0,53
70	0,10	0,13	0,21	0,42
100	0,08	0,09	0,17	0,34

Як видно з табл. 3.8 та 3.9, найбільший вплив на зниження розмірів зони забруднення справляють опади над осередком викиду, де в атмосфері наявна максимальна концентрація небезпечних речовин.

З аналізу отриманих результатів видно, що інтенсивність очищення атмосфери від аміаку вище, ніж від забруднень хлору, що пояснюється більш високою розчинністю аміаку у воді. Також слід зазначити, що наявність рясних опадів над зоною викиду хімічно небезпечних речовин дозволяє зменшити її розміри більш ніж у 8 разів. При радіаційному забрудненні інтенсивність очищення атмосфери опадами ще вище за рахунок високої інтенсивності сорбції твердих аерозольних часток. І хоча опади інтенсивністю більше $50 \text{ мм} \cdot \text{ч}^{-1}$ над територією України – вкрай рідкісне явище, дощі середньої інтенсивності знижують глибину зони зараження більш ніж у 2 рази.

4. Проведення оцінки належності площі НС ($S_{\text{НС}}$) області допустимих рішень: $S_{\text{опт}} < S_{\text{НС}} < S_{\text{max}}$.

Цільовою функцією даної задачі є площа зони ураження S , яка залежить від цілого ряду параметрів. Так, залучення сил та засобів для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій розробленим в роботі методом потребує певних матеріальних витрат. Тому попередньо необхідно визначити зони прийняттого економічного ефекту від використання запропонованого методу ліквідації наслідків НС. Для оцінки економічної ефективності використання запропонованого в роботі методу проведено порівняльну оцінку екологічного збитку ($З$) від НС з економічними витратами ($В$) на ліквідацію наслідків НС. Умовою економічної доцільності буде такий вираз:

$$З \geq В. \quad (3.88)$$

Оцінка збитків від НС проводиться згідно затвердженої Постановою КМ України № 175 від 15.02.2002 р. «Методики оцінки збитків від наслідків

надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру». Згідно Методики збитки розраховуються за формулою:

$$Z = H_p + M_p + M_{\Pi} + P_c + M_{\text{тв}} + P_{\text{л/г}} + P_{\text{р/г}} + P_{\text{рек}} + P_{\text{пз}} + A_{\text{ф}} + B_{\text{ф}} + Z_{\text{ф}}, \quad (3.89)$$

де H_p – втрати життя та здоров'я населення; M_p – руйнування та пошкодження основних фондів, знищення майна та продукції; M_{Π} – невироблення продукції внаслідок припинення виробництва; P_c – вилучення або порушення сільськогосподарських угідь; $M_{\text{тв}}$ – втрати тваринництва; $P_{\text{л/г}}$ – втрати деревини та інших лісових ресурсів; $P_{\text{р/г}}$ – втрати рибного господарства; $P_{\text{рек}}$ – знищення або погіршення якості рекреаційних зон; $A_{\text{ф}}$ – забруднення атмосферного повітря; $B_{\text{ф}}$ – забруднення поверхневих і підземних вод та джерел, внутрішніх морських вод і територіального моря; $Z_{\text{ф}}$ – забруднення земель несільськогосподарського призначення; $P_{\text{пз}}$ – збитки, заподіяні природно-заповідному фонду.

Кожна складова залежності (3.89) також визначається багатьма параметрами. Якщо ретельно їх проаналізувати, то видно, що площа зони ураження впливає практично на всі складові як напрямую – в якості площі уражених населених пунктів, сільськогосподарських угідь, рекреаційних зон та ін., так і опосередковано – в якості кількості постраждалих людей та тварин, якості рекреаційних зон, що потрапили в зону ураження та ін. Детальний розрахунок збитків можна провести лише для конкретної надзвичайної ситуації, але залежність збитків від площі ураження у загальному вигляді можна представити так, як показано на рис. 3.21 [334].

Витрати на ліквідацію наслідків НС визначаються кількістю залучених сил та засобів, які, в свою чергу, визначаються виходячи із площі ураження, виду забруднюючої речовини, метеорологічних умов та існуючих у розпорядженні ресурсів. Оцінити кількість витрат на ліквідацію наслідків НС можливо лише для конкретного прикладу НС, але необхідна кількість сил та засобів від площі ураження має прямо пропорційну залежність.

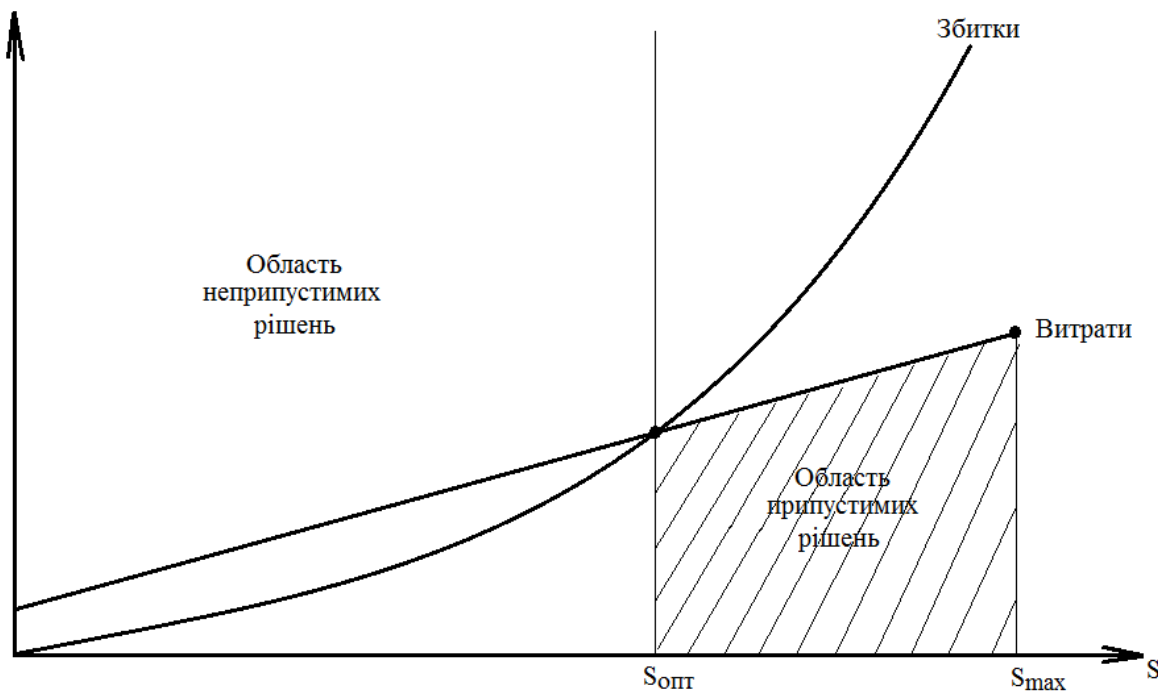


Рис. 3.21. Характер залежностей збитків (З) та витрат (В) в залежності від площі ураження від НС

Як видно з рисунка 3.21, існує площа ураження ($S_{\text{опт}}$), для якої виконується умова $З = В$. Область $S < S_{\text{опт}}$ є областю неприпустимих рішень, коли витрати на ліквідацію наслідків перевищують збитки від НС.

Виходячи з цього, значення $S_{\text{опт}}$ визначає доцільність використання запропонованого в роботі методу ліквідації наслідків НС для атмосфери. Крім цього, верхньою границею площі зони ураження є наявні в Україні людські та матеріальні ресурси для мінімізації наслідків.

5. Залучення сил та засобів для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру з викидом в атмосферу небезпечних хімічних речовин.

При аналізі резерву сил та засобів в Україні за основу візьмемо кількість літаків, придатних для застосування піропатронів. Вся авіація ДСНС України підпорядкована спеціалізованому авіаційному загону Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту, що базується у м. Ніжин Чернігівської області. САЗ ДСНС України має 4 літаки АН-32П, 1 транспортний літак АН-26 та 3 гелікоптери МІ-8. Літаки АН-32П та АН-26

за своїми ТТХ можуть виконувати задачі засіву хмар реагентом. До основних ТТХ АН-32П відносяться: вантажопідйомність – 6700 кг; дальність польоту – 2000 км; практична висота польоту – 9400 м. Але для використання в якості носія пірозарядів необхідне їх додаткове обладнання двома системами відстрілу піропатронів «АСО-2И» на 320 піропатронів.

Згідно багатьох експериментальних та теоретичних даних мінімальна витрата кристалоутворюючих реагентів подібного класу становить порядку $0,3-1,2 \text{ г/км}^2$ [304, 343]. Однак у практиці штучного ініціювання опадів рекомендується використовувати 3-5 кратний запас реагенту [309]. Відповідно при використанні розроблених в роботі пірополук, для засівання 1 км^2 хмар необхідно 15 піропатронів.

Додатковими обмеженнями є максимальна кількість піропатронів на 1 літаку – 320 шт., а також неможливість працювати в одній зоні літакам та випромінювачам.

Під час прийняття управлінського рішення відповідальна особа оцінює умову (3.88), визначається з кількістю залучених сил та засобів та діє за алгоритмом, розробленим у розділі 3.2 [396].

Розглянемо можливості використання запропонованої методики на прикладі аварії на Чорнобильській АЕС з відомими параметрами аварії. Прийнемо додаткові умови з урахуванням залучення сил та засобів САЗ ДСНС України у м. Ніжин Чернігівської області: $\tau_{\text{виявл.}} = 0 \text{ хв.}$; $\tau_{\text{спов.}} = 20 \text{ хв.}$; $\tau_{\text{п.р.}} = 20 \text{ хв.}$; $\tau_{\text{збору.}} = 20 \text{ хв.}$; $\tau_{\text{слід.}} = 17 \text{ хв.}$; $\tau_{\text{розгорт.}} = 0 \text{ хв.}$; $\tau_{\text{інерції.}} = 25 \text{ хв.}$ Таким чином, час вільного поширення радіоактивної хмари у атмосфері становить – $\tau = 102 \text{ хв.}$

Користуючись параметрами аварії у перші години [75] та методикою розрахунку зони радіоактивного забруднення [290], визначаємо площу зони ураження атмосфери через 102 хв (рис. 3.22).

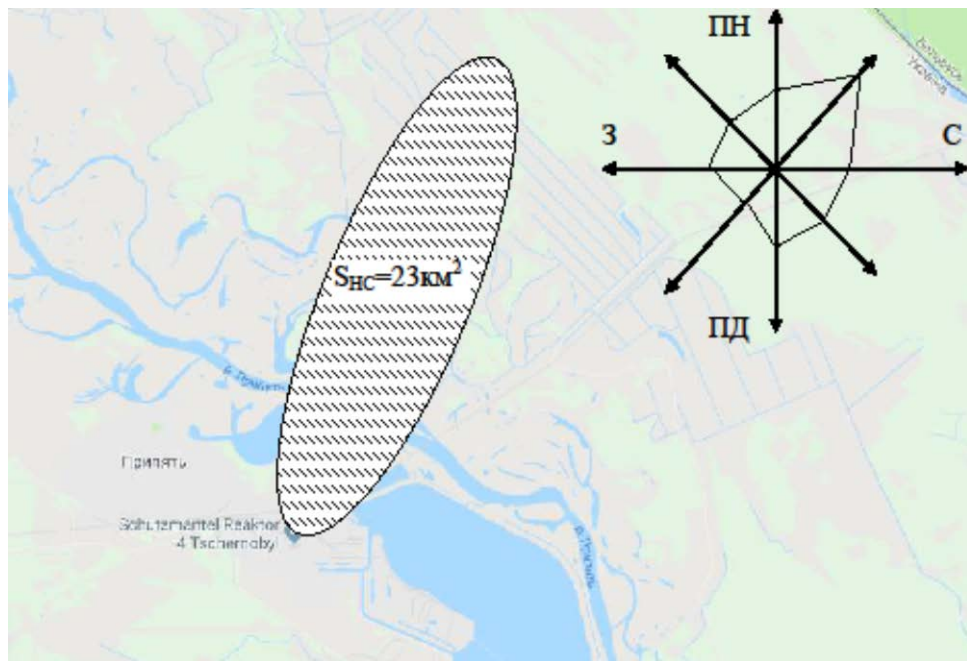


Рис. 3.22. Зона радіоактивного забруднення атмосфери під час аварії на Чорнобильській АЕС на момент 102 хв від вибуху реактора: $S_{HC} = 23 \text{ км}^2$

На даному етапі аварії виконується умова $S_{HC} < S_{max}$. Виходячи з того, що аварію не локалізовано та продовжується викид радіоактивних речовин, виконується і умова $S_{opt} < S_{HC}$.

Розрахуємо необхідну кількість піропатронів:

$$N_{п/п} = 15 \cdot 23 = 345 \text{ шт.}$$

Відповідно для мінімізації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС необхідно задіяти 2 літаки АН-32П. Однак, оскільки викид радіоактивних речовин в атмосферу зі зруйнованого реактора тривав більше 102 хв, то доречно організувати позмінну роботу груп по 2 літаки. За несприятливих метеорологічних умов для хімічного методу інтенсифікації опадів необхідно додатково оцінити можливість використання електрофізичного методу.

Таким чином, використання організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та

дисперсних речовин передбачає використання п'яти процедур, а саме: отримання моніторингової інформації; розрахунок часу вільного поширення зони ураження у атмосфері; визначення розмірів прогнозованої зони атмосферного ураження; проведення оцінки належності площі НС області допустимих рішень; залучення сил та засобів для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

Висновки по розділу 3.

1. Математична модель осадження штучно ініційованими атмосферними опадами газоподібних та дисперсних небезпечних хімічних та радіоактивних речовин, що викидаються в атмосферу внаслідок надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, являє собою систему з чотирьох залежностей. Перша залежність описує процес осадження газоподібних небезпечних речовин, що викидаються унаслідок надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру. Друга залежність описує вплив на процес осадження газоподібних небезпечних речовин хімічних властивостей небезпечного газу, метеорологічних умов та обраного управлінського рішення на атмосферні процеси. Третя та четверта залежності описують процес осадження дисперсних небезпечних речовин в широкому діапазоні розмірів, що утворюються при надзвичайних ситуаціях природного та техногенного характеру, залежно від обраного управлінського впливу на атмосферні процеси.

2. Керуючий алгоритм організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин складається із 14 блоків, розміщених на трьох ієрархічних рівнях, пов'язаних прямими та зворотними зв'язками.

3. Використання організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом

осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин передбачає виконання п'яти процедур, а саме: отримання моніторингової інформації; розрахунок часу вільного поширення зони ураження у атмосфері; визначення розмірів прогнозованої зони атмосферного ураження; проведення оцінки належності площі НС області допустимих рішень; залучення сил та засобів для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

РОЗДІЛ 4.

ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНИЙ МЕТОД ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ПРИРОДНОГО ТА ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ ШЛЯХОМ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ОСЕРЕДКІВ ІНТЕНСИВНОГО ГОРІННЯ

Вирішувати четверту задачу наукових досліджень будемо наступним чином:

Першочергово опишемо розроблену математичну модель процесу локалізації та ліквідації осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням штучно ініційованими опадами.

Далі розглянемо керуючий алгоритм організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, який реалізує розроблену математичну модель.

Після цього надамо опис процедур використання організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізації осередків природних та техногенних катастроф, що супроводжуються горінням.

4.1. Математична модель процесу локалізації та ліквідації штучно ініційованими опадами осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням

Розробляти математичну модель будемо наступним чином: по-перше, встановимо динаміку процесу краплеутворення в атмосфері на заряджених ядрах конденсації. Далі розглянемо перспективні напрями удосконалення методів штучного опадоутворення за рахунок штучної іонізації повітря. Після цього визначимо вплив кліматичних факторів на процеси локалізації та ліквідації осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним

горінням. Наступним кроком буде визначення впливу атмосферних опадів на процеси локалізації та ліквідації штучно ініційованими опадами осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням. Після цього, узагальнюючи отримані результати, розробимо математичну модель процесу локалізації та ліквідації штучно ініційованими опадами осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням.

4.1.1. Динаміка процесу краплеутворення в атмосфері на заряджених ядрах конденсації

Інтенсивність випадання опадів визначається швидкістю утворення та росту краплі в хмарі, що, у свою чергу, залежить від потоку водяної пари J до поверхні краплі. Питання опису потоку водяної пари J розглядалося нами в роботі [400]. Використовуючи дифузійну формулу Максвелла для потоку, отримаємо:

$$J = -\frac{4\pi \cdot D \cdot M \cdot r}{k \cdot N_A} \left[\frac{E_r}{T_r} - \frac{s \cdot E_\infty}{T_\infty} \right], \quad (4.1)$$

де D – коефіцієнт молекулярної дифузії водяної пари в повітрі; r – радіус краплі (ядро конденсації); M – молярна маса води, $M = 0,018 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$; k – постійна Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$; N_A – число Авогадро, $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$; s – відносна вологість повітря на досить великій відстані; E_r , E_∞ – тиск насичення водяної пари в поверхні краплі та на досить великій відстані відповідно; T_r , T_∞ – температура краплі та пари на досить великій відстані відповідно.

Підставивши рівняння (3.7), (3.13) в (4.1) та з урахуванням того, що для тропосфери $T_r - T_\infty \ll T_\infty$, отримаємо рівняння потоку водяної пари до краплі в атмосфері:

$$J = -\frac{4\pi \cdot D \cdot M \cdot r \cdot E_{\infty}}{k \cdot N_A \cdot T_{\infty}} \left[\exp\left(\frac{L \cdot M}{k \cdot N_A} \cdot \left[\frac{T_r - T_{\infty}}{T_r \cdot T_{\infty}}\right]\right) \cdot \exp\left(\frac{2\sigma \cdot M}{\rho \cdot N_A \cdot k \cdot T \cdot r}\right) - S \right]. \quad (4.2)$$

У рівнянні (4.2) перший доданок у дужках є критичним пересиченням пари $S_{\text{кр}}$, визначення якого для різних ядер розглянуто вище. Відповідно загальний вид виразу (4.2) можна представити як

$$J = -\frac{4\pi \cdot D \cdot M \cdot r \cdot E_{\infty}}{k \cdot N_A \cdot T_{\infty}} [S_{\text{кр}} - S]. \quad (4.3)$$

У наближенні постійної густини води, сферичної форми крапель та монодисперсності хмари рівняння балансу маси води в краплі має вигляд:

$$\frac{dm}{d\tau} = J, \quad (4.4)$$

де m – маса сконденсованої води, кг, $m = \frac{4\pi \cdot \rho}{3} \cdot \frac{d(r^3)}{d\tau}$. Звідси одержимо рівняння конденсаційного росту краплі в монодисперсній хмарі:

$$\frac{dr}{d\tau} = -\frac{D \cdot M \cdot E_{\infty}}{k \cdot N_A \cdot \rho \cdot T_{\infty} \cdot r} [S_{\text{кр}} - S]. \quad (4.5)$$

Рівняння підтверджує висловлені вище результати аналізу про те, що за критичної вологості повітря розміри краплі не будуть змінюватися, а за вологості менше критичної відбувається випаровування крапель. Оскільки атмосферні аерозолі за своїм складом неоднорідні, то в атмосфері при опадоутворенні відбувається перегонка пари з енергетично менш вигідних крапель на більш вигідні. Графічна залежність виразу (4.5), для різної вологості повітря та заряду ядер, представлена на рис. 4.1 [340, 401].

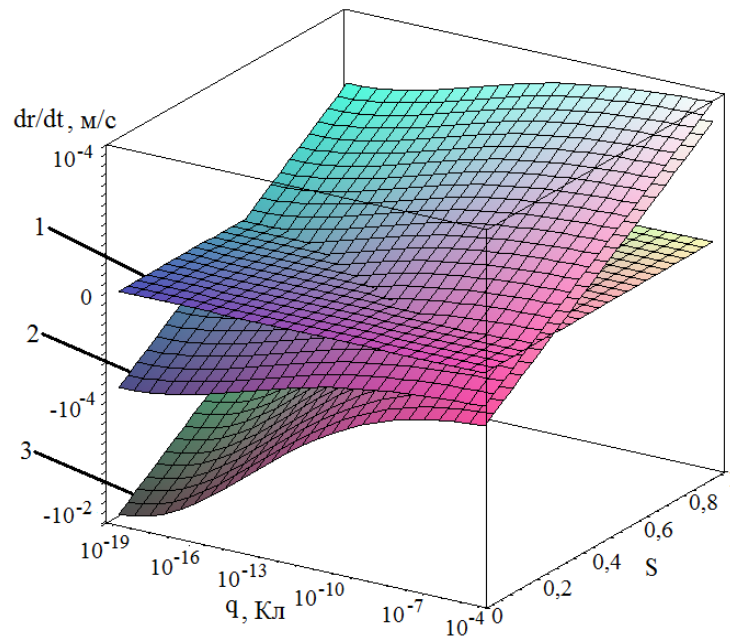


Рис. 4.1. Вплив заряду ядер конденсації (q) та вологості повітря (S) на швидкість росту краплі: 1 – $J=0 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$; 2 – тверді частинки пилу ($r=10^{-5} \text{ м}$); 3 – водяні краплі ($r=10^{-5} \text{ м}$)

За даними рис. 4.1 видно, що за вологості повітря менше 22 % для краплі води та 20 % для твердої порошини навіть при значному заряді ядра буде відбуватися випаровування рідини з поверхні ядра. Необхідно відзначити, що для твердої частки залежність швидкості осадження вологи від заряду ядра проявляється більш істотно. Якщо за малого значення заряду ядра швидкість осадження для твердої частки більш ніж в 3 рази менша, у порівнянні з водою, то при більших зарядах ядра швидкості осадження практично збігаються, що говорить про домінуючий вплив електростатичного поля на конденсацію вологи.

Вище розглянуто фізико-хімічні закономірності процесу конденсації водяної пари на ядрах конденсації різної природи. Однак при аналізі виразу (4.2) бачимо, що за тих значень електричного заряду ($q \sim 10^{-18} \text{ Кл}$) та розмірів ($r_q \sim 10^{-9} \text{ м}$), які характерні для іонів в атмосфері, вплив заряду на процес конденсації незначний. Однак Вільсон [288] ще наприкінці XIX століття експериментально промодельював процес активної конденсації на

іонах. Надалі цей процес неодноразово підтверджувався [402, 403]. Вказане протиріччя результатів теоретичного та експериментального характеру можна пояснити тим, що у виразі (4.2) враховується тільки вплив електростатичного поля на тиск насичення над поверхнею, тоді як міжмолекулярні сили взаємодії зарядженого іона та молекули води, у цьому випадку, є досить великими та ними не можна знехтувати.

У природних умовах основними джерелами іонізації є випромінювання радіоактивних речовин земної кори та космічні промені [404]. Всі іони характеризуються рухливістю.

В атмосфері легкі іони зникають не тільки за рахунок рекомбінації, але й шляхом осідання (прилипання) на нейтральних частках та важких іонах [405, 406]:

$$\frac{dn}{dt} = q - \alpha \cdot n^2 - \eta \cdot n \cdot N_0 - \gamma \cdot n \cdot N, \quad (4.6)$$

де N_0 , N – концентрації нейтральних часток та важких іонів відповідно; η , γ – коефіцієнти прилипання.

У роботі [21] наведені наступні значення коефіцієнтів прилипання для безхмарної погоди: $\alpha \approx 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$, $\eta \approx 4,3 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$, $\gamma \approx 6,5 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$.

Можливість утворення електрично заряджених водомістких атмосферних аерозольних часток додатково підтверджує висловлені автором [407] припущення про позитивний вплив іонізації на процес інтенсифікації опадоутворення.

З основних компонентів повітря атмосфери Землі найменший потенціал іонізації має кисень (табл. 4.1) [408].



Природно, що через неоднорідність поля та середовища буде

відбуватися іонізація й інших складових повітря, однак концентрація таких іонів буде значно нижче концентрації O_2^+ ; отже, надалі будемо розглядати об'єм з рівномірним розподілом молекул H_2O , O_2^+ , e^- , що справедливо для невеликого ступеня пересичення водяної пари.

Таблиця 4.1

Потенціали іонізації основних газів атмосфери

Іон, що утворився / первинна молекула	Потенціал іонізації E_i , eV
N_2^+ / N_2	15,581±0,008
N^+ / N_2	14,5341
O_2^+ / O_2	12,0697±0,0002
O^+ / O_2	13,6181
H_2O^+ / H_2O	12,621±0,002
CO_2^+ / CO_2	13,777±0,001
Ar^+ / Ar	15,759±0,001
Kr^+ / Kr	13,999±0,00001

Енергія взаємодії іона та диполя, яким є молекула води, визначається виразом [409]

$$U_{i-d} = \frac{e_i \cdot \mu_v}{l} \cdot \cos \theta, \quad (4.8)$$

де e_i – заряд іона, Кл; μ_v – момент диполя молекули води, Кл·м; l – відстань між іоном та диполем, м; θ – кут, утворений віссю між іоном та центром диполя та віссю диполя. З урахуванням виразу (4.9) вільна енергія водяної пари (3.8) набуде вигляду:

$$G_{\Pi} = (g_{\Pi} + U_{i-d}) \cdot n. \quad (4.9)$$

Відповідно критичний ступінь пересичення для конденсації пари на іоні ($e_i=q$) визначається як

$$S_{\text{и}} = \exp \left[\frac{M}{\rho \cdot N_A \cdot k \cdot T} \left(\frac{2\sigma}{r} - \frac{q^2}{32\pi^2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r^4} - \frac{\rho \cdot N_A \cdot q \cdot \mu_B}{l^2} \cdot \cos\theta \right) \right]. \quad (4.10)$$

Врахування іон-дипольної взаємодії по (4.10) істотно знижує розрахункове значення критичного ступеня пересичення при конденсації на іонах; таким чином, розбіжність між результатами теоретичних розрахунків та експериментальними даними знижується. Утворення катіонних аквакомплексів пояснюється донорно-акцепторною взаємодією катіона з молекулами води, а аніонних – водневими зв'язками [410]. Ці процеси є основою первинної гідратації. Аквакомплекси також гідратовані за рахунок водневих зв'язків. Кількість гідратацій і визначає радіус первинного кластера.

В електричному полі іона відбуваються два процеси: по-перше, наводиться додатковий дипольний момент через сили, що діють на електрони; по-друге, електричне поле прагне орієнтувати окремі молекули, створюючи результуючий момент в одиниці об'єму [411-413].

Взаємодію заряджених крапель в атмосфері можна розглядати як класичну кулонівську взаємодію заряджених сфер, нехтуючи міжмолекулярною взаємодією, через їхню малість у масштабах краплі, тобто коагуляція відбувається тільки при взаємодії різнойменно заряджених крапель. Однак у більшості випадків у краплях великих розмірів ($r > 10^{-6}$ м) заряди по поверхні краплі розподілені нерівномірно [339, 414, 415] (рис. 4.2).

Нерівномірний розподіл заряду по поверхні краплі збільшує ймовірність злиття краплі в об'ємі, а отже, збільшує швидкість коагуляції аерозолі в цілому.

Врахування енергії іон-дипольної взаємодії в загальній вільній енергії водяної пари дозволяє уточнити теоретичне значення ступеня критичного пересичення пари для її конденсації на зарядженому ядрі. Розрахований на основі теорії гідратних аквакомплексів розмір первинного водяного кластера на іоні показав, що розміри гідратованого іона перевищують критичні

розміри рідкого ядра конденсації, що дозволяє подолати найбільш енергоємний етап конденсації пари – утворення рідкого ядра конденсації. Отримані результати підтверджують можливість ефективного використання штучної іонізації області атмосфери з метою інтенсифікації випадання опадів.

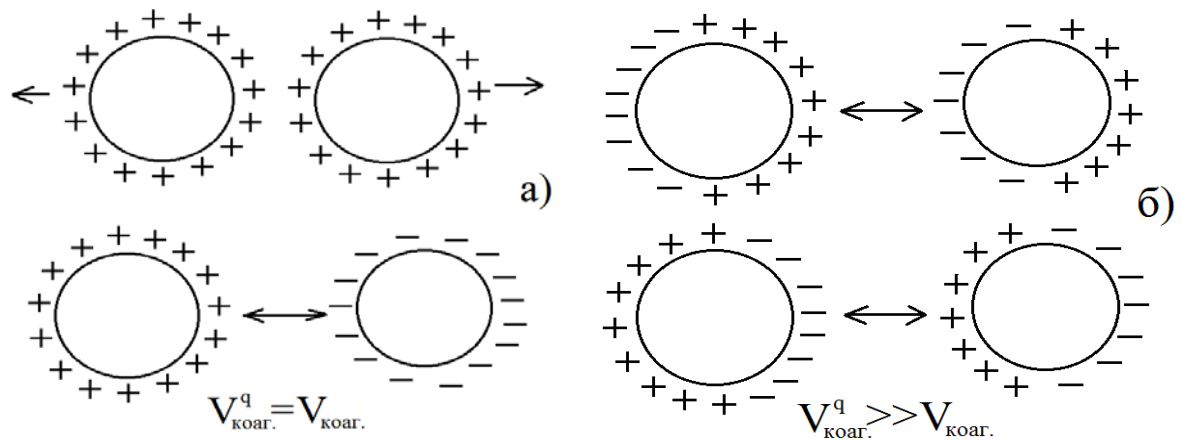


Рис. 4.2. Взаємодія заряджених крапель аерозолі з рівномірним (а) та нерівномірним (б) розподілом заряду по поверхні

Для забезпечення максимальної інтенсивності краплеутворення розглянемо щільне пакування одиничного об'єму атмосфери кулями з радіусом r_a . Згідно [415] коефіцієнт щільності заповнення об'єму сферами однакового радіуса становить $\pi/\sqrt{18}$. Відповідна концентрація іонів в атмосфері для штучного опадоутворення має значення $C_i^{\text{щіль}} \approx 1,8 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$. Максимальне значення концентрації іонів O_2^+ досягається при повній іонізації всіх молекул кисню в атмосфері. Так, для висоти 1 км та за температури $T=273 \text{ К}$ – $C_i^{\text{max}} \approx 5,6 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}$ [416].

Разом з тим у параграфі 3.4 встановлений максимальний розмір кластеру води, здатного утворитися на одному іоні O_2^+ , що становить $r_{\text{кл}} = 0,137 \text{ мкм}$, у який входять $N_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{кластер}} \approx 3,8 \cdot 10^9$ молекул води. Враховуючи, що концентрація кластерів відповідає концентрації іонів ($C_i = C_{\text{кластер}}$),

необхідна концентрація іонів для поглинання максимально можливої кількості води в одиничному об'ємі залежить від вологості та визначається як

$$C_i^{\text{необх.}} = \frac{f_T^{\text{max}} \cdot N_A}{M \cdot N_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{кластер}}} \cdot (S - S_{\text{кр}}), \quad (4.11)$$

де f_T^{max} – максимальна абсолютна вологість за температури T ; S – початкова відносна вологість атмосфери; $S_{\text{кр}}$ – критична відносна вологість атмосфери, при якій ($r_{\text{кр}} > r_{\text{кл}}$) [417].

Приймаючи за граничну умову $r_{\text{кр}} = r_{\text{кл}}$, критична відносна вологість визначається [417] з виразу:

$$S_{\text{кр}} = \exp \left[\frac{M}{\rho \cdot N_A \cdot k \cdot T} \left(\frac{2\sigma}{r_{\text{кл}}} - \frac{q^2}{32\pi^2 \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot r_{\text{кл}}^4} - \frac{\rho \cdot N_A \cdot q \cdot \mu_v}{4\pi \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot l^2 \cdot M} \cdot \cos\theta \right) \right], \quad (4.12)$$

де ρ – густина води; σ – коефіцієнт поверхневого натягу.

Для іонів O_2^+ критична відносна вологість становить $S_{\text{кр}} = 0,47$, і тому є межею застосування різних методів штучного збільшення концентрації іонів для стимуляції опадоутворення в атмосфері. Для прикладу межа застосування методу засівання області атмосфери хімічно активними солями (AgI) становить 0,6-0,75, і при цьому вплив можливий лише на вже сформовані хмари [21, 289, 417].

Далі розглянемо процеси конденсації на іонах при $S > S_{\text{кр}}$. У цьому випадку можна виділити кілька етапів (рис. 4.3).

У природі в перехідних випадках можуть бути наявні ознаки декількох станів одночасно, однак ми розглянемо ідеалізовані варіанти (рис. 4.3). З урахуванням низької концентрації суміжних станів, таке припущення є цілком справедливим.

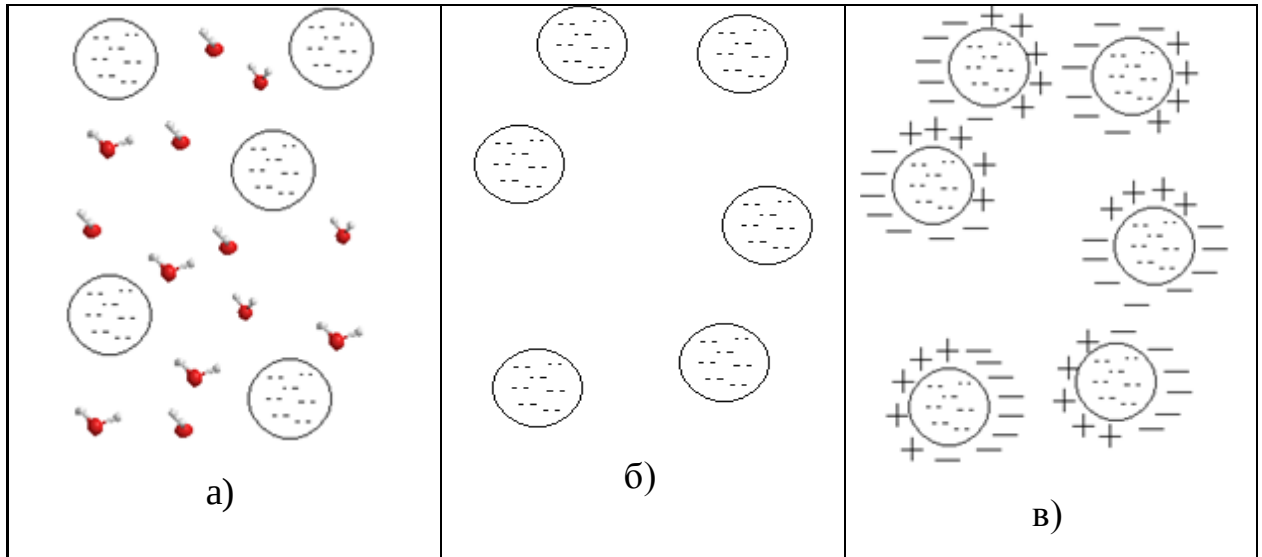


Рис. 4.3. Різні стани об'єму водяної пари з різною вологістю при конденсації на іонах: а) $C_i < C_i^{\text{необх.}}$; б) $C_i = C_i^{\text{необх.}}$; в) $C_i > C_i^{\text{необх.}}$.

За умови, що концентрація іонів менше необхідної ($C_i < C_i^{\text{необх.}}$), крім кластерів на іонах, в об'ємі атмосфери наявні вільні молекули води, які за даної вологості ($S > S_{\text{кр}}$) можуть конденсуватися на поверхні кластера. Зазначений варіант є характерним при впливі на вже сформовані хмари. У цьому випадку інтенсивність опадів визначається кількістю утворених кластерів та швидкістю росту розміру краплі за рахунок конденсації пари на кластер та їх коагуляції [21, 289]:

$$\frac{dr}{d\tau} = \left(\frac{dr}{d\tau} \right)_{\text{kond}} + \left(\frac{dr}{d\tau} \right)_{\text{koag}} = \frac{D \cdot M \cdot P_{\infty}}{k \cdot N_A \cdot \rho \cdot T_{\infty} \cdot r} [S - S_{\text{кр}}] + \frac{\pi}{4} \int_0^R K_g \cdot (r_{\text{sd}} + r_d)^2 \cdot V(r_d) \cdot n(r_{\text{sd}}) dr_{\text{sd}}. \quad (4.13)$$

Виходячи з того, що перша та друга складові рівняння (4.13) мають різний ступінь залежності від радіуса краплі, можна зробити висновок, що доданки порівнянні лише на вузькому діапазоні розмірів (від 15 до 50 мкм). Графічна залежність швидкості краплеутворення від розмірів краплі представлена на рис. 4.4.

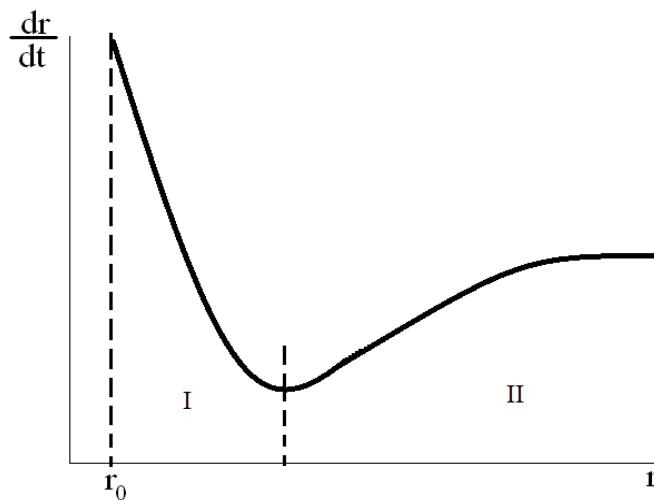


Рис. 4.4. Вплив розміру краплі на швидкість краплеутворення

На рис. 4.4 видно, що якщо ядро конденсації не досягає певного критичного розміру r_0 , то конденсація не відбувається. Це пов'язано з тим, що різниця вільних енергій пари та конденсованої води має екстремум по радіусу краплі $\left[\frac{d(\Delta G)}{dr} = 0 \right]$. Представлену нижче залежність також можна розділити на дві ділянки. Першій ділянці відповідає домінуюча роль процесу конденсації, а на другій ділянці починає переважати процес коагуляції.

У випадку, коли $C_i = C_i^{\text{необх.}}$, за рахунок утворення кластера вологість падає до критичного значення. За таких умов вільні молекули, що залишилися, не здатні конденсуватися на кластерах, тому краплеутворення відбувається тільки за рахунок коагуляції кластерів та визначається початковою кількістю кластерів та інтенсивністю їхньої коагуляції. Інтенсивність росту краплі при описаному процесі визначається другою складовою рівняння (4.13).

Якщо за зниження вологості до критичного значення на деяких іонах встигають сформуватися повноцінні кластери, але в атмосфері наявні додаткові вільні іони ($C_i > C_i^{\text{необх.}}$), то ці іони будуть осідати на поверхні сформованих кластерів, передаючи їм свій заряд. Коагуляція відбувається тільки при взаємодії різноіменно заряджених крапель. Однак у більшості

випадків у краплях більших розмірів ($r > 10^{-6}$ м) заряди по поверхні краплі розподілені нерівномірно [21, 289], і в спрощеному варіанті заряджену краплю можна розглядати як диполь. У цьому випадку інтенсивність коагуляції заряджених крапель визначається [331] виразом:

$$\left(\frac{dr}{d\tau}\right)_{\text{koag}}^q = \frac{\pi}{4} \int_0^R K_g \cdot (r_{sd} + r_d)^2 \cdot V(r_d) \cdot n(r_{sd}) \cdot \left(\frac{\lambda \cdot \exp \lambda}{\exp \lambda - 1}\right) dr_{sd}, \quad (4.14)$$

де $\lambda = \frac{q^2}{2r \cdot k \cdot T}$ – коефіцієнт, що враховує кулонівське тяжіння різнойменно заряджених часток.

У всіх перерахованих вище випадках зростання краплі відбувається до розміру $r \approx 1-3$ мм [21, 289] з наступним їх випадінням. На рис. 4.5 у графічному вигляді об'єднані отримані залежності інтенсивності опадів [340].

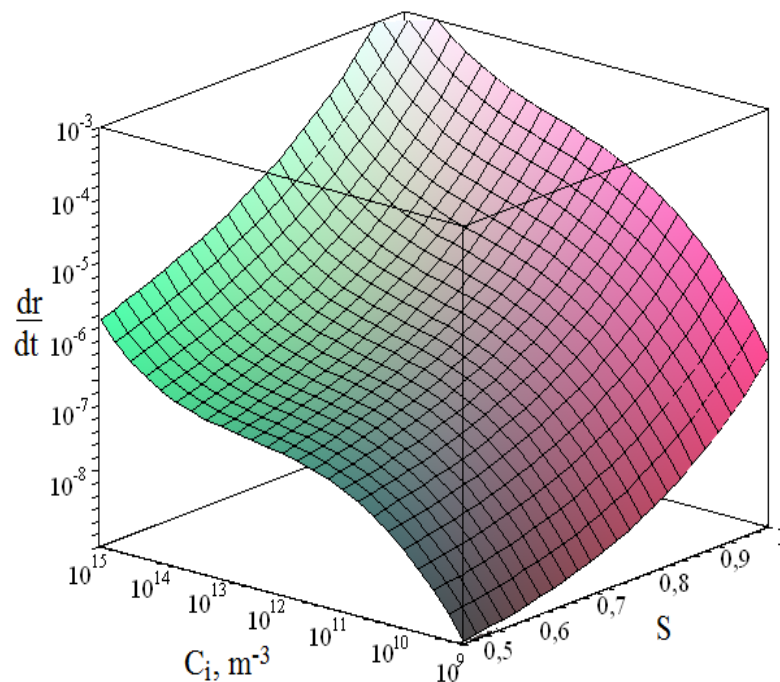


Рис. 4.5. Залежність швидкості краплеутворення від вологості повітря та концентрації іонів

З рис. 4.5 видно, що при концентраціях іонів 10^{11} – 10^{13} м⁻³ відбувається стабілізація швидкості краплеутворення. Це пояснюється тим, що при збільшенні концентрації в цій області не відбувається істотного збільшення концентрації кластерів. Залежність швидкості зростання розміру краплі від концентрації іонів має три ділянки, кожна з яких відповідає певному стану об'єму пари (10^9 (фонове значення) – 10^{11} м⁻³ (відповідає $C_i < C_i^{\text{необх.}}$); 10^{11} – 10^{13} м⁻³ відповідає $C_i \approx C_i^{\text{необх.}}$; більше 10^{13} м⁻³ відповідає $C_i > C_i^{\text{необх.}}$ (рис. 4.2). З аналізу випливає, що збільшення концентрації іонів вище 10^{11} м⁻³ є недоцільним, тому що не приводить до істотного збільшення інтенсивності опадів.

Вперше враховано енергію іон-дипольної взаємодії в загальній вільній енергії водяної пари, що дозволило уточнити теоретичне значення критичного ступеня пересичення пари в процесі її конденсації на зарядженому ядрі. На основі теорії формування аквакомплексів розраховано розмір первинного водяного кластера, сформованого на іоні, що дозволяє подолати найбільш енергоємний етап конденсації пари – утворення рідкого ядра конденсації та підвищити точність прогнозування динаміки процесу опадоутворення. Теоретично визначено діапазон значень концентрації іонів, необхідний для штучного ініціювання опадів. На основі цих результатів отримано залежності, що дозволяють оцінити інтенсивність опадів за певної вологості повітря та концентрації іонів в атмосфері.

4.1.2. Перспективні напрями удосконалення методів штучного опадоутворення

Як відзначалося в параграфі 4.1.1, найбільш активними центрами краплеутворення в атмосфері є заряджені частки (іони). Крім штучного введення заряджених ядер конденсації за допомогою хімічних реагентів, існують різні електрофізичні методи штучної іонізації компонентів повітря.

Перспективним методом штучної іонізації повітря є вплив на локальний об'єм потужного електромагнітного випромінювання [418]. Сутність даного методу полягає у тому, що іонізація повітря відбувається за рахунок передавання вільним молекулам та електронам у зоні впливу енергії електромагнітного випромінювання від наземних джерел. Перевагою вказаного способу є можливість створювати додаткові іони на значному віддаленні від випромінювача. Передбачається, що іонізована область буде створюватися за рахунок високочастотного пробою повітря. Для пробою та наступної підтримки іонізації використовуються сфокусовані пучки радіохвиль. Іонізація створюється в області перетинання пучків. Пробій здійснюється коротким радіоімпульсом.

У роботах [418, 419] розглянуто застосування зазначеного способу для штучної іонізації верхніх шарів атмосфери (30-60 км та іоносфери), однак основні принципи запропонованого способу можуть використовуватися й для штучної іонізації тропосфери.

При аналізі технічних засобів електрофізичного впливу на атмосферні процеси основними параметрами, що визначають можливість їх використання, є потужність випромінювача та діапазон його робочих частот.

Іонізувати повітря на висоті хмароутворення (1–5 км) на площі до 10 км^2 принципово можливо шляхом опромінення зони впливу пучками потужного електромагнітного випромінювання (рис. 4.6) [420].

Для пробійної іонізації, розглянутої в роботах [418], необхідні надвисокотужні випромінювачі, що споживають значні кількості енергії (за напруженості поля $\sim 2 \text{ МВ} \cdot \text{м}^{-1}$), тому актуальним у цьому способі є розгляд шляхів зниження енергоємності процесу.

Потенціал іонізації нейтральних молекул та атомів в атмосфері $\varepsilon_i \sim 10 \text{ еВ}$ (наприклад, для первинної іонізації молекули кисню $\text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^+$ $\varepsilon_i = 12,07 \text{ еВ}$). З аналізу функції розподілу електронів по енергіях у нормальних умовах існує близько 10^{-5} м^{-3} високоенергетичних електронів [421], здатних до іонізації. Процес іонізації швидкими електронами робить

свій внесок у фонову концентрацію позитивних іонів в атмосфері – 10^8 – 10^9 м^{-3} [21].

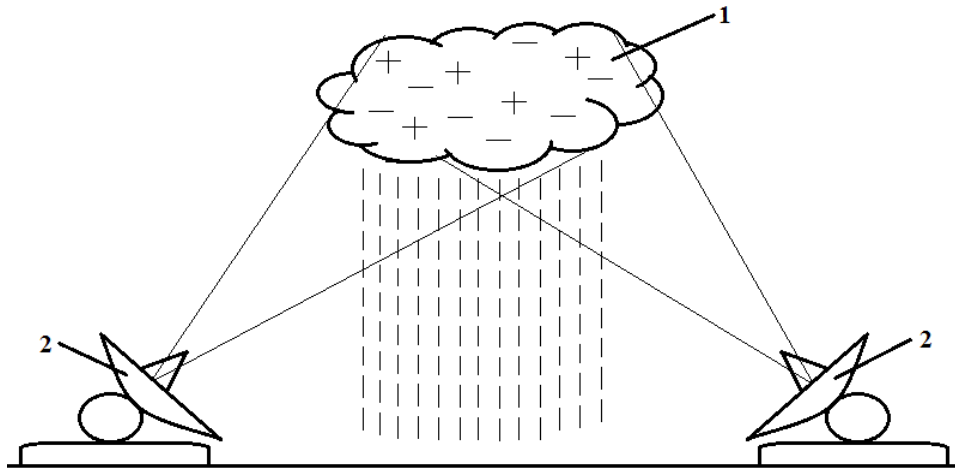


Рис. 4.6. Схема дистанційного впливу на процеси опадоутворення за рахунок електромагнітного випромінювання: 1 – зона активного впливу; 2 - випромінювачі

Значне розходження значень концентрації вільних електронів та іонів пояснюється різною тривалістю існування у вільному стані – для електрона $\sim 10 \text{ нс}$, а вільні іони можуть існувати аж до декількох годин. Однак для інтенсифікації процесу опадоутворення цього недостатньо (необхідна концентрація іонів – 10^{11} – 10^{13} м^{-3} [422, 423]). Отже, для збільшення концентрації іонів на 3-4 порядки необхідно штучне підвищення енергії вільних електронів.

Розглянемо поведінку електрона під дією змінного електромагнітного поля.

Рівняння руху електрона в ізотропній плазмі має вигляд [424]:

$$\frac{d\vec{v}_e}{dt} = \frac{e\vec{E}}{m_e} - \nu_m \vec{v}_e, \quad (4.15)$$

де v_e – швидкість електрона в електромагнітному полі; t – поточний час; $\vec{E}(t) = E_0 \cos(\omega \cdot t)$, $\vec{E}$ – миттєва напруженість електричного поля; $\vec{E}_0$ –

амплітудне значення напруженості електричного поля; ω – кругова частота електричного поля; ν_m – збурена частота зіткнень електронів з нейтральними молекулами.

Другий доданок в (4.15) визначає зміну швидкості за рахунок гальмування електронів при зіткненні з нейтральними молекулами. При швидкостях електронів вище іонізаційної швидкості ($v_e \geq v_{ei}$) при зіткненнях, як відзначалося вище, відбувається іонізація молекул та зростання концентрації заряджених центрів конденсації.

З рівняння (4.15) спрямована швидкість електронів визначається як:

$$\vec{v}_e = \frac{e\vec{E}}{m_e(i\omega + \nu_m)},$$

або за модулем:

$$|\vec{v}_e| = \frac{e\vec{E}}{m_e \sqrt{(\omega^2 + \nu_m^2)}}. \quad (4.16)$$

У нижній тропосфері (висота $H = 1\text{--}5$ км) частота зіткнень електронів з нейтральними молекулами становить $\nu_m \approx (1,4\text{--}0,9) \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ [418], тоді як частота радіовипромінювання перебуває в діапазоні $\omega \approx 10^8\text{--}10^{10} \text{ с}^{-1}$. З (4.16) видно, що за умови $\omega^2 \ll \nu_m^2$ електрон у змінному електричному полі поводить ся так само, як й у постійному електричному полі; відповідно рівняння (4.16) набуде вигляду:

$$|\vec{v}_e| \approx \frac{\sqrt{2}e|\vec{E}_0|}{m_e \nu_m}. \quad (4.17)$$

Грунтуючись на (4.15), з урахуванням (4.16) та (4.17), розглянемо зміну в часі функції розподілу електронів по енергії при різній напруженості поля (рис. 4.7) [59, 425].

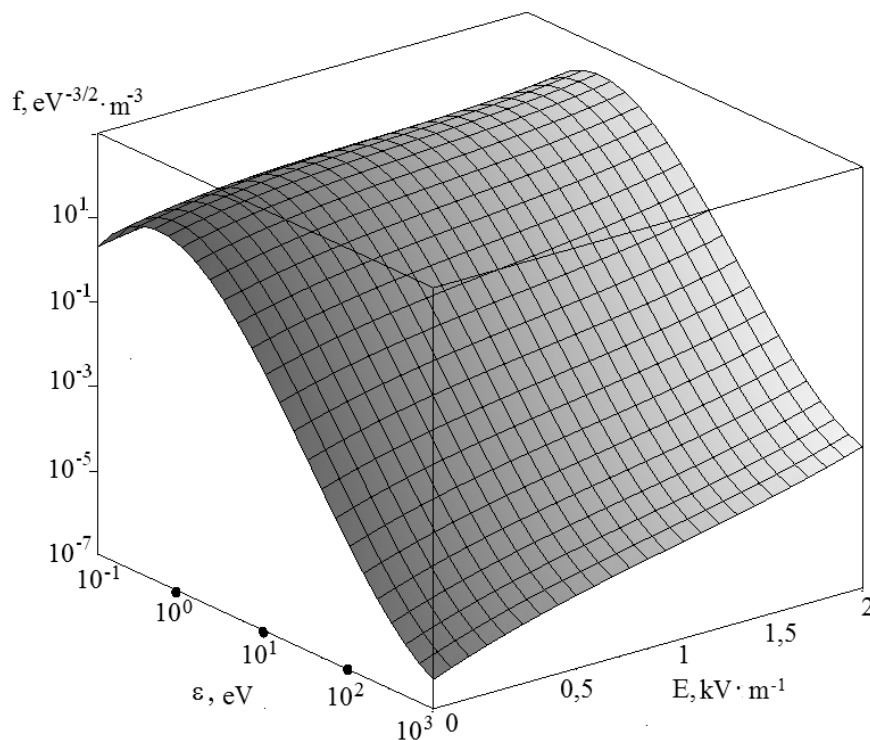


Рис. 4.7. Розподіл електронів за енергіями в електричному полі з різною напруженістю E

Із рис. 4.7 видно, що в полі електромагнітного випромінювання загальна концентрація вільних електронів зростає практично на два порядки. Також через те, що в електромагнітному полі швидкість падіння енергії електронів значно нижче, ніж у незбуреній тропосфері, електромагнітне випромінювання впливає на зростання концентрації саме високоенергетичних електронів. При цьому концентрація високоенергетичних електронів зростає на 3–4 порядки при напруженості поля $E = (1,2–1,5) \text{ кВ} \cdot \text{м}^{-1}$ [426, 427]. Дане значення напруженості значно нижче пробійного для повітря при нормальних умовах ($2 \text{ МВ} \cdot \text{м}^{-1}$). Відповідно в цьому випадку можна говорити про часткову іонізацію тропосфери [428, 429].

Для забезпечення необхідної напруженості поля на висотах 1-5 км необхідні досить потужні джерела НВЧ-випромінювання. У випадку використання джерел зниженої потужності розглянемо випадок застосування багатопозиційної системи випромінювачів (БСВ) для штучної іонізації заданої області тропосфери [430].

У разі визначення геометричних характеристик зони опромінення обов'язковим є врахування діаграм спрямованості випромінювачів (рис. 4.8).

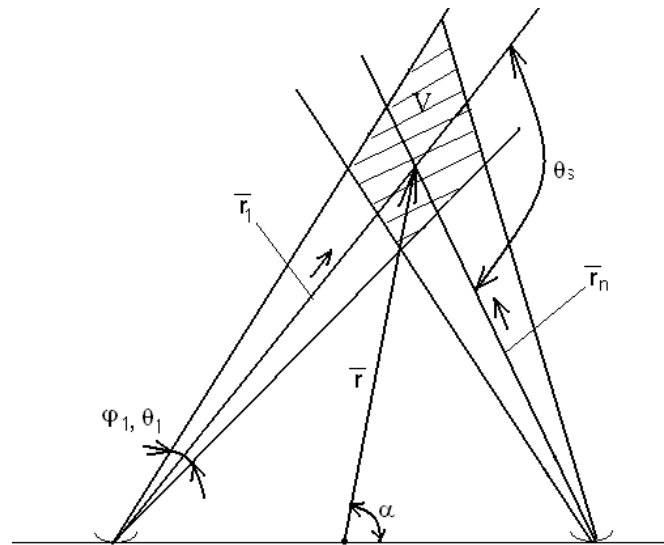


Рис. 4.8. Геометричні характеристики зони опромінення БСВ

Будемо вважати, що діаграма спрямованості за потужністю випромінювача описується гаусовою функцією [431]:

$$G_n = G_0 \exp \left[-(\ln 2) \left[\left(\frac{2\varphi_n}{\alpha} \right)^2 + \left(\frac{2\theta_n}{\theta} \right)^2 \right] \right], \quad (4.18)$$

де G_0 – коефіцієнт спрямованої дії випромінювача по вектору $\bar{r}_n$; φ_n, θ_n – кути від $\bar{r}_n$, що визначають ширину променя у вертикальному та горизонтальному напрямках (для осесиметричного променя $\varphi_n = \theta_n$); θ_s – кут

перетинання променів; α – кут нахилу центра області перетинання променів від центра БСВ.

У загальному випадку для визначення розмірів зони опромінення необхідно розрахувати об'єм області перетинання N конусів. Беручи до уваги [431], у випадку двох випромінювачів, об'єм області їх перетинання визначається як:

$$V = 1,206 \frac{r_1^2 r_2^2 \theta_1 \theta_2 \varphi_1 \varphi_2}{\sqrt{(r_1^2 \varphi_1^2 + r_2^2 \varphi_2^2)}} \cdot \frac{1}{\sin \theta_s}. \quad (4.19)$$

За умови використання випромінювачів з однаковими діаграмами спрямованості голчастого типу, тобто $\varphi_1 = \theta_1 = \varphi_2 = \theta_2 = \beta$, залежність (4.19) набуде вигляду:

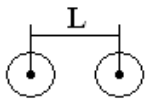
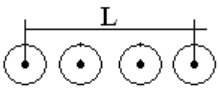
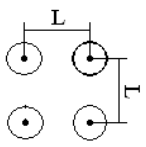
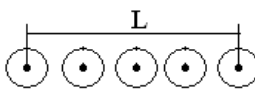
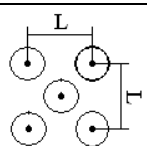
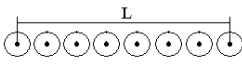
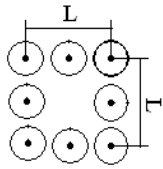
$$V = 1,206 \frac{r_1^2 r_2^2 \beta^3}{\sqrt{(r_1^2 + r_2^2)}} \cdot \frac{1}{\sin \theta_s}. \quad (4.20)$$

Для довільного числа та розташування випромінювачів одержати аналогічну залежність важко. Тому об'єм області перетинання зручніше знаходити чисельно з використанням, наприклад, програмного пакета «Компас».

Визначимо чисельно найбільш оптимальну схему розміщення множинних джерел з різним компонуванням випромінювачів (табл. 4.2) [429, 432]. Наведені дані отримані для ширини променів випромінювачів 2° (станції 1РЛ141, 1РЛ132) із центром зони їхнього перетинання на відстані $|\vec{r}| = 1000$ м та верхньою межею по вектору $|\vec{r}| = 5000$ м.

Таблиця 4.2

Об'єм зони перетинання променів (10^6 м^3) при різній геометрії розміщення джерел НВЧ випромінювання

Геометрія розміщення джерел	α	$L, \text{ м}$						
		50	100	500	1000	2000	3000	5000
	30°	23,4	19,5	10,2	7,7	3,8	1,6	0,8
	45°	20,7	17,3	8,6	5,9	3,2	1,2	0,6
	60°	18,1	15,8	7,3	4,2	2,7	0,8	0,3
	90°	16,3	13,2	5,7	3,5	1,9	0,6	0,2
	30°	21,8	17,6	9,2	6,4	3,1	1,4	0,6
	45°	20,2	15,6	7,4	5,2	2,3	1,1	0,4
	60°	17,6	13,5	6,1	3,7	1,6	0,7	0,2
	90°	15,6	11,8	4,3	2,9	0,8	0,5	0,05
	30°	22,4	18,7	9,7	6,4	3,1	1,3	0,6
	45°	20,5	16,8	8,3	5,4	2,7	1,1	0,5
	60°	17,9	15,2	7,2	3,7	1,8	0,7	0,4
	90°	16,1	12,3	5,6	2,1	1,1	0,5	0,2
	30°	20,5	18,4	9,3	5,4	3,2	1,2	0,7
	45°	18,8	16,4	8,1	4,4	2,8	0,8	0,6
	60°	17,3	15,3	7,5	3,8	1,7	0,6	0,4
	90°	15,0	12,9	5,8	2,6	1,3	0,5	0,2
	30°	21,7	18,8	9,7	5,8	3,9	1,6	0,8
	45°	20,3	17,6	8,3	4,3	2,8	1,2	0,6
	60°	18,1	16,5	7,6	3,8	2,3	0,9	0,5
	90°	16,3	14,2	5,8	2,7	1,5	0,7	0,3
	30°	19,1	15,4	8,3	4,4	2,8	1,3	0,6
	45°	17,7	13,6	7,3	3,5	1,9	0,8	0,4
	60°	16,3	12,1	5,9	2,7	0,9	0,7	0,3
	90°	13,9	10,7	4,2	1,6	0,7	0,5	0,05
	30°	20,3	16,8	9,4	5,7	4,1	2,7	0,7
	45°	18,6	15,4	7,8	6,6	3,6	1,8	0,6
	60°	17,2	13,9	6,7	4,5	2,8	1,1	0,4
	90°	15,8	12,1	4,7	2,4	1,1	0,7	0,1

З таблиці 4.2 видно, що найбільш компактне розміщення випромінювачів забезпечує максимальний об'єм зони перетинання. Компактне розміщення випромінювачів також спрощує керування випромінювачами. У цьому випадку БСВ можна розглядати як елементи антенної решітки, для якої відомі ефективні системи керування [433].

Результати розрахунків (табл. 4.2) показують, що при використанні станцій типу 1РЛ141, 1РЛ132 з будь-якою геометрією їхнього розміщення забезпечити об'єм зони активного впливу на область опадоутворення більше $23,4 \text{ м}^3$ неможливо.

Узагальнення процедури електрофізичного впливу на процеси штучного опадоутворення дає змогу визначити план дій щодо формування технічної бази підсистеми виконання управлінського рішення на локальній території та методику її використання, які включають [396] наступні етапи:

1. Отримання від керівника ліквідації зони ураження атмосфери завдання з наступними вихідними даними: координати та геометричні розміри зони забруднення на момент часу τ ($N_{\tau}^{\text{zone}}, S_{\tau}^{\text{zone}}, W_{\tau}^{\text{zone}}, E_{\tau}^{\text{zone}}, h_{\tau}^{\text{zone}}$); показники небезпеки (хімічний склад $X_1 \dots X_n$, концентрація $C_1 \dots C_n$, еквівалентна доза радіаційного випромінювання H); повний об'єм метеорологічних параметрів (розподіл температур по висоті T_h ; швидкість та напрямок вітру V_h ; атмосферний тиск P_h ; вологість повітря W_h ; координати $N_{\tau}^{\text{cloud}}, S_{\tau}^{\text{cloud}}, W_{\tau}^{\text{cloud}}, E_{\tau}^{\text{cloud}}, h_{\tau}^{\text{cloud}}$, вологозапас та водність хмар B_3, B , потенційно придатних до штучного опадоутворення); територія пріоритетного захисту (ТПЗ) (наприклад, населені пункти); територію безпечного розміщення особового складу та техніки $N_{\text{safe}}, S_{\text{safe}}, W_{\text{safe}}, E_{\text{safe}}$; зону заборони польотів (flight ban zone (FBZ)) та повідомлення про це у авіаційну диспетчерську службу.

2. На базі отриманої інформації керівник підсистеми реалізації управлінського рішення визначає: кількість та вид задіяних випромінювачів $N(A), N(B) \dots N(Z)$; потужність роботи випромінювачів P .

3. У випадку використання стаціонарних випромінювачів проводиться їх комутація та синхронізація роботи, у випадку використання пересувних випромінювачів здійснюється їх розміщення на встановлені позиції та синхронізація їх роботи.

Стаціонарні електромагнітні випромінювачі можуть розташовуватись за регіональним принципом по всій території держави на

територіях аеропортів або поблизу об'єктів підвищеної небезпеки (ОПН), які є потенційними джерелами забруднення атмосфери. Пересувні системи електромагнітного впливу можуть базуватись на окремій території по принципу розміщення аварійно-рятувальних загонів спеціального призначення (АРЗСП) ДСНС України.

Керівник підсистеми реалізації управлінського рішення повинен мати можливість обміну оперативною інформацією з керівником ліквідації зони ураження та швидко реагувати на зміну обстановки в зоні НС.

Початок електромагнітного впливу на хмару здійснюється за умов знаходження хмари над зоною атмосферного забруднення та відповідного стану хмари (параметри уточнюються у керівника ліквідації зони атмосферного забруднення) переважно з боку території пріоритетного захисту.

Контроль ефективності осадження забруднення проводиться шляхом моніторингу стану зони атмосферного ураження, який необхідно проводити лише за зоною роботи випромінювачів.

Завершення роботи активного електромагнітного впливу відбувається за умов достатнього рівня мінімізації зони ураження НС (за оцінкою керівника ліквідації зони атмосферного забруднення), або при відсутності опадів (відсутність умов подальшого штучного опадоутворення).

Відповідно такий вплив є одним з перспективних методів дистанційного електрофізичного ініціювання опадів над зоною ураження від НС. Електрофізичний метод управління процесами опадоутворення над зоною ураження від НС передбачає виконання шести процедур: отримання достатньої інформації моніторингу зони ураження атмосфери; прогнозування динаміки параметрів зони ураження та інтенсивності опадів; прийняття управлінського рішення; визначення зон безпечного розміщення випромінювачів та зон безпечного польоту; визначення типу випромінювачів та їх необхідної кількості; синхронізацію роботи багатопозиційної системи випромінювачів за допомогою системи єдиного часу.

4.1.3 Вплив кліматичних факторів на процеси локалізації та ліквідації осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням

Розміри прямого та непрямого збитку від природних пожеж у нашій країні та за кордоном демонструє недостатній рівень проведених протипожежних заходів. Особливо низькою ефективністю характеризується галузь гасіння розвинених природних пожеж з великою площею поширення. Низька ефективність гасіння пояснюється технічними труднощами доставки та подачі з достатньою інтенсивністю необхідної кількості вогнегасної речовини в зону горіння. Забезпечити умови припинення горіння природної пожежі можуть природні або штучні атмосферні опади. Виходячи із цього, однією із проблем, що підлягають вирішенню, є визначення інтенсивності та тривалості атмосферних опадів, що забезпечують гасіння природної пожежі.

До природних пожеж відносяться пожежі, які охоплюють різні компоненти географічного ландшафту. Природні пожежі можна розділити на підземні (торф'яні), надземні (лісові верхівкові) та наземні (степові, лісові низові) [49]. Питанням динаміки розвитку та гасіння великих природних пожеж (ВПП) останнім часом приділяється велика увага. Основними факторами, що впливають на швидкість поширення ВПП, є: рельєф місцевості, швидкість і напрямок вітру, пожежне навантаження, вологість повітря та горючого матеріалу [58, 434]. При цьому випадання опадів над зоною пожежі істотно збільшує вологість повітря та горючого матеріалу.

Найбільший вплив як на розвиток, так і на гасіння пожеж на відкритій місцевості справляють швидкість та напрямок вітру. У цей час існує велика кількість методик, математичних моделей та алгоритмів [435, 436], що враховують швидкість та напрямок вітру у процесі прогнозування динаміки природної пожежі, що дозволяє більш ефективно підходити до питання вибору засобів пожежогасіння, введення та розміщення сил і засобів, визначення тактичної ситуації.

Швидкість вітру майже повністю визначає контур пожежі. Чим сильніше вітер, тим більше буде витягнутий контур за його напрямком. Зміна напрямку вітру в період активного горіння істотно збільшує площу пожежі. Так, на рис. 4.9 представлено добовий розподіл швидкості вітру на території Харківської області за 2014 рік, отриманий з метеостанції «Харків - #34300» (49°56'N 36°17'E) [437].

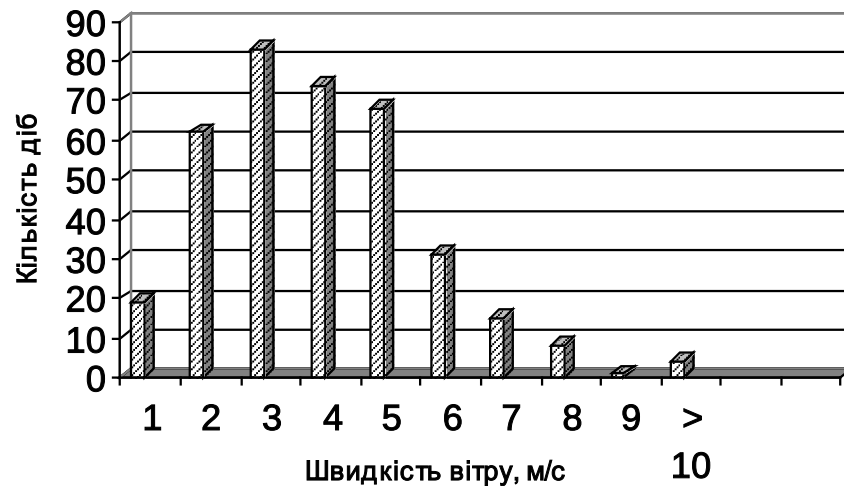


Рис. 4.9. Розподіл швидкості вітру за 2014 рік на території Харківської області

Аналіз показує, що в регіоні східної Європи переважає низька (<6 м/с) швидкість вітру. Вітер також сприяє поширенню повітрям іскор та палаючих часток матеріалу, що додатково ускладнює ситуацію по локалізації пожеж на відкритому просторі. Для вітру на рівнинній території України характерна добова циклічність. У нічний період, як правило, вітер є слабким та постійним за швидкістю й напрямком. Ранком швидкість його зростає та досягає свого максимуму, а потім до вечора знижується до мінімуму. Вітер зі швидкістю від 6 до 10 м/с є нестійким, підвищення швидкості вітру веде до його стабілізації.

У безвітряну погоду швидкість поширення пожежі становить приблизно 0,2–0,6 м/хв (залежно від виду та щільності пожежного навантаження), до 2–10 м/хв – за швидкості вітру більше 6 м/с. Особливо

негативний вплив чинить вітер при лісових верхових пожежах, де швидкість поширення пожежі може досягати десятків метрів у хвилину (рис. 4.10) [438].

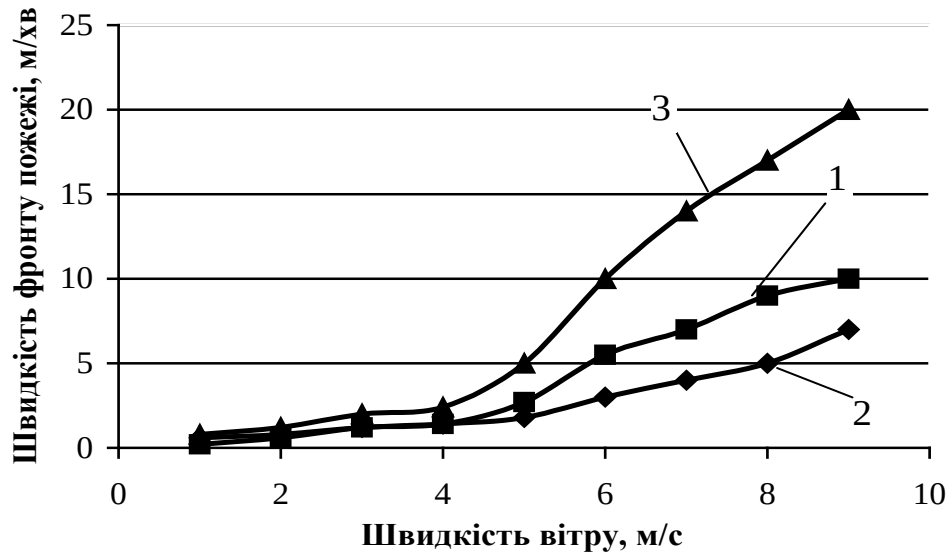


Рис. 4.10. Вплив швидкості вітру на швидкість поширення пожежі залежно від виду пожежного навантаження: 1 — пожежа в степу; 2 — лісова низова пожежа; 3 — лісова верхова пожежа

Представлені вище дані вказують на істотний вплив вітру на розвиток пожежі на відкритій місцевості. Слід зазначити, що найбільш негативний вплив вітер справляє на верхові лісові пожежі, тому що у верхніх частинах дерев розташовується більш легкоспалахувана рослинність та ніщо не перешкоджає вітру. У той же час мінімальний вплив вітер чинить на низові лісові пожежі, внаслідок істотного гальмування вітру об приземну рослинність. З урахуванням даних про кількість днів з високою середньодобовою швидкістю вітру (рис. 4.9), негативний вплив вітру на гасіння великих пожеж зростає. Виходячи з вищевикладеного, можливість корегування швидкості та напрямку вітру кардинально поліпшила ситуацію по гасінню великих пожеж на відкритій місцевості. Однак на цей час рівень наукового та технічного забезпечення є далеко недостатнім для вирішення настільки глобального завдання.

Вологість та температура повітря впливають на процес зародження процесу горіння, ніж на його розвиток та гасіння. Незважаючи на те, що

вологість повітря та його температура жорстко пов'язані між собою, розглянемо спочатку механізми впливу на горіння окремо. Підвищення вологості істотно ускладнює процес виникнення горіння (рис. 4.11).

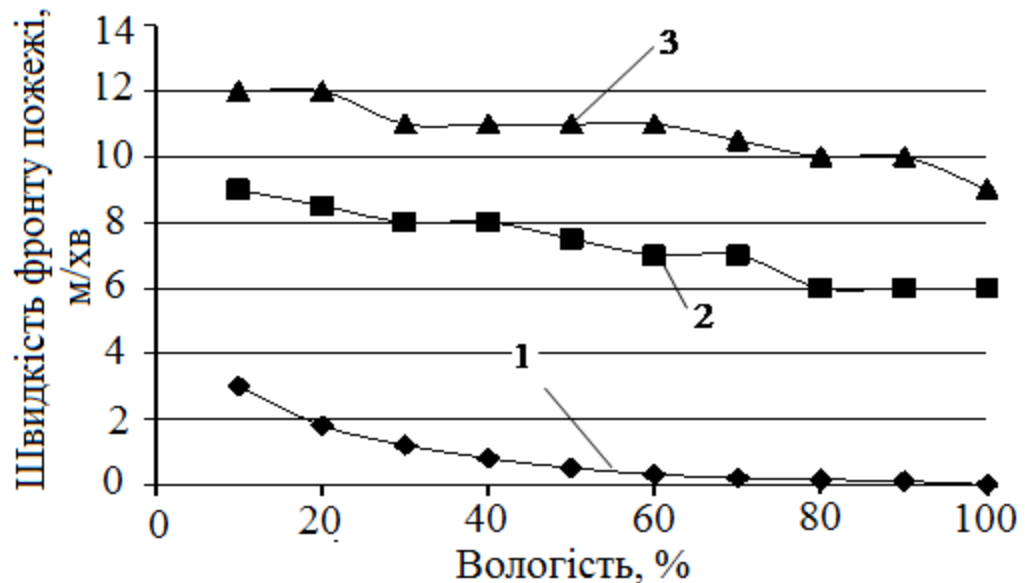


Рис. 4.11. Вплив вологості повітря на швидкість поширення лісової низової пожежі на різних етапах горіння: 1 – 0–10 хв; 2 – 10–30 хв; 3 – > 30 хв

На розвинену пожежу (після 10 хв активного горіння) вплив температури та вологості повітря має несуттєвий вплив, тому сили та засоби, витрачені на зниження температури та підвищення вологості, не виправдовують себе. Для повного аналізу впливу вологості на загальнорічну ситуацію з пожежами на відкритій місцевості необхідно також розглянути середньодобовий розподіл вологості (рис. 4.12) [355].

При розгляді питання профілактики виникнення пожежі на відкритій місцевості необхідно враховувати значні площі об'єктів, що підлягають захисту (ліси, поля із урожаєм, торфовища та ін.), які визначаються сотнями та тисячами гектар. У зв'язку із цим єдиним способом підвищення вологості повітря та горючого матеріалу є опади. У цьому випадку додатково підвищується вологість у процесі гасіння пожежі, оскільки для цього використовуються великі об'єми води [439].

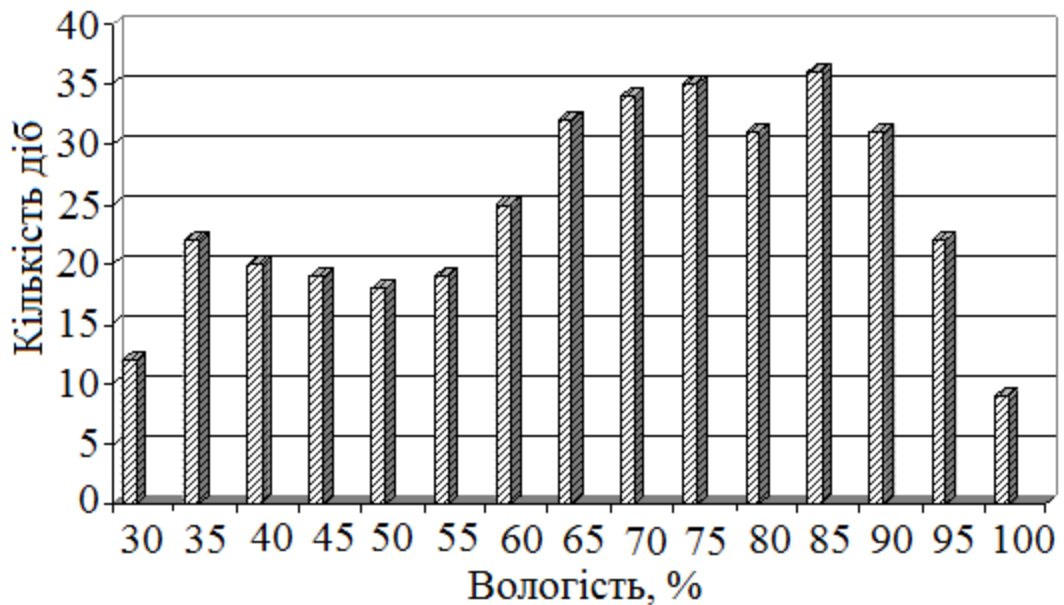


Рис. 4.12. Середньодобовий розподіл вологості за 2014 рік

Як показує аналіз, посушливих днів (вологість <70 %) у році значно більше, ніж днів з високою швидкістю вітру, однак основним посушливим періодом у регіоні східної Європи є літній період (травень – вересень), що і характеризується переважною кількістю лісових, степових та торф'яних пожеж, у порівнянні з іншими сезонами (рис. 4.13) [440].

З рисунка 4.13 видно, що в деякі періоди за високої швидкості вітру зберігається досить волога погода та навпаки – посушливі періоди характеризуються низькою швидкістю вітру. Аналіз результатів вказує на необхідність комплексного підходу при аналізі впливу метеорологічної ситуації на ступінь пожежної небезпеки.

На сьогодні існує кілька способів зниження температури в великих об'ємах атмосфери. Основним з них є природний – екранування сонячного випромінювання хмарами різної природи, а також антропогенний – розпилення рідкого вуглекислого газу. Останній з розглянутих методів є придатним лише для використання при відносно невеликих обсягах атмосфери та недоцільним для вирішення завдання профілактики пожеж на відкритій місцевості.

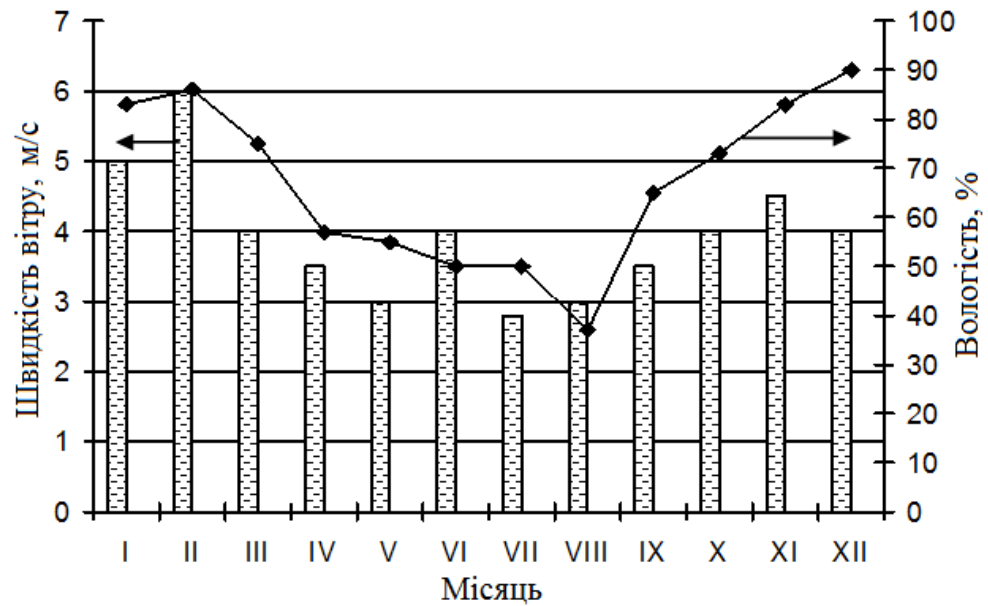


Рис. 4.13. Розподіл вологості та швидкості вітру по місяцях 2014 року

Істотний вплив на процес ліквідації пожеж великої площі на відкритій місцевості справляє наявність опадів. Опади сприяють підвищенню вологості, зниженню температури та є потужним джерелом вогнегасного матеріалу – води. Врахування розглянутих вище метеорологічних факторів при оцінці пожежної безпеки здійснюється за допомогою комплексного показника пожежної небезпеки, на основі якого в Україні та інших країнах СНД оцінюється пожежна ситуація в лісах, степах та на торфовищах. Комплексний показник пожежної небезпеки розраховується за методикою В.Г. Нестерова [441].

Комплексний показник (КП) визначається як сума добутків коефіцієнта, що враховує швидкість вітру (K_v), на температуру повітря (T) і різниця між значенням температури повітря та температурою точки роси ($T-t$). Розрахунок КП починається після останнього дощу та проводиться за кожний день (n). Дані за кожний день додаються.

$$КП = \sum_{1}^n K_v \cdot T \cdot (T - t). \quad (4.21)$$

Розрахунок комплексного показника пожежної небезпеки по (4.21) ведеться протягом теплого періоду щодня від сходження сніжного покриву навесні до встановлення його восени. Комплексний показник пожежної небезпеки наростає протягом сухого періоду без опадів, а також у дні, коли опадів випадає недостатньо для ліквідації пожежної небезпеки в лісах. У випадку випадання опадів, здатних зняти напруженість пожежної ситуації в лісі, відбувається скидання комплексного показника.

Наявність опадів істотно знижує пожежну небезпеку та сприяє ефективній боротьбі з надзвичайними ситуаціями, пов'язаними з горінням лісів, степів, торфовищ та інших великих пожеж на відкритій місцевості.

Існуюча на цей час велика кількість наукових та практичних напрацювань у в галузі кліматології та метеорології [120-124] свідчить про можливості штучного керування процесами опадоутворення. У зв'язку із цим подальше вивчення зазначеної проблеми є досить актуальним і перспективним для підвищення ефективності боротьби з великими пожежами на відкритій місцевості.

Найбільш ефективним метеорологічним явищем, що впливає на інтенсивність пожеж, є опади. Для істотного зниження рівня забруднення нижньої атмосфери продуктами горіння шляхом ефективної боротьби з великими пожежами на відкритій місцевості, перспективним та актуальним напрямом досліджень є розробка методів штучного керування процесами опадоутворення.

4.1.4. Вплив атмосферних опадів на процеси локалізації та ліквідації штучно ініційованими опадами осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням

Вище розглянуто вплив вологості повітря та горючого матеріалу на інтенсивність горіння. Далі необхідно розробити модель, що дозволяє чисельно визначати зміну цих параметрів при випаданні опадів.

Вологість повітряного середовища під час опадів підвищується за рахунок випаровування крапель дощу за час їхнього польоту та випаровування з поверхні, на яку потрапляють опади [442]. У найпростішому вигляді задача випаровування одиничної сферичної краплі була вирішена ще Максвеллом в 1877 р. [443]. Однак ним не було враховано ряд істотних моментів: залежність рівноважної концентрації молекул пари над поверхнею рідкої фази при розходженні температур краплі та повітряного середовища, швидкість відходу молекул від поверхні краплі та ін. Випаровування води з поверхні рослинного покриву також визначається або на основі довгострокових спостережень попередніх періодів, або (останнім часом) на основі оцінки інтенсивності випару вологи з поверхні рослинності за допомогою біокліматичного методу [444]. Однак ці методи є непридатними для короткострокових прогнозів стосовно до умов природних пожеж, а також не враховують гідрологічні властивості різних матеріалів.

У цій моделі вирішується задача взаємного впливу дощу та повітря у випадку двох змінних: просторової вертикальної координати z та часу τ . Передбачається наявність на фіксованій висоті $z=z_0$ джерела крапель із однаковими початковими радіусами r_0 та швидкостями w_0 . Шуканими нестационарними полями є: швидкість падіння $w_d(z, \tau)$, радіус $r_d(z, \tau)$, абсолютна температура $T_d(z, \tau)$ та щільність числа крапель $n(z, \tau)$, а також концентрація водяної пари в повітрі $\rho_s(z, \tau)$ та його абсолютна температура $T_a(z, \tau)$.

Рівняння руху падаючої краплі має вигляд:

$$\frac{dw_d}{d\tau} = g - \frac{w_d - w_a}{m_d} \cdot \rho_a \cdot \left[6 \cdot \pi \cdot r_d \cdot v_a + \frac{C_f}{2} \cdot \pi \cdot r_d^2 \cdot |w_d - w_a| \right], \quad (4.22)$$

де w_a – швидкість повітря; ρ_a – густина повітря; v_a – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря; g – прискорення вільного падіння; C_f – коефіцієнт форми (у

реалізованому в даній роботі випадку краплі сферичної форми $C_f = 0,47$);

$m_d = \rho_w \cdot \frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot r_d^3$ – маса краплі; ρ_w – густина води, що вважається постійною.

Тут і надалі під символом $\frac{d}{d\tau}$ мається на увазі субстанціональна похідна за часом [445]:

$$\frac{d}{d\tau} \Rightarrow \frac{\partial}{\partial \tau} + w_d(z, \tau) \cdot \frac{\partial}{\partial z}.$$

Основним параметром, що описує процес випару краплі, є потік маси пари J_s ($\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$) від краплі у повітря. Квazистаціонарний режим випаровування у наближенні граничного шару описується співвідношенням [446]:

$$J_s = 2\pi \cdot r_d \cdot \bar{D} \cdot \frac{\mu_w \cdot P}{R \cdot \bar{T}} \cdot (\text{Nu}_D + 2) \cdot \ln\left(\frac{P - P_{s,a}}{P - P_s(T_d)}\right), \quad (4.23)$$

де $R = 8,314 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ – універсальна газова стала; $\mu_w = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$ – молярна маса води; $P(z)$ – загальний атмосферний тиск на даній висоті z ; $\bar{T}$ – середнє (в моделі середнє арифметичне між T_d та T_a) значення абсолютної температури газового середовища в дифузійному крапельному шарі. Усереднене значення коефіцієнта дифузії пари в повітрі $\bar{D}$ у моделі визначається за формулою:

$$\bar{D} = 2.2 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{\bar{T}}{273}\right)^{1.5}, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}.$$

Величина $P_{s,a}(z)$ являє собою парціальний тиск водяної пари в атмосфері на даній висоті z . В моделі передбачається, що аж до досягнення тиску насиченої пари $P_s(T)$ при температурі T він ($P_{s,a}$) підкоряється рівнянню стану ідеального газу:

$$P_{s,a} = \frac{\rho_s}{\mu_w} \cdot R \cdot T_a \leq P_s(T_a). \quad (4.24)$$

Величина Nu – дифузійний критерій Нуссельта (інша назва – критерій Шервуда (Sh)). Він, як й аналогічний за змістом тепловий критерій Нуссельта (Nu), оцінюється критеріальним рівнянням [447]:

$$Nu_T = Nu_D = \begin{cases} 2 \cdot (1 + 0.08 \cdot Re^{2/3}), & Re \leq 200 \\ 0.54 \cdot Re^{1/2}, & Re > 200 \end{cases}. \quad (4.25)$$

Тут критерій Рейнольдса розраховується по формулі:

$$Re = \left| \frac{(w_d - w_a) \cdot 2 \cdot r_d}{v_a} \right|.$$

Знання потоку маси (4.22) дозволяє записати рівняння балансу маси води в краплі. Воно має вигляд:

$$4 \cdot \pi \cdot r_d^2 \cdot \rho_w \cdot \frac{dr_d}{d\tau} = -J_s. \quad (4.26)$$

У квазістаціонарному режимі випаровування, згідно [446, 447], потік енергії між краплею й повітрям Q (Вт) описується співвідношенням:

$$Q = J_s \cdot \left[h_s(T_d) - \frac{h_s(T_a) - h_s(T_d)}{\exp(B) - 1} \right]. \quad (4.27)$$

Тут символом B позначено безрозмірну величину:

$$B \equiv \frac{J_s \cdot c_{ps}}{2 \pi \cdot r_d \cdot \bar{\lambda} \cdot (Nu_T + 2)}. \quad (4.28)$$

Величина $\bar{\lambda}$ – середнє за температурним шаром значення коефіцієнта теплопровідності парогазового середовища. При виведенні співвідношення (4.27) передбачалася лінійна залежність питомої масової ентальпії утворення водяної пари h_s від температури:

$$h_s(T) = h_s(T_d) + c_{ps} (T - T_d), \quad (4.29)$$

де c_{ps} – питома масова ізобарна теплоємність пари.

Відзначимо відразу, що наслідком збігу дифузійного та теплового критеріїв Нуссельта ($Nu = Nu$) є спрощення виду параметра B (4.29), що супроводжується зникненням залежності B від розмірів краплі.

Рівняння (4.23) та (4.29) пов'язують між собою чотири величини – Q , J_p , r_k та T_k . Відсутніми двома рівняннями, що замикають систему, є співвідношення, що відображають баланси маси краплі та її ентальпії. Розглянемо ці співвідношення.

У природному наближенні постійної щільності води ρ_w і сферичної форми краплі рівняння балансу маси води в краплі має вигляд:

$$\frac{dm_d}{d\tau} = -J_s. \quad (4.30)$$

Останнім з рівнянь балансу є перший закон термодинаміки, відповідно до якого в розглянутому ізобарному процесі тепловий потік крізь поверхню краплі забезпечується за рахунок зміни її ентальпії, тобто:

$$\begin{aligned} Q &= -\frac{d}{d\tau}[h_w(T_d) \cdot m_d] = -\frac{\partial h_w}{\partial T} \cdot \frac{dT_d}{d\tau} \cdot m_d - h_w \cdot \frac{dm_d}{d\tau} = \\ &= -c_{p,w} \cdot \frac{dT_d}{d\tau} \cdot m_d + h_w \cdot J_s, \end{aligned} \quad (4.31)$$

де $h_w(T)$ – питома масова ентальпія утворення води в рідкій фазі;
 $c_{p.w}(T) = \left(\frac{\partial h_w}{\partial T} \right)_p$ – питома масова ізобарна теплоємність води. (При

перетвореннях рівняння (4.31) використовувалося співвідношення (4.30)).

Об'єднавши формули (4.23), (4.27) й використовуючи розкладання (4.29), можна одержати рівняння, що задає швидкість зміни температури краплі [446]:

$$m_d \cdot c_{p.w} \cdot \frac{dT_d}{d\tau} = J_s \cdot \left[-\Delta h + \frac{c_{p.s} \cdot (T_a - T_d)}{\exp(B) - 1} \right], \quad (4.32)$$

де $\Delta h \equiv h_s(T_d) - h_w(T_d)$ – питома теплота паротворення; $h_w(T)$ – питома масова ентальпія утворення води в рідкій фазі; $c_{p.w}$ – питома масова ізобарна теплоємність води.

Рівняння (4.22), (4.28), (4.32) щодо невідомих швидкості, розміру та температури краплі (з відповідними рівняннями зв'язку допоміжних величин) однозначно описують випаровування падаючої краплі в заданому атмосферному полі.

Перейдемо до опису впливу дощу на атмосферу. При цьому приймемо незначність конвективних ($w_a = 0$) та дифузійних газових потоків. Загальний тиск повітря $P(z)$ та його густину $\rho_a(z)$ будемо розглядати як стаціонарні функції, визначивши їх на початку, виходячи із заданого початкового розподілу температури повітря $T_a(z, 0)$. Для цього скористаємося рівнянням стану ідеального газу:

$$\rho_a(z) = \frac{P(z)}{R_a \cdot T_a(z, 0)}, \quad (4.33)$$

у якому $R_a = R/0,029 = 287$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹ – питома газова стала повітря. В цих межах із рівняння гідростатики випливає, що:

$$P(z) = P_0 \cdot \exp \left[- \int_0^z \frac{g \cdot dz'}{R_a \cdot T_a(z', 0)} \right], \quad (4.34)$$

де P_0 – загальний атмосферний тиск на висоті $z=0$.

Рівняння, що задає концентрацію водяної пари в повітрі, є наслідком балансових співвідношень для води. З урахуванням умов нехтування процесами газового переносу, зміна концентрації водяної пари в повітрі відбувається винятково внаслідок випаровування крапель, і тому:

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial \tau} = n \cdot J_s. \quad (4.35)$$

У даній роботі атмосферний стовп розглядається як нерухомий. Зміна його енергії пов'язано винятково із взаємодією повітря із краплями дощу. Відповідне рівняння енергетичного балансу, що визначає зменшення абсолютної температури повітря $T_a(z, \tau)$, має вигляд [445]:

$$c_{p,a} \cdot \rho_a(z) \cdot \frac{\partial T_a}{\partial \tau} = n \cdot [Q - J_s \cdot h_s(T_a)],$$

що, з урахуванням співвідношень (4.27) та (4.29), дає:

$$c_{p,a} \cdot \rho_a(z) \cdot \frac{\partial T_a}{\partial \tau} = -n \cdot J_s \cdot \frac{c_{p,s} \cdot (T_a - T_d)}{1 - \exp(-B)}, \quad (4.36)$$

де $c_{p,a}$ – питома масова ізобарна теплоємність повітря.

Замикаюче диференціальне рівняння, що задає щільність числа крапель $n(z, \tau)$, записано в припущенні про незмінність їхньої кількості в процесі падіння. Воно має вигляд:

$$\frac{\partial n}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial z}(n \cdot w_d) = 0. \quad (4.37)$$

Граничні умови до даної системи рівнянь задаються в місці генерації потоку краплі (при $z=z_0$). Початковою умовою є ситуація стану до дощу.

Система диференціальних рівнянь (4.22), (4.28), (4.33), (4.35) - (4.37) вирішувалася чисельно. Отримані типові тимчасові залежності різних параметрів дощу й атмосфери на висотах 950, 450 та 50 м представлені на рис. 4.14–4.16 [446].

У даному варіанті чисельного вирішення системи диференціальних рівнянь вважалось, що на висоті $z_0 = 1000$ м густина води становить $\rho_{d,w0} = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, що при початковому радіусі крапель $r_0 = 0,625$ мм задає початкову щільність числа крапель $n_0 = 9,8 \cdot 10^4 \text{ м}^{-3}$, приймаючи, що початково повітря є сухим. Його початкова температура лінійно падала з висотою від 20°C на поверхні Землі ($z = 0$ м) до 10°C на висоті $z = z_0$.

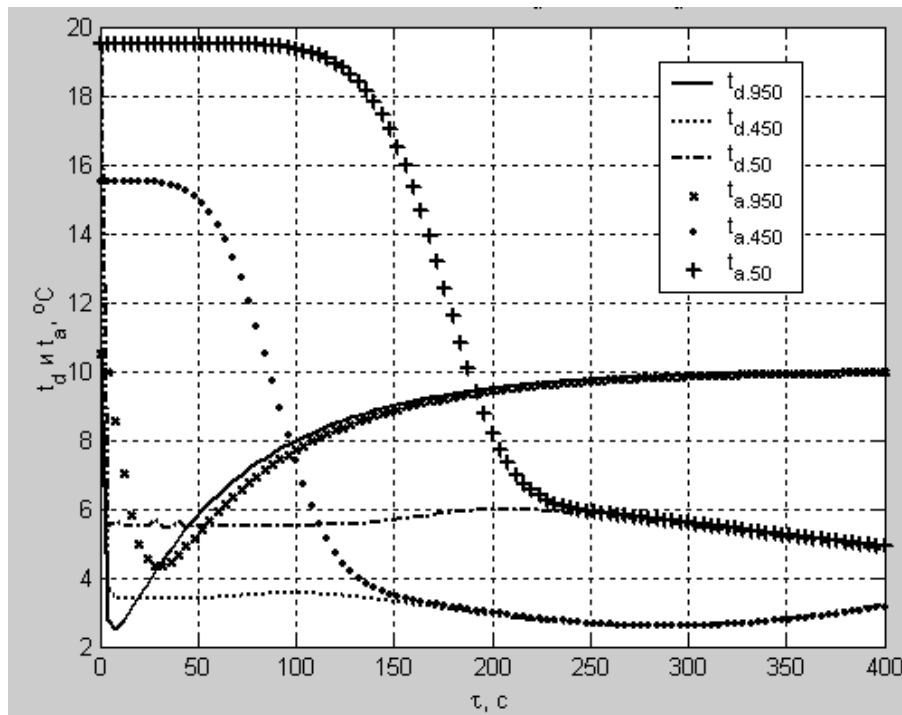


Рис. 4.14. Температури крапель t_d та повітря t_a на висотах 950, 450 та

50 м

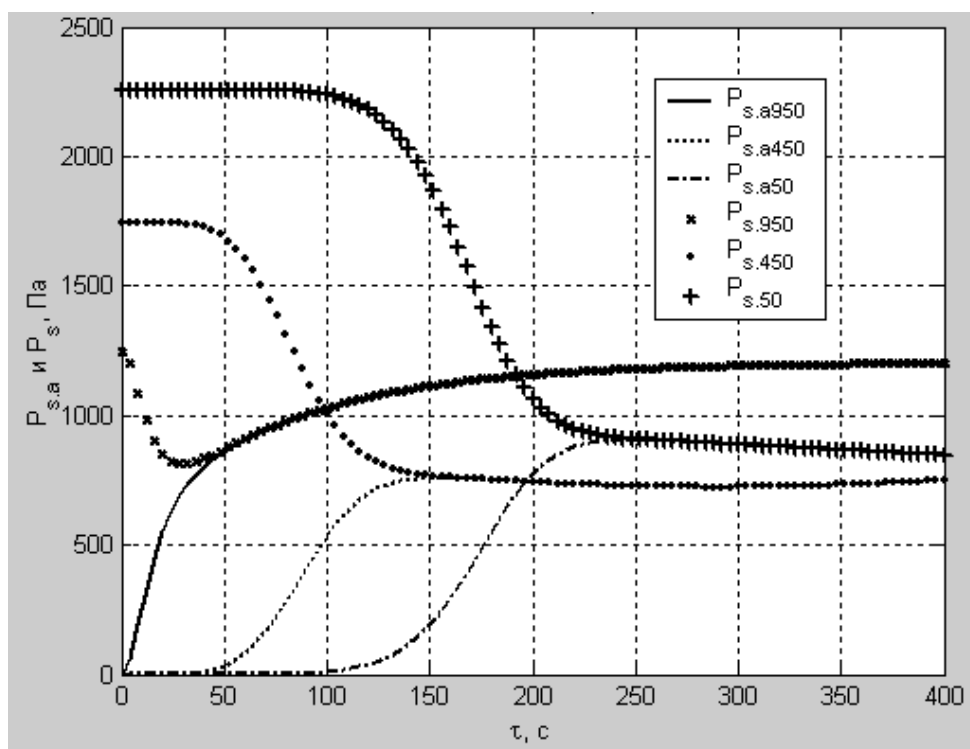


Рис. 4.15. Парціальний тиск пари $P_{s,a}$ та тиск насиченої пари P_s на висотах 950, 450 та 50 м

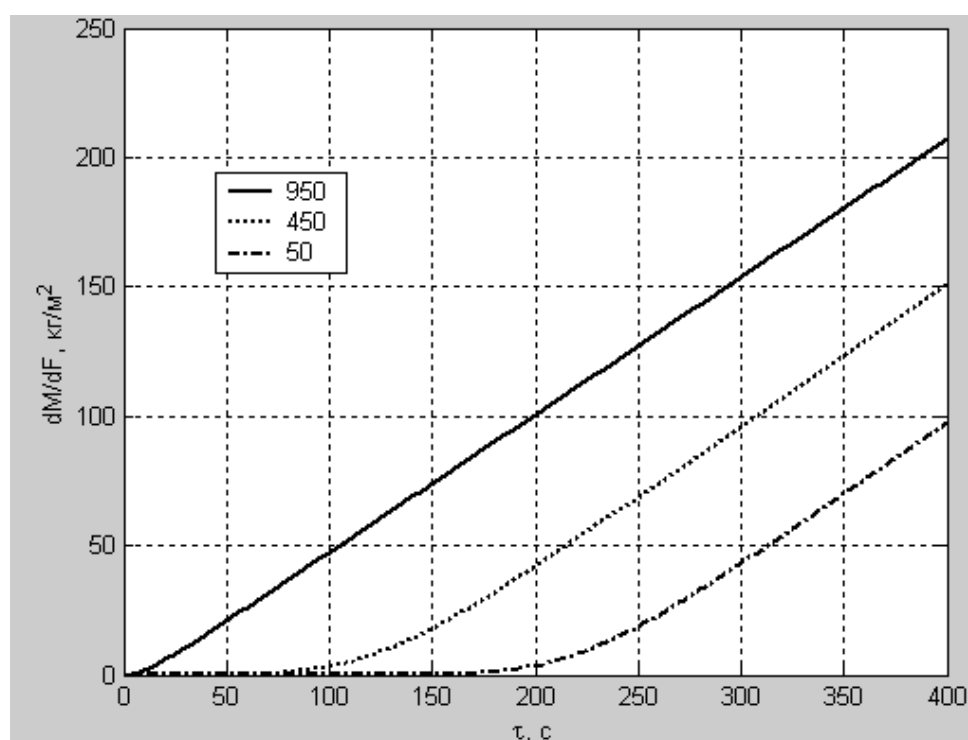


Рис. 4.16. Перенос маси води дощем на висотах 950, 450 та 50 м, розраховуючи на одиницю площі

Наведені графіки (рис. 4.14–4.16) дозволяють одержати великий обсяг важливої інформації. Наприклад, з рисунку 4.15 видно, що повне насичення повітря вологою (що відповідає умові $P_{s,a} = P_s$) у приповерхневому шарі ($z = 50$ м) відбудеться через 240 с, і до цього моменту, відповідно до рисунка 4.16, із хмар ($z = 950$ м) повинно випасти $120 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$ води. Останнє число визначає нижню границю вимог до запасів води в хмарах у даних умовах для реалізації процесу пожежогасіння.

Адекватність отриманих результатів перевірено на розробленому та запатентованому стенді для дослідження процесів горіння [448, 449]

При розгляді процесу випаровування води з поверхні Землі у процесі гасіння ландшафтних пожеж поверхню Землі, включаючи рослинний покрив, необхідно розглядати як пористу поверхню. У роботі [450] наведено наступну формулу для швидкості випару рідини з поверхні пористого матеріалу, оснований на формулі Ленгмюра:

$$J_{\text{вс}}^{\text{пов}} = \varepsilon S \frac{P_s \exp\left(-\frac{P_\sigma M}{\rho RT}\right) - P_g}{3\sqrt{2\pi \frac{RT}{M}}}, \quad (4.38)$$

де P_s – тиск насиченої пари води; P_σ – капілярний тиск; ρ – густина води; T – температура поверхні; P_g – парціальний тиск пари в атмосфері; ε – відносна пористість матеріалу поверхні; S – площа поверхні частки.

Розв’язання представленої системи дає як вологість повітря, так і відповідну витрату води (вона дорівнює добутку кількості, швидкості та маси крапель). Це означає, що даний опис процесу випаровування придатний для вирішення поставленої задачі.

Грунтуючись на вищевикладених результатах, в [451] розрахована критична інтенсивність опадів для гасіння 1 м^2 ландшафтної пожежі. Додаткове використання моделей по динаміці розвитку природних пожеж

дозволить встановити необхідний вологовміст хмарних утворень над зоною гасіння та інтенсивність його осадження для зниження викиду небезпечних продуктів горіння.

Відповідно до теплової теорії припинення горіння, запропонованої Я. Б. Зельдовичем [452] та розвинутої надалі Д. А. Франк-Каменецьким [447], Л. А. Вулисом [453], В. І. Бліновим [454] та іншими вченими, при перевазі процесу тепловідведення над процесом тепловиділення ($q(+) < q(-)$) самочинне горіння неможливо. З огляду на те, що механізм гасіння водою полягає в охолодженні зони горіння та поверхні горючого матеріалу, у роботі [455] запропонована емпірична модель розрахунку інтенсивності тепловідведення водою від поверхні горючого матеріалу.

До матеріалів, які становлять основне пожежне навантаження природних пожеж, відносяться: деревина, листя, трава та торф. Всі ці матеріали, з погляду фізикохімії процесу горіння, можна віднести до целюлозовмісних рослинних твердих горючих матеріалів (ЦРТГМ). На момент початку гасіння, ЦРТГМ, що горить, прогрівається на деяку глибину та на її поверхні утворюється шар вуглецевого залишку, товщина якого залежить від фізико-хімічних властивостей матеріалу та часу горіння. Під високопористим шаром вугілля, що утворився внаслідок вигорання летких компонентів, перебуває шар ЦРТГМ, у якому відбувається процес піролізу за рахунок тепла від верхнього шару, тобто матеріал інтенсивно розкладається з виділенням великої кількості горючих газів, які проходять через пористий вуглецевий шар та утворюють на поверхні концентрацію, достатню для підтримки горіння. Тому навіть якщо згасити полум'яне горіння, над поверхнею ЦРТГМ утворяться умови, достатні для повторного загорання. До того ж припинення полум'яного дифузійного горіння не означає припинення горіння взагалі, тому що всі ЦРТГМ здатні до гетерогенного горіння. Цей процес особливо істотно проявляється під час горіння та гасіння торфу, що через свою пористість має достатню кількість окислювача в самій товщі матеріалу, що сприяє поширенню гетерогенного горіння в товщу матеріалу.

Необхідно також врахувати, що температура верхнього вуглецевого шару ЦРТГМ у процесі горіння досягає приблизно 600°C , що значно перевищує температуру піролізу цих матеріалів і температуру samozapalювання тих газів, які утворилися в результаті піролізу. Таким чином, умовою гасіння природної пожежі є не тільки припинення полум'яного горіння, а й зниження температури поверхні ЦРТГМ нижче температури піролізу ($< 200^{\circ}\text{C}$).

Рівняння теплового балансу для визначення кількості тепла, яку необхідно відвести з поверхні горючого матеріалу, згідно [455], має вигляд:

$$Q_{\text{відв.}} \geq \tau_{\text{т}} (q_{\text{випр.}} + q_{\text{конв.}}) + Q_{\text{ЦРТГМ}}, \quad (4.39)$$

де $Q_{\text{відв.}}$ – питома кількість теплоти, яку необхідно відвести від одиниці поверхні горіння для припинення процесу горіння; $\tau_{\text{т}}$ – час гасіння; $q_{\text{випр.}}$ – питома інтенсивність променистого теплового потоку від факела полум'я; $q_{\text{конв.}}$ – питома інтенсивність конвективного теплового потоку від факела полум'я; $Q_{\text{ЦРТГМ}}$ – питома кількість тепла, що запасене в шарі ЦРТГМ, прогрітому вище температури піролізу.

Далі розглянемо кожен складовий доданок рівняння (4.39) стосовно до чотирьох основних видів ландшафтних пожеж – лісових верхових, лісових низових, степових та торф'яних. При цьому розглядати будемо елементарну площу пожежі без урахування впливу процесів у цій елементарній площі на сусідні ділянки. Дане припущення є справедливим, тому що вплив суміжних областей одна на одну визначає динаміку розвитку пожежі по поверхні, але не впливає на процеси усередині окремої елементарної площі. Питання динаміки розвитку природної пожежі у випадку впливу різних факторів досить повно розглянуті в роботах [456], тому приймаємо, що площа пожежі та швидкість руху її краю відомі.

З урахуванням наслідків закону Кірхгофа та закону Стефана-Больцмана, питома інтенсивність променистого теплового потоку від

джерела до поверхні описується рівнянням [456]:

$$q_{\text{випр.}} = \varepsilon_{\text{пр.}} C_0 \left[\left(\frac{T_{\text{пол.}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов.}}}{100} \right)^4 \right], \quad (4.40)$$

де $\varepsilon_{\text{пр.}}$ – наведений ступінь чорності полум'я та поверхні ЦРТГМ; C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, $C_0 = 5,67 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$; $T_{\text{пол.}}$ – температура полум'я; $T_{\text{пов.}}$ – температура поверхні, що поглинає теплове випромінювання.

Ступінь чорноти полум'я у разі горіння ЦРТГМ становить 0,7, а ступінь чорноти поверхні землі, що поглинає випромінювання, – 0,83 [456], отже:

$$\varepsilon_{\text{пр.}} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 = 0,58. \quad (4.41)$$

Масив рослинного матеріалу, що поглинає теплове випромінювання, необхідно розглядати як пористий шар. У роботі [456] на основі експериментальних та теоретичних досліджень зроблено висновок про те, що ослаблення променистого потоку при проходженні через пористий масив рослинного горючого матеріалу описується рівнянням закону Бугера-Ламберта-Бера. Однак пористість матеріалу впливає на процес нагрівання лише при невеликих значеннях $q_{\text{пол.}} < 35 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$ [457]. З урахуванням температури полум'я при різних видах ландшафтних пожеж та температури самозаймання відповідних горючих матеріалів, отримаємо за виразом (4.41) значення $q_{\text{пл.}}$, які наведені у табл. 4.3.

Інтенсивність конвективного потоку тепла визначається за законом Ньютона-Ріхмана:

$$q_{\text{конв.}} = \alpha |T_{\text{пол.}} - T_{\text{пов.}}|, \quad (4.42)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі від полум'я до поверхні ЦРТГМ.

Коефіцієнт тепловіддачі від полум'я до твердої поверхні при пожежі визначається по співвідношенню [456]:

$$\alpha = 11,63 \cdot \exp(0,0023 \cdot t_{\text{пол.}}). \quad (4.43)$$

Приймаючи відповідну температуру пожежі по (4.42), одержуємо $q_{\text{конв.}}$ (табл. 4.3) [458].

Дані табл. 4.3 показують, що інтенсивність променистого та конвективного потоків при найбільш інтенсивному виді ландшафтної пожежі – лісовій верховій пожежі – в 2–3 рази вище інших видів пожежі. Встановлено, що у всіх видах ландшафтних пожеж $q_{\text{пол.}} > 35 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$, що дозволяє знехтувати при розрахунках впливом пористості масиву горючого матеріалу.

Таблиця 4.3

Інтенсивності променистого та конвективного теплових потоків при різних ландшафтних пожежах

Вид пожежі	$T_{\text{пол.}}, \text{ K}$ [295]	$q_{\text{випр.}},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^{-2}$	$q_{\text{конв.}},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^{-2}$	$q_{\text{пол.}},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^{-2}$
Лісові верхові	1400	144,2	130,5	274,7
Лісові низові	1100	53,3	44,0	97,3
Степові	1050	44,1	36,8	80,9
Торф'яні	1200	77,5	68,6	146,1

Кількість тепла, що запасена в шарі ЦРТГМ, прогрітому вище температури піролізу, залежить від виду горючого матеріалу та може бути розрахована за наступною формулою:

$$Q_{\text{ЦРТГМ}} = \int_0^{\delta} c_p \cdot \rho (T(x) - T_{\text{пир.}}) dx, \quad (4.44)$$

де δ – товщина шару ЦРТГМ, прогрітого до температури піролізу; c_p –

питома масова ізобарна теплоємність горючого матеріалу; ρ – щільність горючого матеріалу; $T(x)$ – температура ЦРТГМ на відстані x від поверхні; $T_{\text{пир.}}$ – температура піролізу ЦРТГМ.

Прийнявши, що температура прогрітого шару змінюється відповідно до закону Міхельсона [456]:

$$T(x) = T_0 + (T_{\text{пов.}} - T_0) \exp(-k \cdot x), \quad (4.45)$$

де T_0 – початкова температура ЦРТГМ; $k = v_m / (a \cdot \rho)$; v_m – масова швидкість вигорання ЦРТГМ; a – коефіцієнт теплопровідності ЦРТГМ, вираз (4.44) можна записати у вигляді:

$$Q_{\text{ЦРТГМ}} = \frac{\rho \cdot \lambda}{v_m} (T_{\text{пов.}} - T_0) \left[1 - \exp\left(-\frac{v_m \cdot \delta}{a \cdot \rho}\right) \right] - c_p \cdot \rho \cdot \delta (T_{\text{пир.}} - T_0), \quad (4.46)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності горючого матеріалу.

Відповідно, ґрунтуючись на інформації про фізико-хімічні властивості ЦРТГМ, які викладені в [458], і на результатах табл. 4.3, з (4.46) одержуємо для лісової верхової пожежі [459]:

$$Q_{\text{відв.}} \geq 275\tau_T + 1255; \quad (4.47)$$

для лісової низової пожежі:

$$Q_{\text{відв.}} \geq 98\tau_T + 1087; \quad (4.48)$$

для степової пожежі:

$$Q_{\text{відв.}} \geq 81\tau_T + 835; \quad (4.49)$$

для торф'яної пожежі:

$$Q_{\text{відв.}} \geq 146\tau_T + 970. \quad (4.50)$$

Для розгляду процесу тепловідведення при введенні в зону горіння води приймемо наступні припущення:

- вся вода, що випала із хмар над елементарною площею пожежі, потрапляє на дану елементарну площу пожежі;
- оскільки мінімальна безпечна температура поверхні ЦРТГМ (табл. 4.3) значно вище температури кипіння води, то вся вода випаровується або під час польоту, або на поверхні ЦРТГМ;
- відведення тепла водою із зони горіння відбувається за рахунок: нагрівання води до температури кипіння ($T_{\text{кип.}}$), втрат тепла на випаровування води ($H_{\text{вип.}}$) та нагрівання пари води до температури полум'я ($T_{\text{пол.}}$).

Приймаючи дані припущення, кількість тепла, що відводиться опадами з одиниці площі горіння, становить [455]:

$$Q_{\text{відв.}} = [c_{\text{рв}} (T_{\text{кип.}} - T_0) + H_{\text{вип.}} + c_{\text{рп}} (T_{\text{пл.}} - T_{\text{кип.}})] \cdot I \cdot \tau_T, \quad (4.51)$$

де $c_{\text{рв}}$ – питома масова ізобарна теплоємність води; $c_{\text{рп}}$ – питома масова ізобарна теплоємність пари; I – інтенсивність надходження води в зону горіння (інтенсивність опадів).

Використовуючи теплофізичні властивості води, з виразу (4.51) одержуємо [458]:

$$Q_{\text{відв.}} \approx 2750 \cdot I \cdot \tau_T, \quad (4.52)$$

з якого час гасіння, з урахуванням (4.52), визначається як

$$\tau_T \geq \frac{Q_{\text{ЦРТГМ}}}{2750 \cdot I - (q_{\text{випр.}} + q_{\text{конв.}})} \quad (4.53)$$

Однак у дійсності мінімальний час гасіння не може бути менше деякої величини, умовно названої часом інерції ($\tau_{\text{ін.}}$) [455, 456]. Відповідно рівняння (4.52) прийме вид:

$$\tau_T \geq \frac{Q_{\text{ЦРТГМ}}}{2750 \cdot I - (q_{\text{випр.}} + q_{\text{конв.}})} + \tau_{\text{ін.}} \quad (4.54)$$

Час інерції визначається умовами тепломасообміну рідини з поверхнею ЦРТГМ та залежить від товщини прогрітого шару (δ) та температуропровідності горючого матеріалу (a).

Підставляючи (4.47)–(4.50) в (4.54), одержуємо залежності часу гасіння від інтенсивності опадів над зоною пожежі (рис. 4.17). Однак представлені на рис. 4.17 функції не мають оптимуму, тому для аналізу результатів розглянемо загальну витрату води на гасіння 1 м² пожежі (G) (рис. 4.18) [458]:

$$G = I \cdot \tau_T \quad (4.55)$$

З рис. 4.18 видно, що для гасіння лісової верхової пожежі з найбільшою інтенсивністю горіння серед ландшафтних пожеж оптимальна інтенсивність опадів становить $I_{\text{опт.}} \approx 1,3 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$, та в цьому випадку мінімальна витрата становить $G_{\text{мін.}} \approx 13 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$.

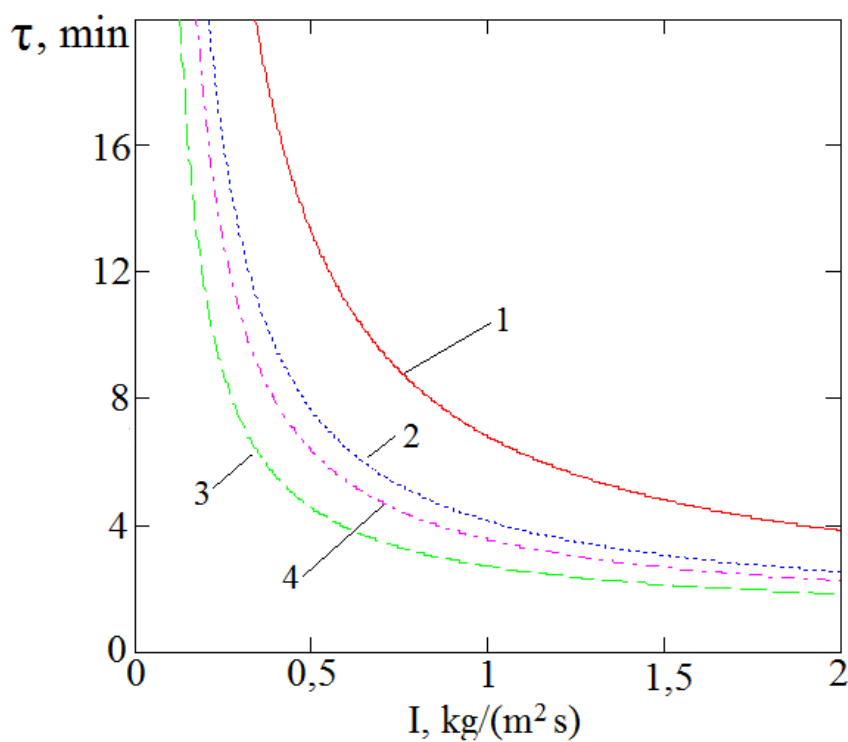


Рис. 4.17. Залежності часу гасіння τ_t різних класів природних пожеж від інтенсивності опадів I : 1 – лісові верхові; 2 – лісові низові; 3 – торф'яні; 4 – степові

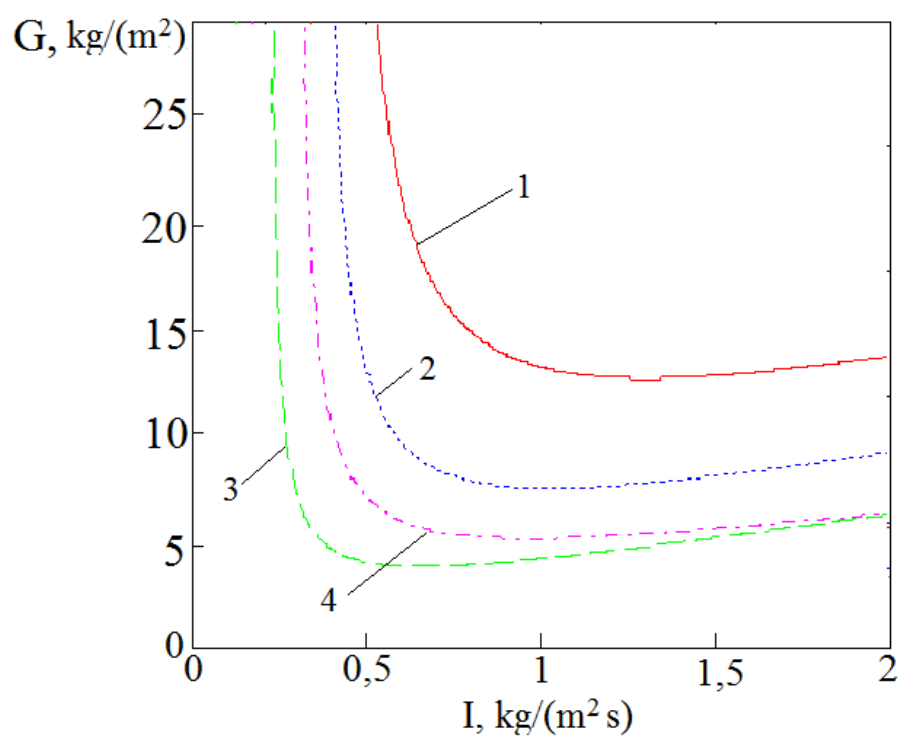


Рис. 4.18. Залежності витрати води G на гасіння різних класів природних пожеж: 1 – лісові верхові; 2 – лісові низові; 3 – торф'яні; 4 – степові

Отримані вище результати розрахунків необхідно порівняти з основними характеристиками опадів, наведеними в табл. 4.4 [21].

Таблиця 4.4

Характеристики атмосферних опадів

Види опадів	Інтенсивність, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$	Вологозапас, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$	Середній діаметр крапель, мм
Мряка	0,05–0,1	50–90	0,2–0,3
Обложні	0,3–0,6	60–100	0,3–0,7
Злизові	1,2–1,5	30–70	0,7–1

Дані табл. 4.4 показують, що якщо за вологозапасом всі види опадів задовольняють умовам гасіння пожежі (рис. 4.18), то за інтенсивністю тільки злизові дощі відповідають оптимальній інтенсивності для гасіння верхових та низових лісових пожеж. Отже, для таких пожеж час гасіння, а відповідно, і необхідний вологозапас хмарних утворень при обложних опадах, буде визначатися за даними рис. 4.17. При цьому інтенсивність мряки є недостатньою для гасіння всіх видів природних пожеж [458].

Для повноти розгляду поставленого завдання необхідно також врахувати процес виносу краплі із зони горіння потужними конвективними потоками, які впливають при великих ландшафтних пожежах. Винос крапель із зони горіння відбувається у випадку, коли швидкість висхідних потоків перевищує швидкість польоту краплі. Критичною швидкістю є швидкість витання [456]:

$$W_{\text{вит.}} = \sqrt{\frac{4gd_k(\rho_k - \rho_\Gamma)}{3\rho_\Gamma C_x}}, \quad (4.56)$$

де g – прискорення вільного падіння; d_k – діаметр краплі; ρ_k – густина краплі води; ρ_Γ – густина повітря; C_x – коефіцієнт лобового опору (при $2 \cdot 10^5 > Re > 500$ $C_x = 0,44$; при $500 > Re > 2$ $C_x = 18,5 \cdot Re^{-0,6}$).

Використовуючи дані щодо дисперсності опадів (табл. 4.4) та середньої інтенсивності конвективних потоків [456, 459], одержуємо порівняльну діаграму (рис. 4.19).

Отримані результати показують, що у випадку гасіння лісових верхових пожеж за будь-якої інтенсивності опадів буде відбуватися знос крапель висхідними конвективними потоками; також досить проблематично штучно забезпечити необхідну інтенсивність опадів для гасіння лісових низових пожеж. Відповідно, узагальнюючи отримані вище дані, необхідно зробити висновок, що гасіння лісових верхових та низових пожеж за допомогою штучної інтенсифікації опадів не реалізується шляхом безпосереднього впливу на процес горіння, а відбувається за рахунок локалізації зони пожежі при зволоженні ЦРТГМ по периметру горіння.

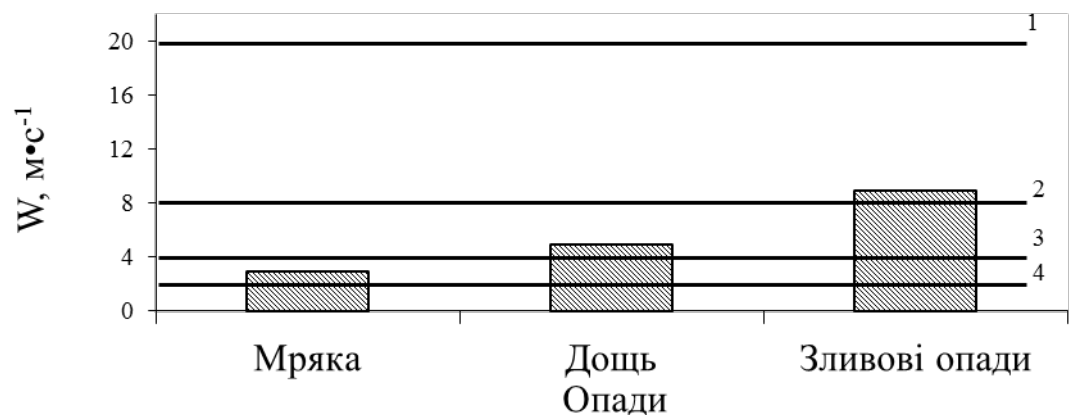


Рис. 4.19. Порівняльна діаграма швидкості витання краплі при різних опадах та швидкості висхідних конвективних потоків: 1 – лісові верхові пожежі; 2 – лісові низові пожежі; 3 – степові пожежі; 4 – торф'яні пожежі

Відповідно вперше отримано основні характеристики опадів при гасінні великих природних пожеж. Побудовано модель падіння крапель дощу та їх випаровування з відповідним охолодженням повітря та підвищенням його вологості. Отримані результати дозволяють оцінити інтенсивність опадів на різних висотах в широкому діапазоні температур

повітря (-50-800 °C), що є необхідним для прогнозування інтенсивності осадження небезпечних речовин з атмосфери.

4.1.5. Розробка математичної моделі процесу локалізації та ліквідації штучно ініційованими опадами осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням

Вирішуючи поставлену задачу, відмітимо, що поведінка одиничної краплі опадів в осередку горіння описується системою трьох рівнянь (4.22), (4.26) та (4.32):

1. Рівняння руху падаючої краплі:

$$\frac{dw_d}{d\tau} = g - \frac{w_d - w_a}{m_d} \cdot \rho_a \cdot \left[6 \cdot \pi \cdot r_d \cdot v_a + \frac{C_f}{2} \cdot \pi \cdot r_d^2 \cdot |w_d - w_a| \right].$$

2. Рівняння балансу маси води у краплі:

$$4 \cdot \pi \cdot r_d^2 \cdot \rho_w \cdot \frac{dr_d}{d\tau} = -J_s.$$

3. Рівняння, що задає швидкість зміни температури краплі:

$$m_d \cdot c_{p.w} \cdot \frac{dT_d}{d\tau} = J_s \cdot \left[-\Delta h + \frac{c_{p.s} \cdot (T_a - T_d)}{\exp(B) - 1} \right].$$

Представлені вище моделі дозволяють спрогнозувати динаміку зміни вологості атмосферного повітря та горючого матеріалу при різних метеорологічних умовах та параметрах надзвичайної ситуації.

За умови, коли атмосферні опади потрапили безпосередньо в осередок горіння, кількість тепла, яку вони здатні відвести з одиниці площі осередку горіння, описується залежністю (4.51):

$$Q_{\text{відв.}} = [c_{p_v} (T_{\text{кип.}} - T_0) + H_{\text{вип.}} + c_{p_n} (T_{\text{пл.}} - T_{\text{кип.}})] \cdot I \cdot \tau_t,$$

Як було розглянуто вище, теплофізичні властивості атмосферних опадів ($c_{p_v}, H_{\text{вип.}}, c_{p_n}, T_{\text{кип.}}, T_{\text{пл.}}$), у межах певних припущень, можна вважати сталими. Інтенсивність атмосферних опадів над осередком інтенсивного горіння є керуючим впливом на локалізацію та ліквідації осередків інтенсивного горіння та визначає процес ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізацію та ліквідації осередків інтенсивного горіння штучно ініційованими опадами.

Граничною умовою для вищенаведеного рівняння є швидкість витання краплі ($W_{\text{вит.}}$) (4.56):

$$W_{\text{вит.}} = \sqrt{\frac{4gd_k(\rho_k - \rho_r)}{3\rho_r C_x}}.$$

За умов, коли швидкість конвективних потоків $W_{\text{конв}} \leq W_{\text{вит.}}$, краплі атмосферних опадів не потрапляють в осередок інтенсивного горіння за рахунок їх виносу потужними конвективними потоками за межі горіння. Це є граничною умовою, яка унеможливорює ліквідацію осередку горіння, та відбувається лише його локалізація.

Поєднуючи рівняння (4.22), (4.26), (4.32), (4.51) та (4.56) в одну систему, отримаємо математичну модель [445, 446]:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{dw_d}{d\tau} &= g - \frac{w_d - w_a}{m_d} \cdot \rho_a \cdot \left[6 \cdot \pi \cdot r_d \cdot v_a + \frac{C_f}{2} \cdot \pi \cdot r_d^2 \cdot |w_d - w_a| \right] \\
 4 \cdot \pi \cdot r_d^2 \cdot \rho_w \cdot \frac{dr_d}{d\tau} &= -J_s \\
 m_d \cdot c_{p.w} \cdot \frac{dT_d}{d\tau} &= J_s \cdot \left[-\Delta h + \frac{c_{p.s} \cdot (T_a - T_d)}{\exp(B) - 1} \right] \\
 Q_{\text{відв.}} &= [c_{p_b} (T_{\text{кип.}} - T_0) + H_{\text{вип.}} + c_{p_n} (T_{\text{пл.}} - T_{\text{кип.}})] \cdot I \cdot \tau_T \\
 W_{\text{вит.}} &= \sqrt{\frac{4gd_k(\rho_k - \rho_r)}{3\rho_r C_x}}
 \end{aligned} \right\} \cdot (4.57)$$

Отримана модель дозволяє проводити оцінку можливості ліквідації чи локалізації інтенсивних осередків горіння атмосферними опадами з певними характеристиками та визначати час ліквідації осередків горіння та ефективну інтенсивність атмосферних опадів для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій шляхом локалізації та ліквідації інтенсивних осередків горіння.

Таким чином, математична модель процесу локалізації та ліквідації штучно ініційованими опадами осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням представляє собою систему з п'яти залежностей. Перша залежність описує рух падаючої краплі опадів над осередком надзвичайної ситуації. Друга та третя залежності описують масовий та тепловий баланс краплі в осередку горіння. Четверта залежність описує процес поглинання тепла атмосферними опадами від осередку горіння залежно від управлінського впливу на атмосферні процеси. П'ята залежність визначає граничну умову, коли ліквідація осередку інтенсивного горіння неможлива та відбувається лише його локалізація.

4.2. Керуючий алгоритм організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізації осередків інтенсивного горіння

Схема керуючого алгоритму організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізації осередків інтенсивного горіння, представлено на рис. 4.20.

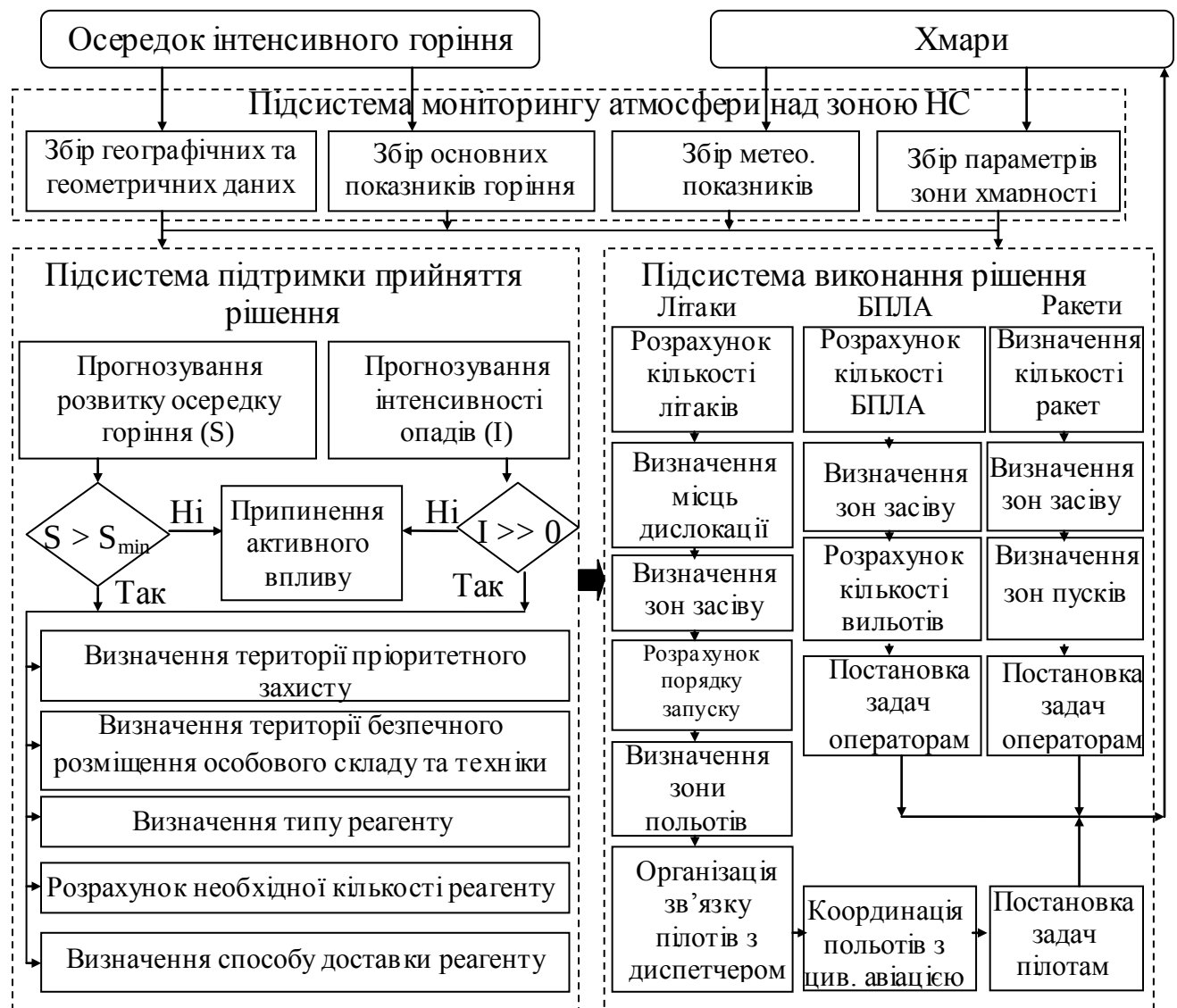


Рис. 4.20. Керуючий алгоритм реалізації організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізації осередків інтенсивного горіння

Розроблений алгоритм відповідає вимогам забезпечення повноти зібраної моніторингової інформації, що забезпечує якість прогнозування розвитку надзвичайної ситуації; забезпечення умов ефективної ліквідації негативних наслідків від НС; забезпечення безпеки особового складу, задіяного на ліквідації атмосферного забруднення; мінімізація негативних наслідків для населення та навколишнього середовища в зоні ураження [396].

Керуючий алгоритм складається із 21 блоку, розміщених на трьох ієрархічних рівнях, пов'язаних прямими та зворотними зв'язками.

На першому ієрархічному рівні знаходяться чотири блоки. Збір географічних та геометричних даних про зону горіння здійснюється спираючись на дані оперативної розвідки та супутникового контролю. Збір основних показників горіння здійснюється шляхом встановлення виду горючого матеріалу та його вологості. Збір метеорологічних показників здійснюється на основі офіційних даних державних та регіональних органів гідрометеоцентрів. Збір параметрів зони хмарності здійснюється шляхом використання метеозондів та БПЛА з відповідним апаратним забезпеченням.

На другому ієрархічному рівні розташовано 9 блоків. За результатами визначення площі осередку горіння та прогнозування його розвитку відбувається оцінка доцільності використання розробленого організаційно-технічного методу. Оцінка можливості штучного ініціювання опадів з необхідною інтенсивністю проводиться на основі моніторингових даних. Якщо всі умови відповідають вимогам активації організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізації осередків інтенсивного горіння, то проводиться визначення території пріоритетного захисту з урахуванням розміщення населених пунктів та потенційно небезпечних об'єктів. На основі прогнозів поширення осередку інтенсивного горіння визначається територія безпечного розміщення особового складу та техніки. З урахуванням розмірів зони надзвичайної ситуації проводиться розрахунок необхідної кількості реагентів для штучного ініціювання опадів. Визначення способу доставки

реагенту проводиться з урахуванням забезпечення безпеки польотів над зоною надзвичайної ситуації.

На третьому ієрархічному рівні, залежно від обраного способу доставки реагенту, знаходиться від чотирьох до восьми блоків. Розглянемо найбільш розвинений алгоритм для випадку залучення літаків. Розрахунок кількості літаків здійснюється виходячи із необхідної кількості реагенту та тактико-технічних характеристик літаків, що є у розпорядженні. Визначення місця дислокації літаків проводиться з метою мінімізації відстані від осередку НС до придатних злітно-посадкових смуг. Визначення зон засіву проводиться з урахуванням забезпечення безпеки польотів та інерційності штучного ініціювання опадів. Визначення зони польотів проводиться з урахуванням небезпеки прольоту літаків над потужними конвективними потоками над осередками інтенсивного горіння. Необхідною складовою реалізації методу ліквідації наслідків НС шляхом залучення авіації є організація зв'язку пілотів з диспетчерськими службами. Диспетчерські служби проводять координацію польотів з цивільною авіацією. На останньому етапі відбувається постановка задач пілотам.

Активні дії з виконання керівного рішення із впливом на атмосферні процеси замикають контур управління.

Таким чином, керуючий алгоритм організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізації осередків інтенсивного горіння складається із 21 блоку, розміщених на трьох ієрархічних рівнях, пов'язаних прямими та зворотними зв'язками.

4.3. Описання процедур застосування організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізації осередків інтенсивного горіння

Розроблений організаційно-технічний метод призначений для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізації осередків інтенсивного горіння.

Використання даного методу передбачає виконання наступних процедур:

1. Обробка та систематизація моніторингових даних;
2. Прогнозування розвитку осередку горіння та інтенсивності опадів;
3. Постановка конкретних задач виконавцям;
4. Безпосередній вплив на атмосферні процеси.

Більш детально ці процедури розкрито нижче.

1. В підсистемі моніторингу відбувається збір, обробка та систематизація даних про: координати та геометричні розміри осередку інтенсивного горіння на момент часу τ ($N_{\tau}^{zone}, S_{\tau}^{zone}, W_{\tau}^{zone}, E_{\tau}^{zone}, h_{\tau}^{zone}$); метеорологічні параметри атмосфери над зоною НС (розподіл температур по висоті T_h ; швидкість та напрямок вітру V_h ; атмосферний тиск P_h ; вологість повітря W_h); координати $N_{\tau}^{cloud}, S_{\tau}^{cloud}, W_{\tau}^{cloud}, E_{\tau}^{cloud}, h_{\tau}^{cloud}$, вологозапас та водність хмар ВЗ, В, потенційно придатних до штучного опадоутворення.

2. За допомогою отриманих від підсистеми моніторингу даних в підсистемі підтримки прийняття рішення проводиться прогнозування розвитку осередку горіння; прогнозування інтенсивності опадів (І) над зоною горіння при використанні того чи іншого методу штучної іонізації повітря. При умові значної небезпеки для населення та навколишнього середовища від наслідків НС та достатньої прогнозованої інтенсивності опадів для ліквідації наслідків від НС особа, що приймає управлінське рішення, визначає: території пріоритетного захисту (ТПЗ) (наприклад, населені

пункти); територію безпечного розміщення особового складу та техніки N_{safe} , S_{safe} , W_{safe} , E_{safe} ; тип реагенту залежно від метеоумов (гігроскопічні, льодоутворюючі) та виду хімічного забруднення (для нейтралізації та ефективного осадження небезпечних речовин); необхідну кількість реагенту залежно від потужності хмари, її водності та вологозапасу, а також концентрації небезпечних речовин в атмосфері, які необхідно нейтралізувати; спосіб доставки реагенту – за умови великої площі засіву та значної кількості необхідного реагенту рекомендується задіяти пілотовані літаки; у випадку невеликої кількості необхідного реагенту, а також за відсутності у розпорядженні літаків рекомендується використання безпілотних літальних апаратів; за умови складної метеорологічної обстановки та можливої небезпеки пілотам рекомендовано використання малогабаритних ракет.

3. Отримані за результатами моніторингу дані, результати проведеного прогнозування та прийняті управлінські рішення передаються у підсистему виконання рішення. Керівник підсистеми виконання рішення, залежно від обраного способу доставки реагенту, проводить:

3.1. При використанні ракет: визначення кількості ракет відповідного класу; визначення координат та висоти зон засіву; визначення безпечних зон пусків ракет; постановку задач операторам пусків ракет.

3.2. При використанні БПЛА: розрахунок кількості задіяних БПЛА виходячи з наявної кількості; визначення координат та висоти зон засіву; розрахунок кількості вильотів, враховуючи розміри зони засіву та кількість та вантажопідйомність задіяних БПЛА; постановку задач операторам БПЛА.

3.3. При використанні пілотованих літаків: розрахунок необхідної кількості літаків; визначення наявної кількості літаків та їх місця дислокації; визначення координат та висоти зон засіву; розрахунок періодичності запуску піропатронів залежно від їх типу та необхідної концентрації реагенту; визначення безпечної зони польотів. Забороняються прольоти літаків крізь зону хімічного чи радіаційного забруднення та під засіяними

хмарами для запобігання потраплянню блискавки в літак; організація зв'язку пілотів з диспетчером та керівником польотів; координація польотів з диспетчерами цивільної авіації; постановка задач пілотам.

4. Проводиться активний вплив на зону хмарності з урахуванням інерції від періоду засіву до початку випадіння опадів 15-30 хв. та швидкості і напрямку вітру.

При забезпеченні умов безпеки населення та навколишнього середовища або при неможливості забезпечення опадів необхідної інтенсивності активний вплив на хмари припиняється.

Параметри зони хмарності та метеоумови є основою для прогнозування інтенсивності штучно ініційованих опадів. При цьому необхідно порівняти результати прогнозування для різних способів штучного впливу. Враховуючи технічні можливості використання того чи іншого способу проводиться вибір найбільш ефективного способу. Якщо особою, що приймає рішення, обрано хімічний метод штучного впливу на опади, залежно від метеоумов та виду забруднюючої речовини проводиться вибір складу реагенту.

Обов'язковим фактором у разі прийняття управлінського рішення є прогнозування зон ураження при випадінні атмосферних опадів з урахуванням їх інтенсивності.

У випадку мінімізації негативних наслідків від масштабних природних пожеж, за допомогою розробленої математичної моделі проводиться розрахунок динаміки зміни вологості атмосфери та горючої речовини з урахуванням параметрів зони горіння. Ці параметри визначають площу пожежі під впливом опадів та, відповідно, інтенсивність викиду продуктів горіння в атмосферу.

Для розрахунків визначаючих критеріїв отриманих моніторингових даних недостатньо, деякі параметри необхідно визначати з довідникових джерел та бази експериментальних даних. Додаткова база даних, разом з

підсистемою моніторингу та елементами прогнозування розвитку НС, складають геоінформаційну систему.

Отримані результати прогнозування дозволяють керівнику ліквідації зони ураження атмосфери від НС прийняти відповідні управлінські рішення по мінімізації наслідків негативного впливу від НС. Прийняті рішення передаються в підсистему виконання рішення, де проводиться їх формалізація та доведення до виконавців.

Для формування правильного рішення при ліквідації атмосферного забруднення необхідно зібрати, обробити та проаналізувати великий масив різнопланової інформації. Завдання додатково ускладнюється при використанні різних методів штучного впливу на атмосферні процеси. Як розглядалося вище, питання досить точного прогнозування розвитку аварії, а також фізико-хімічних та термодинамічних процесів в атмосфері, вирішуються із застосуванням складних математичних моделей та розрахункових комплексів.

Виходячи із цього, відповідно до розробленого алгоритму (рис. 4.20), для автоматизації підсистеми підтримки ухвалення управлінського рішення оперативними співробітниками, які задіяні на ліквідації зони забруднення, необхідно створити автоматизований програмний комплекс (АПК), що дозволить оперативно узагальнити моніторингову інформацію та проводити прогнозування розвитку подій при прийнятті тих або інших рішень.

Основою для побудови структури програмного комплексу є розроблена фізична модель процесу мінімізації наслідків НС для атмосфери.

Основним завданням, що ставиться перед АПК, є визначення можливості та ефективного використання того або іншого методу штучного опадоутворення для очищення нижньої атмосфери від конкретної забруднюючої речовини в умовах певних метеорологічних умов.

Для вирішення цього завдання першорядним є повний моніторинг зони забруднення, що включає:

- визначення хімічної природи забруднюючої речовини та розподілу її за концентрацією в зоні забруднення;
- визначення геометричних розмірів та географічних координат зони забруднення;
- моніторинг метеорологічної ситуації, як у зоні забруднення, так і над нею до висот 5–7 км (швидкість та напрямок вітру, вологість та температура повітря, атмосферний тиск, вологозапас хмари та ін.).

Для реалізації цих функцій можуть бути задіяні всі види моніторингу (супутникові, БПЛА, наземні автоматизовані системи контролю).

На основі зібраної інформації керівник ліквідації забруднення атмосфери ухвалює рішення щодо способу штучного ініціювання опадів над/у зоні забруднення. У випадку, коли метеоумови та характер забруднення дозволяють використати літальні апарати, для доставки реагенту в зону впливу рекомендується використати пілотовані або безпілотні літальні апарати, які дозволяють проводити засівання активної зони з високою точністю на значній площі. При несприятливих умов для доставки реагенту можуть використовуватися малогабаритні ракети. Слід зазначити, що такий спосіб є малоефективним при значних масштабах забруднення. У цьому випадку найбільш універсальним, за умовами застосування, розмірами зони забруднення та найбільш ефективним, є електрофізичний метод штучного ініціювання опадів з використанням багатопозиційних джерел НВЧ електромагнітного випромінювання.

Другим етапом роботи АПУ є прогнозування інтенсивності опадів над зоною ураження від НС при встановлених параметрах. Для опису процесів в цій зоні – зоні опадоутворення використовуються моделі інтенсивності краплеутворення в хмарі при різних властивостях ядер конденсації та різних метеоумовах, розглянуті раніше. При моделюванні враховуються поверхневі властивості ядер конденсації, їх розмір, електричний заряд та концентрація. Ці параметри вводяться керівником у програмний комплекс, з урахуванням обраного способу штучного опадоутворення та хімічного складу реагенту.

У процесі конденсації та коагуляції розмір та маса краплі ростуть, та при досягненні критичних значень, конвективні потоки повітря не в змозі втримувати краплі у висячому положенні та вони випадають із зони опадоутворення.

Друга зона являє собою зону випадання опадів, де відбувається випаровування крапель дощу. Моделювання динаміки випаровування краплі при її падінні проведено раніше. Вихідними параметрами для опису процесів у даній області є інтенсивність краплинного потоку, що випав із зони опадоутворення та потрапив у зону ураження від НС, дані щодо метеоумов у зазначеній області, а також температура пожежі, за її наявності.

Описана вище процедура реалізована у вигляді програмного продукту «ПРОГНОЗУВАННЯ АТМОСФЕРНИХ ОПАДІВ», розробленого в програмному середовищі Delphi (рис. 4.21) [460].

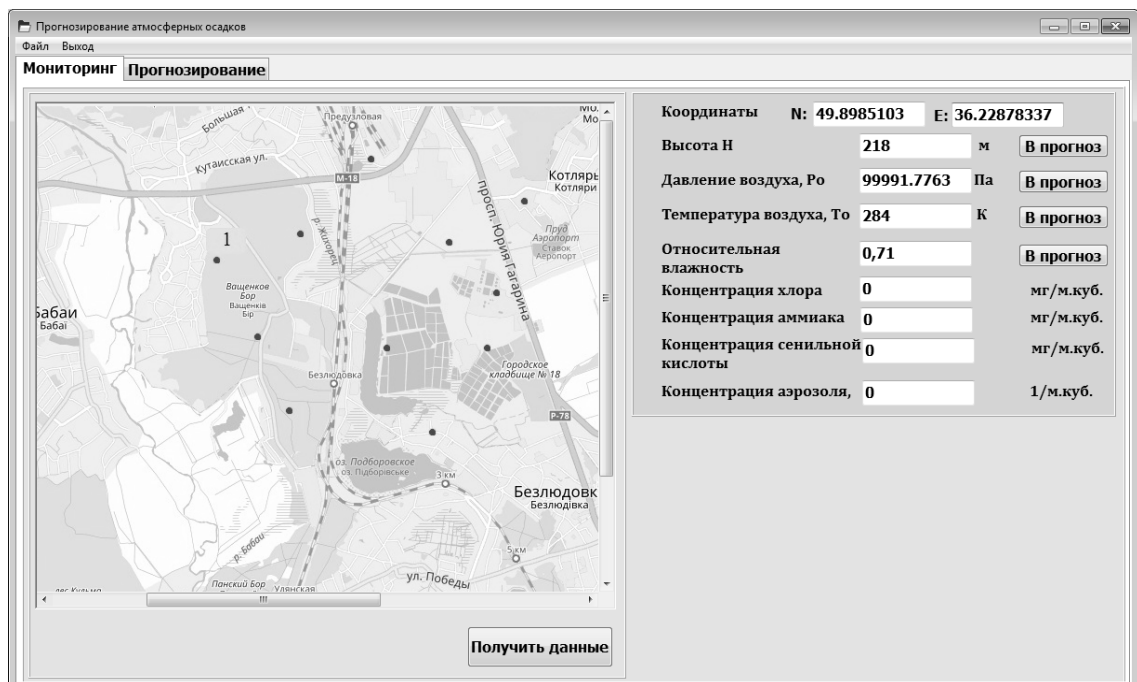


Рис. 4.21. Вкладка «МОНІТОРИНГ» інтерфейсу АПК «ПРОГНОЗУВАННЯ АТМОСФЕРНИХ ОПАДІВ»

Інтерфейс програми складається із двох розділів (вкладок) – «МОНІТОРИНГ» та «ПРОГНОЗУВАННЯ». Вкладка «МОНІТОРИНГ»

(рис. 4.22) створена для зручної обробки інформації, отриманої в результаті моніторингу зони забруднення та метеорологічної обстановки. Розроблена програма орієнтована на проведення моніторингу зони забруднення з використанням БПЛА, які оснащені приладовою базою для автоматичного моніторингу необхідних параметрів та бездротовою передачею їх на АПК.

У лівій частині цієї вкладки розміщена карта місцевості, над якою існує забруднення атмосфери. Конкретний регіон та масштаб карти обирає оператор переміщенням відповідних курсорів. По переданим від БПЛА координатам у режимі реального часу на карті розміщаються точки передачі даних від БПЛА.

Безпосередньо передані від БПЛА-розвідника дані, прив'язані до точки на карті, відображаються в правій частині вкладки. Керівник ліквідації забруднення аналізує отримані дані та, якщо виникне потреба, може відразу їх відправити для проведення прогнозування.

Друга вкладка «ПРОГНОЗУВАННЯ» (рис. 4.22) складається з області введення вихідних параметрів розрахунку та виводу отриманих даних. Область введення вихідних параметрів, у свою чергу, також розділена на дві частини, куди вносяться параметри зони опадоутворення (I) та зони випадіння (II) відповідно. Дані, які не вдалося одержати в результаті моніторингу, оператор вносить вручну, ґрунтуючись на отриманій іншим способом інформації. Після натискання на кнопку «ПРОГНОЗ» робить розрахунок інтенсивності опадів, результати якого виводяться у вигляді графіка або таблиці.

Використовуючи розроблене АПК, керівник ліквідації забруднення зможе оперативно одержати інформацію про можливості штучного викликання опадів тим або іншим способом при існуючих атмосферних умовах. У випадку, коли визначена теоретична можливість штучного ініціювання опадів над зоною забруднення з використанням АПК «ПРОГНОЗУВАННЯ АТМОСФЕРНИХ ОПАДІВ», можна визначити найбільш ефективний спосіб впливу, оцінити інтенсивність прогнозованих

опадів у той або інший проміжок часу та загальну прогнозовану тривалість опадів

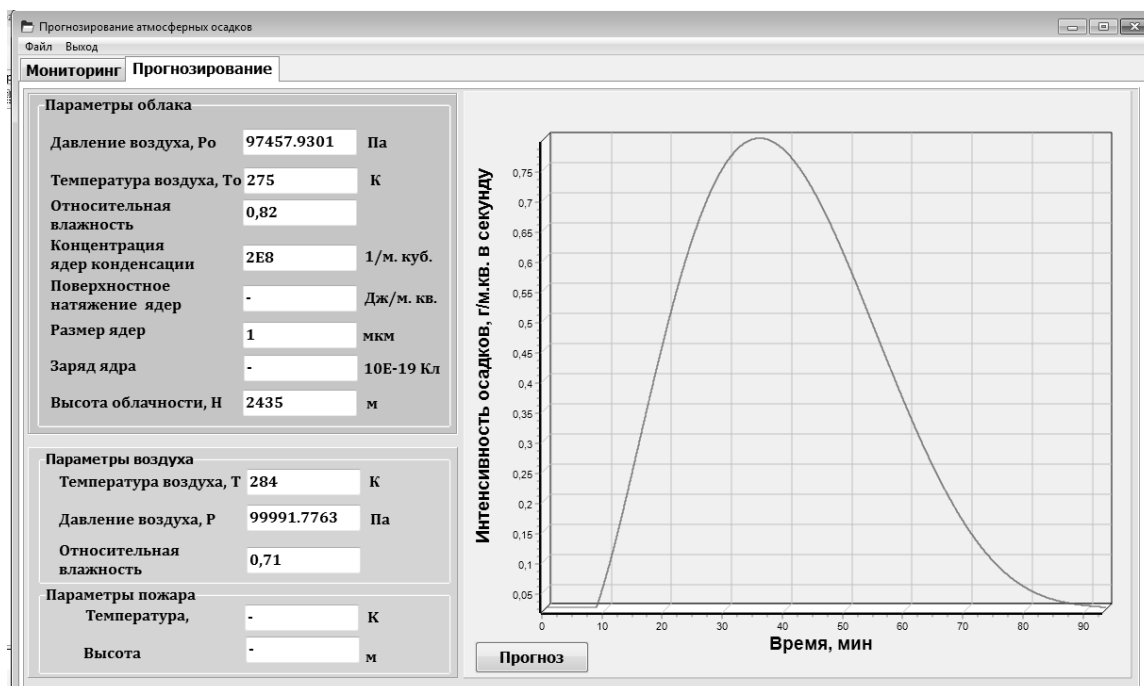


Рис. 4.22. Вкладка «ПРОГНОЗУВАННЯ» інтерфейсу АПК «ПРОГНОЗУВАННЯ АТМОСФЕРНИХ ОПАДІВ»

Таким чином, використання організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізації осередків інтенсивного горіння передбачає використання чотирьох процедур, а саме: збір, обробка та систематизація моніторингових даних; прогнозування розвитку осередку горіння та інтенсивності опадів; постановка конкретних задач виконавцям; безпосередній вплив на атмосферні процеси.

Висновки по розділу 4.

1. Математична модель процесу локалізації та ліквідації штучно ініційованими опадами осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням представляє собою систему з п'яти залежностей.

Перша залежність описує рух падаючої краплі опадів над осередком надзвичайної ситуації. Друга та третя залежності описують масовий та тепловий баланс краплі в осередку горіння. Четверта залежність описує процес поглинання тепла атмосферними опадами від осередку горіння залежно від управлінського впливу на атмосферні процеси. П'ята залежність визначає граничну умову, коли ліквідація осередку інтенсивного горіння неможлива та відбувається лише його локалізація.

2. Керуючий алгоритм організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізації осередків інтенсивного горіння складається із 21 блоку, розміщених на трьох ієрархічних рівнях, пов'язаних прямими та зворотними зв'язками.

3. Використання організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізації осередків інтенсивного горіння передбачає виконання чотирьох процедур, а саме: збір, обробка та систематизація моніторингових даних; прогнозування розвитку осередку горіння та інтенсивності опадів; постановка конкретних задач виконавцям; безпосередній вплив на атмосферні процеси.

РОЗДІЛ 5.

ПЕРЕВІРКА ДОСТОВІРНОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНИХ МЕТОДІВ ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ, ЩО ПРИЗВОДЯТЬ ДО ВИКИДУ В АТМОСФЕРУ НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН

П'яту задачу будемо вирішувати наступним чином:

Першочергово опишемо лабораторну установку для дослідження процесів осадження газоподібних та дисперсних речовин та методику проведення експериментів з її використанням. Потім проаналізуємо результати виконаних лабораторних експериментів по перевірці достовірності розроблених математичної моделі осадження штучно ініційованими атмосферними опадами небезпечних речовин та організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин.

Після цього опишемо розроблену лабораторну установку для дослідження процесів горіння при різних метеорологічних умовах та методику проведення експериментів на неї. Далі проаналізуємо результати виконаних лабораторних експериментів по перевірці достовірності розроблених математичної моделі процесу локалізації та ліквідації штучно ініційованими опадами осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням та організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізації осередків інтенсивного горіння.

5.1. Лабораторна установка та методика проведення досліджень процесів осадження газоподібних та дисперсних речовин

Для дослідження процесів осадження газоподібних, рідких та твердих дисперсних речовин (включаючи дими) водними аерозолями різної інтенсивності та дисперсності, що імітують атмосферні опади, розроблено та створено лабораторну експериментальну установку, схему якої представлено на рис. 5.1 [461].

Оскільки основним завданням експериментальних досліджень є розгляд процесів абсорбції в атмосфері, то за основу експериментальної установки обрано циліндричний прямоточний абсорбер. Для дослідження процесу абсорбції при різних фізико-хімічних умовах корпус камери виготовлено у герметичному виконанні.

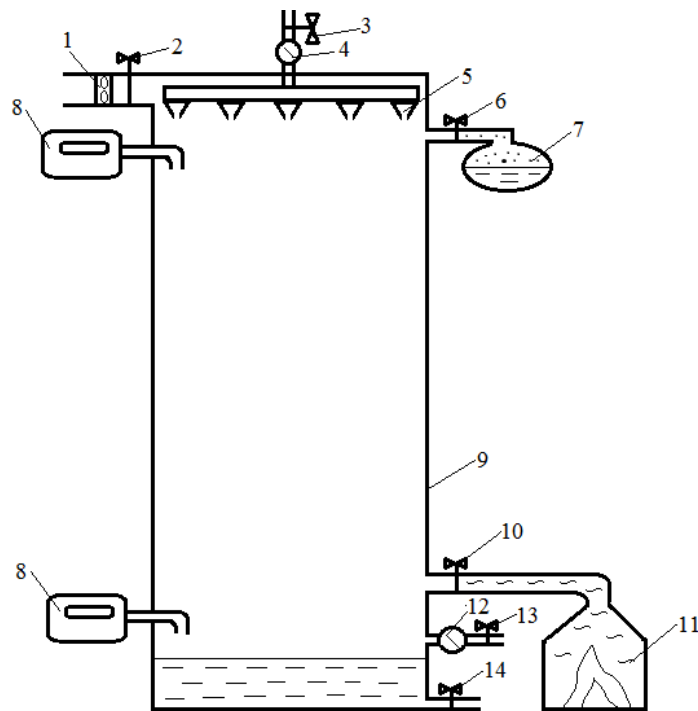


Рис. 5.1. Схема експериментальної установки для дослідження процесів масообміну в атмосфері: 1 – вентилятор; 2, 6, 10, 13 – газоподібні запірні крани; 3, 14 – рідинні запірні крани; 4 – рідинний витратомір; 5 – форсунки; 7 – ультразвуковий диспергатор; 8 – газоаналізатори; 9 – корпус; 11 – відсік для горіння; 12 – газовий витратомір

Для візуального контролю процесу абсорбції камера герметичного циліндричного корпусу виконана із прозорою стінкою. У верхній частині

камери розміщені з'ємні цільнофакельні форсунки, розташовані за схемою рис. 5.1. До форсунок підводиться рідина крізь арматуру з запірним краном та рідинним витратоміром. За рахунок зміни форсунок з різними геометричними параметрами, заміни деяких форсунок на заглушки та зміни потоку рідини досягається можливість регулювання інтенсивності та дисперсності потоку рідинного аерозолі. Для введення в об'єм камери дрібнодисперсного рідинного аерозолі з дисперсністю 0,01–0,5 мм в верхній частині камери встановлено патрубок з запірним краном та ультразвуковим диспергатором. Для очищення об'єму камери від залишкових газів та аерозолів в верхній частині камери встановлено патрубок із запірним краном та витяжним вентилятором. Зверху та знизу камери встановлені всмоктуючі патрубки газоаналізаторів, які дозволяють визначати середньооб'ємну концентрацію газу, що абсорбується. Для контролю інтенсивності масообміну та відбору проб абсорбенту в нижній частині камері встановлено патрубок із запірним краном. Газ (пар) в об'єм камери вводиться крізь патрубок із запірним краном та витратоміром. Дослідження проводяться як після встановлення стаціонарної концентрації в об'ємі камери, так і в нестаціонарному режимі.

Використання запропонованої камери для дослідження процесів масообміну дозволяє моделювати умови контакту атмосферних твердих та рідинних аерозолів та газів (парів) при різних фізико-хімічних умовах процесу, проводити лабораторні експериментальні дослідження процесів адсорбції, абсорбції та десорбції газів (парів), пилу та продуктів горіння рідинними аерозолями, а також моделювати процеси атмосферного очищення повітря опадами.

Незважаючи на те, що в літературі досить багато робіт з результатами експериментальних досліджень процесів масообміну [291, 365, 366], однак всі експериментальні методики складаються для конкретного розглянутого випадку та немає єдиної методики, що дозволяє узагальнити в єдиному параметричному полі отримані дані.

Для порівняльного аналізу існуючих моделей проведена серія експериментів по дослідженню впливу інтенсивності потоку аерозолі на швидкість вимивання аміаку водним аерозолем.

Представлена установка дозволяє досліджувати процеси очищення атмосферного повітря рідинними аерозолями від забруднюючих газів, пари, пилу та продуктів горіння.

Методика проведення дослідження полягає у наступному: корегування інтенсивності дисперсності рідкого аерозолі (абсорбенту) відбувається за рахунок зміни швидкості потоку рідини за допомогою вентиля та його контролю по витратоміру, а також за рахунок зміни геометричних характеристик та кількості з'ємних форсунок, розташованих у верхній частині камери. Форсунки розміщені по всій верхній поверхні камери та можуть замінятися заглушками для зниження інтенсивності потоку.

Однак за допомогою форсунок різних геометричних параметрів можна забезпечити дисперсність у діапазоні 0,5–2 мм. Для подачі в камеру дрібнодисперсного рідинного аерозолі з розмірами крапель 0,01–0,5 мм у верхній частині камери передбачений вхідний патрубок від ультразвукового диспергатора, що при різних режимах роботи забезпечує необхідну дисперсність.

Введення в камеру газів, пари та пилу здійснюється через патрубок у нижній частині камери. Кількість поданого газу контролюється витратоміром. Для дослідження процесів абсорбції продуктів горіння в установці передбачена додаткова камера згоряння, у якій відбувається спалювання необхідної горючої речовини, а продукти горіння надходять через патрубок у камеру.

Для ідентифікації вмісту газу та безперервного контролю зміни його концентрації в камері знаходяться газоаналізатори. Оскільки гази по об'єму камери можуть бути розподілені нерівномірно, то для визначення середньооб'ємної концентрації газоаналізатори розташовані у верхній та нижній частинах камери.

Герметичне виконання корпусу камери дозволяє проводити експерименти як при сталій концентрації газу, так і при нестаціонарному режимі.

Під час проведення експерименту можна проводити відбір проб абсорбенту для контролю ступеня його насичення абсорбатом.

Після проведення експерименту проводиться очищення об'єму камери від залишкових продуктів за допомогою витяжного вентилятора.

Як приклад обрано аміак, через те що для цього газу досить повно розглянуто та багаторазово перевірено моделі з використанням критеріальних рівнянь та мат. моделей [201-203].

Маса крапель визначалася з розрахунку їхньої дисперсності $r \approx 0,8$ мм, швидкість падіння обиралася середньою по об'єму з розрахунку висоти камери $H = 2$ м. Виміри проводили серіями по трьох експериментах, з яких визначалося середнє значення обмірюваних даних. Також необхідно відзначити, так як швидкість абсорбції має однакову ступеневу залежність від концентрації крапель та їхнього розміру, а інтенсивність опадів різну ($J \sim C_{\text{drop}}$, $J \sim R^3$), то при однаковій інтенсивності опадів перевагу мають дрібнодисперсні опади з великою концентрацією крапель та абсорбційною поверхнею.

В якості дрібнодисперсного аерозолі обрано пил оксиду кремнію (SiO_2) з розміром часток в діапазоні 50-100 мкм.

Для ідентифікації вмісту аерозольних продуктів горіння та забезпечення безперервного контролю зміни їхньої концентрації у камері знаходяться оптичні димові датчики з насосом для забору проби. Принцип роботи такого датчика полягає у використанні оптичного ефекту розсіювання інфрачервоного випромінювання на частках диму. Вимірювальна камера цього пристрою містить ІЧ-світлодіод та фотоприймач, орієнтовані відносно один одного так, щоб випромінювання світлодіоду в нормальних умовах не потрапляло на фотоприймач (рис. 5.2). Для виключення можливості випадкового потрапляння випромінювання

(наприклад, відбитого від стінок) на фотоприймач, воно направляється в спеціально сконструйовану оптичну камеру. З появою в повітрі часточок диму вони потрапляють в оптичну камеру та на них відбувається хаотичне розсіювання випромінювання діода, внаслідок чого частина його починає потрапляти на фотоприймач, забезпечуючи отримання електричного сигналу. Рівень цього сигналу тим вище, чим більше концентрація розсіюючих часток диму в повітрі.

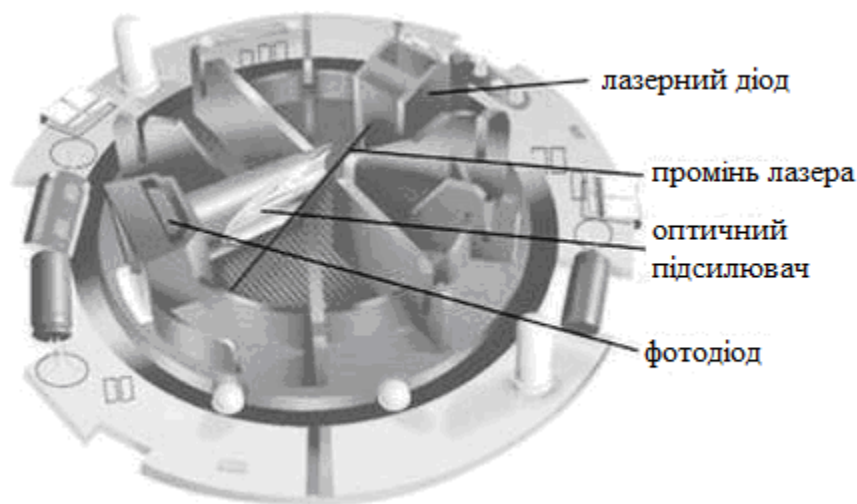


Рис. 5.2. Конструкція оптичного димового датчика

Оскільки аерозолі по об'єму камери можуть бути розподілені нерівномірно, то задля знаходження середньооб'ємної концентрації датчики розташовані у верхній та нижній частинах камери.

Герметичне виконання корпусу камери дозволяє проводити експерименти як при сталій концентрації диму, так і при нестаціонарному режимі. Під час експерименту на установці можна проводити відбір проб сорбенту для контролю ступеня його насичення сорбатом.

Після проведення експерименту проводиться очищення об'єму камери від залишкових продуктів за допомогою витяжного вентилятора.

Експериментальні дослідження проводили по осадженню продуктів горіння (диму) сосни аерозолем водяного розчину дисперсністю ~ 1 мкм. Концентрацію диму в камері контролювали гелій-неоновим лазером типу

ЛГН-2076, випромінювання якого вводиться в камеру через вікно та спрямовується на фотометричний фотоелектронний помножувач типу ФЭУ-79. Концентрація аерозолі вимірювалась шляхом перерахунку пропускної здатності аерозолі.

Таким чином, розроблена лабораторна установка для дослідження процесів осадження газоподібних та дисперсних речовин являє собою камеру для дослідження процесів масообміну та методика експериментів, яка дозволяє перевіряти достовірність розроблених моделей осадження штучно ініційованими атмосферними опадами небезпечних речовин та організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин.

5.2. Результати лабораторної експериментальної перевірки достовірності організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин

Експериментальні дослідження проводились у три етапи: по-перше, проведено перевірку достовірності модифікованої моделі осадження газоподібних дисперсних речовин, на прикладі осадження аміаку. На другому етапі проведено експериментальну перевірку достовірності моделі осадження дисперсних речовин на прикладі дрібнодисперсного пилу оксиду кремнію (пісок). Виходячи з того, що дисперсні продукти горіння мають складну поверхневу структуру, для підвищення точності прогнозування осадження аерозольних продуктів горіння, на третьому етапі проведено експериментальні дослідження з отриманням регресійних рівнянь.

Результати досліджень по осадження небезпечної газоподібної речовини (аміак) представлені на рис. 5.3 [462].

Перевірка адекватності моделі проводилась за критерієм Фішера [463]:

$$F = \frac{s_{ад}^2}{s_0^2} \leq F_{(0.05; f_{ад}; f_y)}, \quad (5.1)$$

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.

$$F = 2,7862 < F_{(0.05; f_{ад}; f_y)} = 3,9381. \quad (5.2)$$

Відповідно перевірка адекватності модифікованої моделі дала позитивний результат.

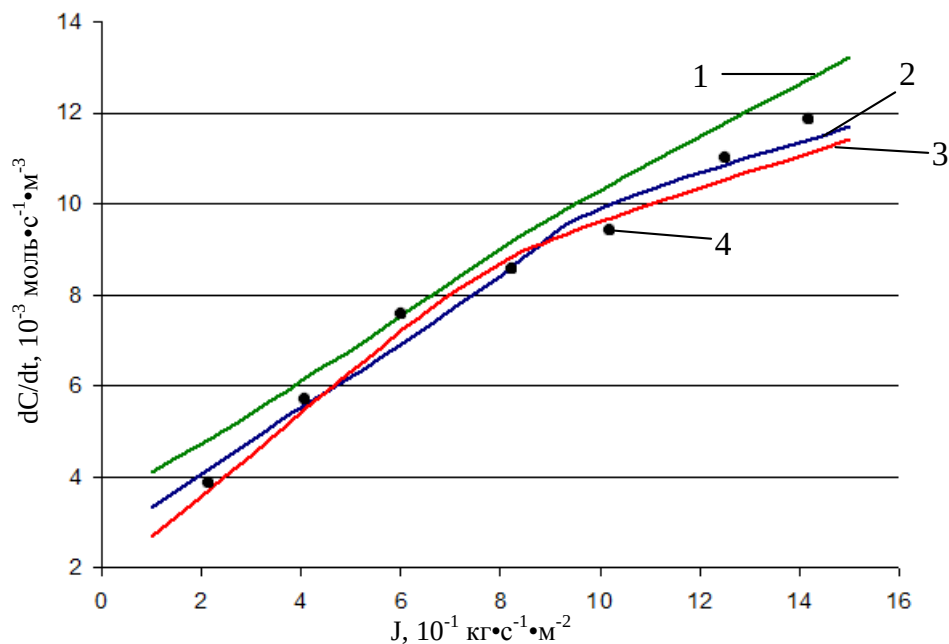


Рис. 5.3. Залежності швидкості вимивання аміаку водним аерозолем від інтенсивності потоку, отримані розрахунковим та експериментальним шляхом: 1 – розрахунок по критеріальному рівнянню; 2 – розрахунок за допомогою доповненої поетапної моделі; 3 – розрахунок за допомогою симуляційної математичної моделі MD; 4 – експериментальні дані

З аналізу теоретичних та експериментальних результатів можна зробити висновок, що найбільшу адекватність опису експериментальних даних має симуляційна модель MD. При цьому доповнена нами поетапна модель (кр. 2) також має високий ступінь точності. Незважаючи на те, що представлена експериментальна методика має деяку невідповідність фізичних властивостей системи, що моделюються (нерівномірність швидкості падіння краплі по висоті, розподіл крапель по розмірах), отримані результати задовільно погоджуються з розрахунковими (рис. 5.3) та експериментальними даними інших дослідників [291, 365, 366]. При цьому можливості представленої в роботі експериментальної установки дозволяють моделювати більшість фізико-хімічних властивостей як системи, так і речовин, які в ній беруть участь.

Виходячи із проведеного аналізу, можна зазначити, що використання розглянутої в роботі модифікованої поетапної моделі абсорбції для прогнозування процесів вимивання хімічно небезпечних газів атмосферними опадами є найбільш доцільним. Також необхідно відзначити, що оскільки швидкість абсорбції від концентрації крапель та їхнього розміру має однакову ступеневу залежність, але різну інтенсивність опадів ($J \sim C_{\text{drop}}$, $J \sim R^3$), то при однаковій інтенсивності опадів ефективніше абсорбують дрібнодисперсні опади, з великою концентрацією крапель та питомою міжфазною поверхнею.

Експериментальним шляхом підтверджено адекватність модифікованої моделі сорбції газу краплями дощу, яка потребує меншої кількості вхідних параметрів та, за рахунок спрощення, збільшує оперативність прогнозування.

Результати експерименту по осадженню дрібнодисперсного пилу представлені на рис. 5.4.

Перевірка адекватності моделі проводилась за критерієм Фішера [463]:

$$F = 3,1432 < F_{(0.05; f_{\text{ад}}; f_y)} = 5,121.$$

Відповідно перевірка адекватності модифікованої моделі дала позитивний результат.

Похибка вимірювань пояснюється широким діапазоном дисперсності пилу, що підлягає осадженню, низьким рівнем хімічної чистоти дисперсної речовини та похибкою перерахунку концентрації дисперсних часток з даних пропускної здатності аерозолю.

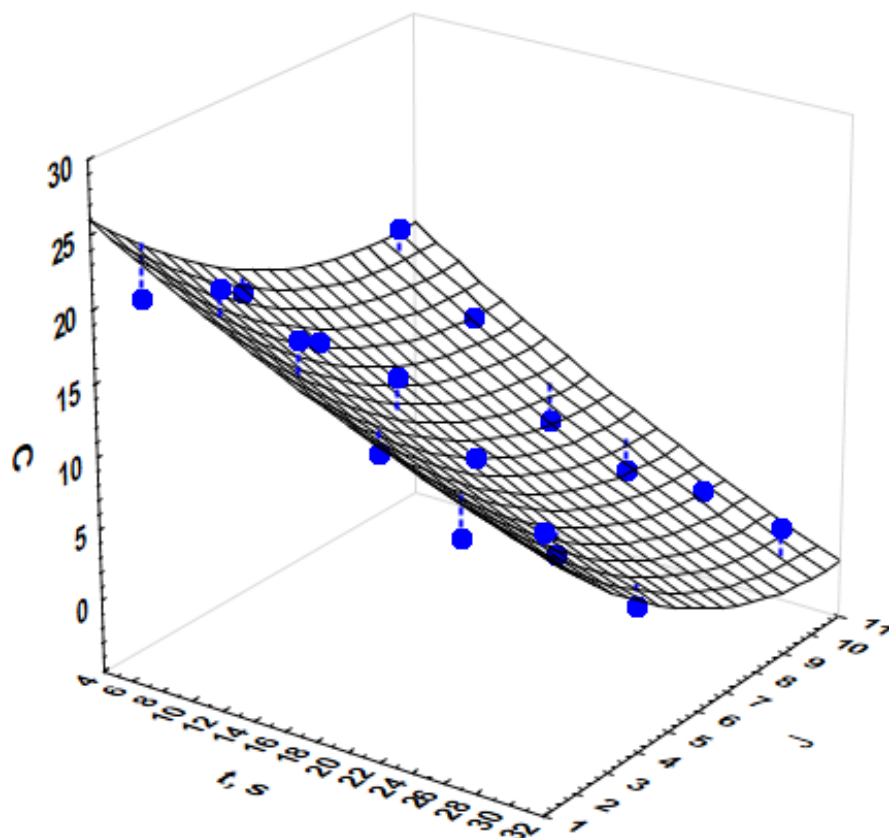


Рис. 5.4. Залежність швидкості зміни концентрації дрібнодисперсних часток оксиду кремнію (C , 10^{-7} м^{-3}) при осадженні водним аерозолем з інтенсивністю (J , $10^{-1} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$): поверхня – розрахункові дані; крапки – експериментальні дані

З огляду на складну фізико-хімічну структуру золи при реальних масштабних пожежах, розглянуті наближені методи оцінки не дозволяють досить надійно прогнозувати динаміку процесу опадоутворення при потраплянні золи у верхні шари тропосфери. Для одержання більш

достовірних результатів необхідне проведення експериментальних досліджень.

Процес вимивання аерозольних часток опадами проходить по механізму гравітаційної коагуляції, розглянутої раніше.

Розподіл абсорбованих аерозольних часток по об'єму краплі також істотно залежить від їхніх поверхневих властивостей. Очевидно, що гідрофобні частки сажі з малою кількістю функціональних груп, отримані при горінні рослинних матеріалів, будуть накопичуватись на поверхні краплі. Тоді як менш гідрофобні сажі, отримані при горінні нафтопродуктів, можуть проникати вглиб краплі, а гідрофільні частки золи, за рахунок доброї змочуваності, рівномірно розподіляються по всьому об'єму краплі.

Як відзначалося вище, якісний та кількісний склад продуктів горіння залежить від виду горючої речовини та від умов горіння (концентрації окислювача). Великі природні та техногенні пожежі відбуваються на відкритій місцевості при атмосферних умовах, відповідно у вузькому діапазоні зовнішніх умов горіння (температура, тиск). Виходячи із цього, основним відмінним фактором є вид горючого матеріалу. До природних пожеж відносяться підземні (торф'яні), надземні (лісові верхівкові) та наземні (степові, лісові низові) [57]. Великі техногенні пожежі характеризуються горінням нафтопродуктів. В якості горючих матеріалів для експериментальних досліджень обрані:

ГМ1 – масив деревини сосна звичайна (*Pinus sylvestris*);

ГМ2 – різнотрав'я степове;

ГМ3 – торф із підприємства «Київторф»;

ГМ4 – нафта сира з Азово-Березанської нафтогазоносною області;

ГМ5 – бензин АИ-95;

ГМ6 – дизельне паливо.

Швидкість очищення атмосфери від продуктів горіння природно залежить від інтенсивності опадів, однак однакова інтенсивність може забезпечуватися опадами різної дисперсності.

З метою вирішення цієї задачі проведено експеримент типу 2^2 [463]. Для побудови полінома другого порядку користувалися методом Бокса-Вільсона [463], 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. 5.1.

Таблиця 5.1

Кодування даних

Рівень та інтервал зміни факторів	Інтенсивність опадів, 10^{-3} м·година $^{-1}$	Дисперсність водного аерозолі, 10^{-3} м
Нульовий рівень, $x_i=0$	50	2,5
Інтервал зміни, δ_i	50	2,5
Верхній рівень, $x_i=1$	100	5
Нижній рівень, $x_i=-1$	0,1	0,1
Кодове позначення	X_1	X_2

Нижній рівень значень дисперсності водного аерозолі обумовлений мінімальним розміром крапель мряки. Менші краплі зазвичай із хмар не випадають, оскільки підтримуються конвективними потоками та у нижній тропосфері наявні тільки у вигляді туманів.

Опади дисперсністю більше 5 мм також практично відсутні внаслідок опору повітря, що дробить великі краплі на більш дрібні. Нижній рівень інтенсивності опадів відповідає мінімальній інтенсивності – мряки. Опади з інтенсивністю $100 \text{ мм} \cdot \text{година}^{-1}$ вкрай рідке явище, в основному інтенсивність рясних злив над територією України не перевищує $60 \text{ мм} \cdot \text{година}^{-1}$. Однак така висока інтенсивність забезпечується при осадженні продуктів горіння розпилюючими технічними пристроями, тому дослідження в цій області значень інтенсивності випадання опадів становить значний інтерес.

Матриця двофакторного експерименту по визначенню залежності швидкості осадження аерозольних продуктів горіння від інтенсивності (I) та дисперсності (r) опадів наведена в таблиці 5.2 [464].

Осадження продуктів горіння починалося при досягненні концентрації аерозолі $\sim 10^9 \text{ м}^{-3}$. Необхідно відзначити, що гранична концентрація диму, зазначена вище, при горінні бензину досягається лише через 3 – 5 хвилин, тоді як при горінні сирої нафти така концентрація утвориться за 30–40 секунд, а при горінні торфу – за 50–60 секунд. Вимірюваним критерієм швидкості осадження є час (τ) зниження концентрації на 80 % від первинної.

Таблиця 5.2

Ядро центрального композиційного планування другого порядку для двох факторів

Експеримент	$X_1(I)$	$X_2(r)$	$\tau, \text{ з}$					
			ГМ1	ГМ2	ГМ3	ГМ4	ГМ5	ГМ6
Планування типу 2^2	-1	-1	38	36	48	52	42	38
	+1	-1	10	10	13	12	11	11
	-1	+1	75	58	72	63	97	87
	+1	+1	31	26	15	18	37	33
Нульова точка	0	0	46	34	31	42	48	46

Розрахунок коефіцієнтів регресії за результатами експериментів проведено за наступними формулами:

$$b_0 = \delta'_0 \sum_{u=1}^n y_u - \delta''_0 \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^k x_{iu}^2 y_u ; \quad (5.3)$$

$$b_i = \delta_i \sum_{u=1}^n x_{iu} y_u ; \quad (5.4)$$

$$b_{ij} = \delta_{ij} \sum_{u=1}^n x_{iu} x_{ju} y_u ; \quad (5.5)$$

$$b_{ii} = \delta'_{ii} \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 y_u + \delta''_{ii} \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 y_u - \delta'''_{ii} \sum_{u=1}^n y_u , \quad (5.6)$$

де i – номер стовпця в матриці планування; x_{iu} – елементи i -го стовпця; y_u –

результат експерименту при відповідних параметрах.

Значення δ , які входять у формули (5.3)–(5.6), брали з [463].

Для отриманих з розрахунку моделей за критерієм Стюдента перевірено значущість коефіцієнтів. Довірчий інтервал визначено по формулою:

$$|b_i| \geq \Delta b_i = t_{(0.05; f_y)} \sqrt{\frac{s_y^2}{n}}, \quad (5.7)$$

де $t_{(0.05; f_y)}$ – 5% – ва точка розподілу Стюдента з f_y – ступенями свободи, $t=2,7764$; s_y^2 – дисперсія відтворюваності (помилка досліду).

Після виключення незначущих коефіцієнтів регресії результати моделювання представлено у вигляді (5.8)–(5.13) [464, 465]:

$$\tau_{ГМ1} = 0.562 \cdot X_2^2 - 0.126 \cdot X_1 + 8.324 \cdot X_2 - 0.046 \cdot X_1 \cdot X_2 + 29.383; \quad (5.8)$$

$$\tau_{ГМ2} = 0.870 \cdot X_2^2 - 0.040 \cdot X_1 + 2.323 \cdot X_2 - 0.025 \cdot X_1 \cdot X_2 + 31.382; \quad (5.9)$$

$$\tau_{ГМ3} = 1.104 \cdot X_2^2 - 0.512 \cdot X_1 + 1.813 \cdot X_2 - 0.076 \cdot X_1 \cdot X_2 + 43.639; \quad (5.10)$$

$$\tau_{ГМ4} = 0.833 \cdot X_2^2 - 0.224 \cdot X_1 + 8.650 \cdot X_2 - 0.063 \cdot X_1 \cdot X_2 + 39.110; \quad (5.11)$$

$$\tau_{ГМ5} = 1.412 \cdot X_2^2 - 0.357 \cdot X_1 + 2.983 \cdot X_2 - 0.069 \cdot X_1 \cdot X_2 + 40.793; \quad (5.12)$$

$$\tau_{ГМ6} = 0.560 \cdot X_2^2 - 0.315 \cdot X_1 + 1.170 \cdot X_2 - 0.025 \cdot X_1 \cdot X_2 + 54.241. \quad (5.13)$$

Адекватність та відтворюваність моделей перевірена за допомогою критеріїв Фішера та Кохрена. Відповідно до (5.8)–(5.13) отримані рівняння регресії в натуральних змінних. Для аналізу отриманих результатів залежності (5.8)–(5.13) представлені в графічному вигляді, при цьому горючі

матеріали розподілені на дві групи – целюлозовмісні (рис. 5.5) та нафтопродукти (рис. 5.6) [464].

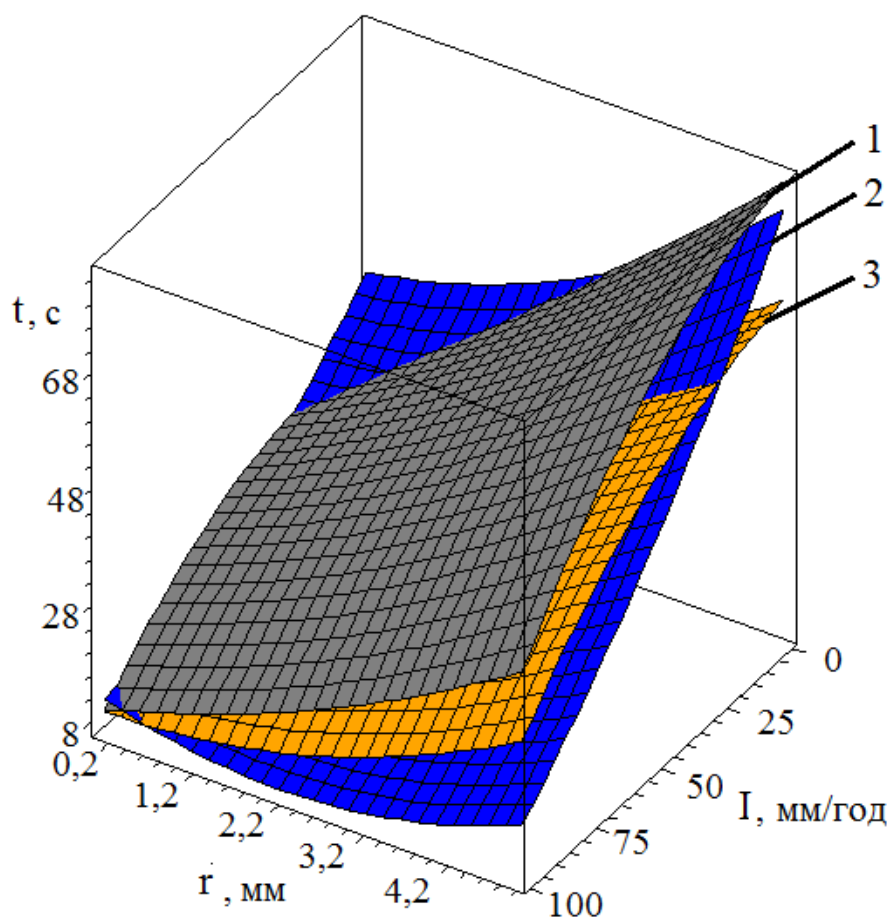


Рис. 5.5. Вплив швидкості осадження продуктів горіння целюлозовмісних матеріалів від інтенсивності та дисперсності опадів: 1 - ГМ1; 2 – ГМ3; 3 – ГМ2

Аналіз рис. 5.5 та 5.6 показує, що залежність швидкості осадження аерозольних продуктів горіння практично для всіх розглянутих матеріалів є прямо пропорційною інтенсивності потоку. При осадженні твердих продуктів горіння рослинних матеріалів найбільша інтенсивність спостерігається для димів торфу, що пов'язано з більш крупнодисперсними частками димів. Однак, як відзначалося вище, й інтенсивність виділення аерозолі при горінні торфу значно вище, ніж для деревини та трави.

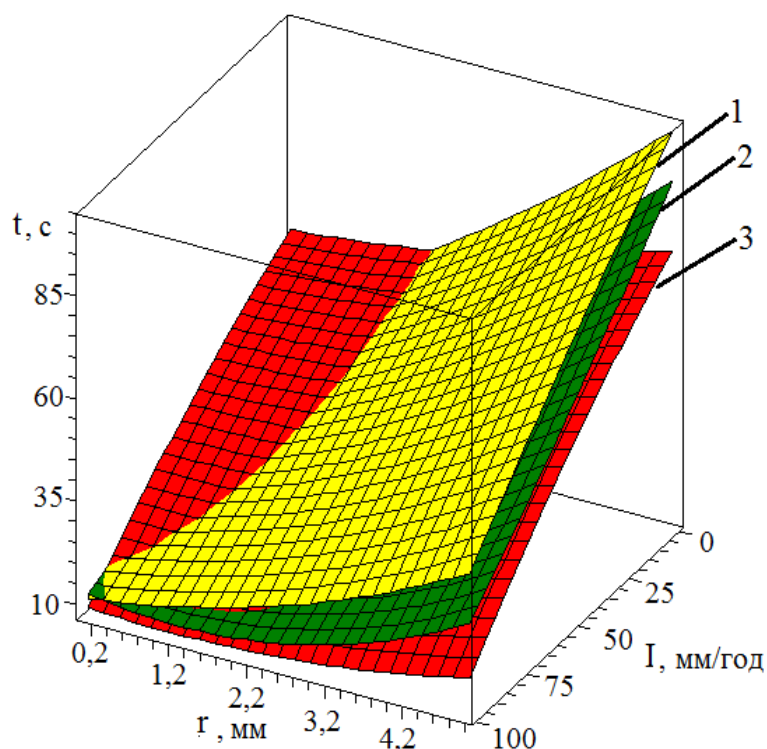


Рис. 5.6. Вплив швидкості осадження продуктів горіння нафтопродуктів від інтенсивності та дисперсності опадів: 1 – ГМ5; 2 - ГМ6; 3 – ГМ4

Результати осадження димів від нафтопродуктів (рис. 5.6) показали високу залежність інтенсивності осадження від дисперсності потоку для продуктів горіння бензину та дизельного палива, тоді як для осадження диму сирової нафти вплив розміру краплі істотно нижче, що можна пояснити різним відносним розміром аерозольних продуктів горіння. При горінні світлих нафтопродуктів виділяється дрібнодисперсна сажа та зола, при вимиванні якої визначальну роль відіграє величина вільної поверхні краплі. При падінні великої краплі її обтікає потік повітря, що захоплює за собою дрібні аерозольні частки, за рахунок чого ймовірність зіткнення частки сажі із краплею знижується. При горінні сирової нафти розмір сажевих часток та їхня маса на порядок більше, відповідно діючі інерційні сили, що прагнуть зберегти прямолінійну траєкторію, дозволяють досить ефективно захоплювати їх краплями. Більш висока ефективність вимивання диму сирової нафти крупнодисперсним потоком пояснюється здатністю великої краплі

сорбувати на себе більшу кількість часток аерозолі. Узагальнюючий аналіз швидкості осадження димів рослинних матеріалів та нафтопродуктів свідчить про високу інтенсивність вимивання аерозольних продуктів горіння рослинних матеріалів. Ймовірніше це пов'язано з більшою гідрофобністю сажі нафтопродуктів.

При аналізі отриманих результатів враховано, що використання оптичного детектора диму дозволяє реєструвати частки розміром більше 0,6 мкм. Тому отримані результати не повною мірою відображають процес осадження аерозольних продуктів горіння. Однак внаслідок подібних фізико-хімічних властивостей часток диму різного розміру, отриманих при горінні того самого матеріалу, можна стверджувати, що характер залежності інтенсивності вимивання буде також подібним, хоча за рахунок більш дрібних розмірів часток диму швидкість їхнього осадження повинна бути нижче отриманих даних. Тим часом врахування швидкості осадження часток з розміром $< 0,6$ мкм є істотним при горінні легких фракцій нафтопродуктів (наприклад, бензин), де більша частина утворених сажевих часток має розмір $\sim 0,1$ мкм [384]. Однак при розгляді динаміки осадження диму від природних пожеж та горіння нафти врахування дрібних фракцій продуктів горіння є фактично малозначущим. Отримані дані характеризуються високою збіжністю результатів в однакових серіях експериментів. Відносна похибка в експериментах не перевищувала 10 %, що пов'язано з неоднорідністю дисперсності потоку розпиленої води, а також із похибкою вимірювальних приладів.

Таким чином, результати виконаних експериментів укладаються в довірчий інтервал, розрахований за критерієм Фішера з надійністю 0,95, що засвідчує достовірність розроблених математичної моделі осадження штучно ініційованими атмосферними опадами небезпечних речовин та організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин.

5.3. Лабораторна установка та методика проведення досліджень процесів горіння при різних метеорологічних умовах

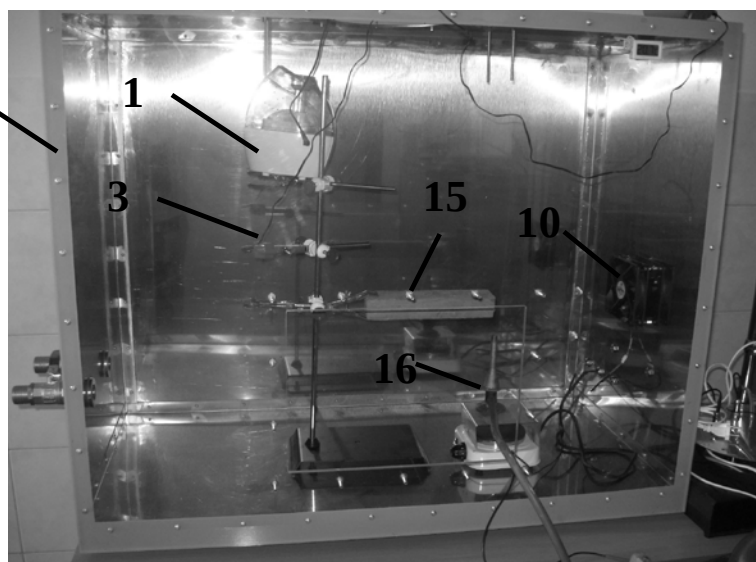
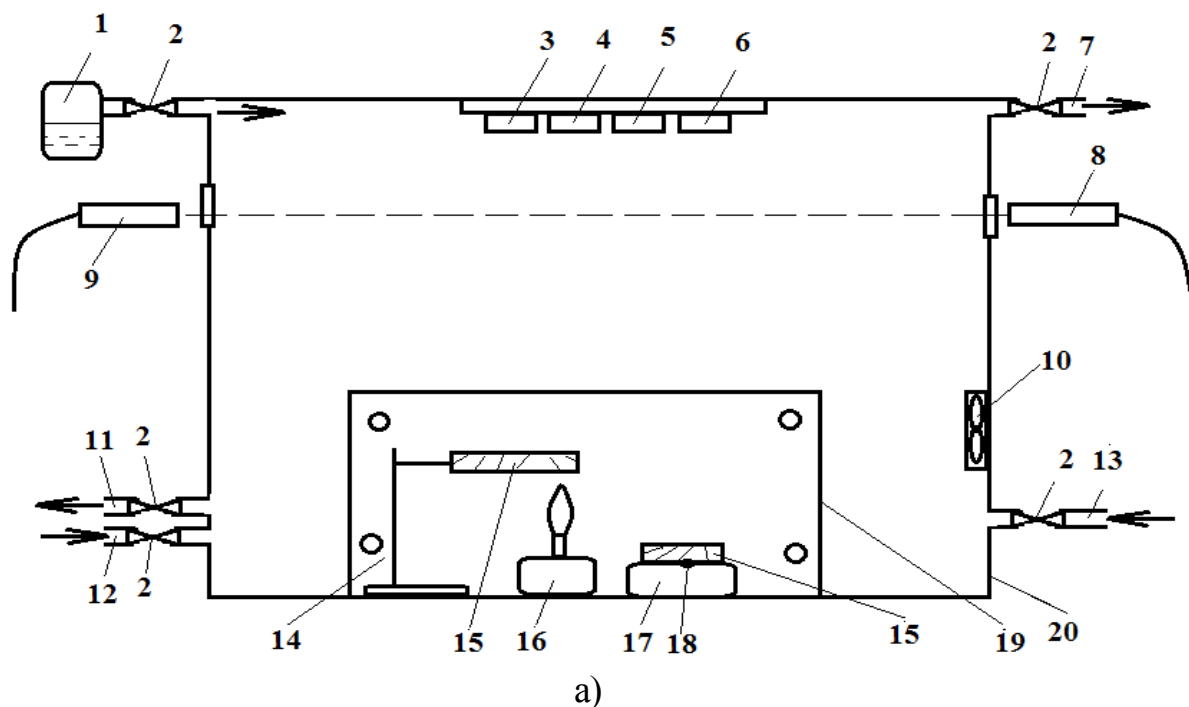
Для забезпечення необхідних умов дослідження процесів горіння різних горючих матеріалів автором розроблено лабораторний стенд (рис. 5.7) [449, 466].

В основу винаходу покладена задача створення стенда для дослідження процесів горіння, який дозволить досліджувати процеси виникнення, розвитку та припинення горіння різних горючих матеріалів, який не має вищенаведених недоліків, тобто дозволить за рахунок додавання або відведення кисню, продуктів горіння, газових вогнегасних речовин, водяного аерозолі та примусового утворення потоку повітря моделювати газове середовище з різними хімічними та фізичними характеристиками, в якому можна досліджувати процеси виникнення, розвитку та припинення горіння, а також перевіряти та порівнювати робочі характеристики лабораторних, технологічних та пожежних систем детектування в цих умовах.

Поставлена задача вирішується за рахунок того, що стенд для дослідження процесів горіння, який включає герметичну камеру, модельний осередок горіння, трубопроводи з арматурою для подавання компонентів газового середовища та вогнегасних речовин, взаємозамінну апаратуру контролю хімічного складу та параметрів газового середовища, яка розміщується безпосередньо в робочому об'ємі герметичної камери стенду, що дає можливість використовувати різноманітні лабораторні, технологічні та пожежні системи детектування, додатково має ультразвуковий диспергатор рідини, електропіч для нагрівання та підтримання температури досліджуваного горючого зразка, пристрій для дослідження швидкості поширення полум'я по горючому зразку.

Як джерело запалювання використали газовий пальник із довжиною полум'я ≈ 40 мм, розміщений на відстані 3 мм від зразка, протягом 3 хв. Швидкість поширення полум'я визначалася за середнім часом (по 3 зразкам)

проходження фронту полум'я по поверхні ділянки стандартної довжини. Горизонтальний потік повітря у бік зразка подавався повітряним електроventильатором. Регулювання швидкості потоку повітря (вітру) здійснювали шляхом зміни швидкості обертання електроventильатора.



б)

Рис. 5.7. Схема (а) та зовнішній вигляд лабораторної камери (б): 1 – ультразвуковий диспергатор, 2 – запірна арматура, 3 – детектор температури, 4 – детектор диму, 5 – детектор монооксиду карбону, 6 – детектор кисню, 7 – трубопровід відведення продуктів горіння, 8 – лазер, 9 – фотоприймач, 10 – електроventильатор, 11 – трубопровід відводу газового середовища,

12 - трубопровід нагнітання повітря, 13 – трубопровід введення кисню, 14 - штатив, 15 – зразок горючого матеріалу, 16 – газова горілка, 17 - електронагрівач, 18 – термopapa, 19 – технологічний люк, 20 - герметичний корпус

Вологість повітряного середовища змінювали за допомогою ультразвукового диспергатора рідини (рис. 5.8) та контролювали лабораторним електронним гігpометpом з межею точності 0,1 % (рис. 5.9).

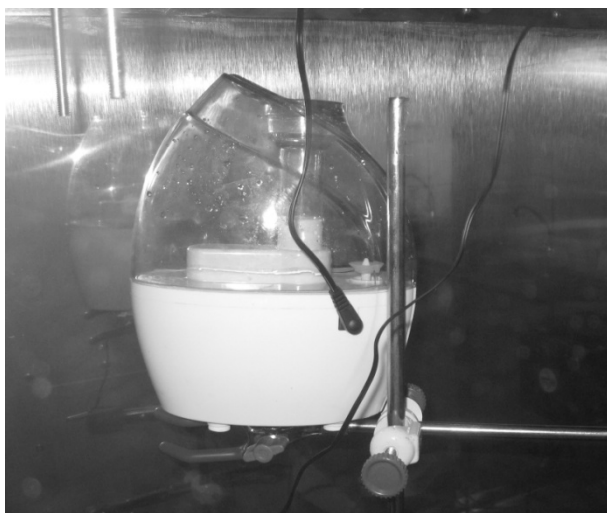


Рис. 5.8. Ультразвуковий диспергатор рідини HU 0802



Рис. 5.9. Лабораторний електронний гігpометp Celestron

Таблиця 5.3

Дисперсність води при лабораторних експериментах та у реальних атмосферних утвореннях

	$r \cdot 10^{-6}, \text{ м}$
Ультразвуковий диспергатор	~ 10
Туман	5 – 15
Шарувато–дощові хмари (Nimbostratus, Ns)	10 – 25
Купчасто–дощові хмари (Cumulonimbus, Cb)	25 – 40

Ультразвуковий диспергатор НУ 0802 (рис. 5.8) дозволяє забезпечити дисперсність води, порівнянну з дисперсністю рідини в атмосферних утвореннях (табл. 5.3).

Використання запропонованого стенда для дослідження процесів горіння дозволяє вирішувати задачі моделювання умов виникнення, поширення та припинення горіння із заданими хімічними та фізичними характеристиками газового середовища в лабораторних умовах, досліджувати вплив на процеси горіння різних горючих матеріалів вологості, вітру, концентрації кисню та газових вогнегасних речовин, а також перевіряти та порівнювати робочі характеристики лабораторних, технологічних та пожежних систем детектування різного конструкційного виконання в цих умовах.

Дослідження швидкості випаровування крапель води проводили шляхом їх пропускання крізь перегріте повітряне середовище по схемі рис. 5.10.

Методика експерименту полягала у наступному. З використанням ультрафіолетового нагрівача або відкритого полум'я у зоні прольоту краплі встановлювалась відповідна температура, яка контролювалась термopарою. Після цього з форсунки подавався потік дрібнодисперсної води, краплі якої, пролітаючи крізь перегріте середовище, частково випаровувались та осідали на холодну поверхню на електронних вагах.

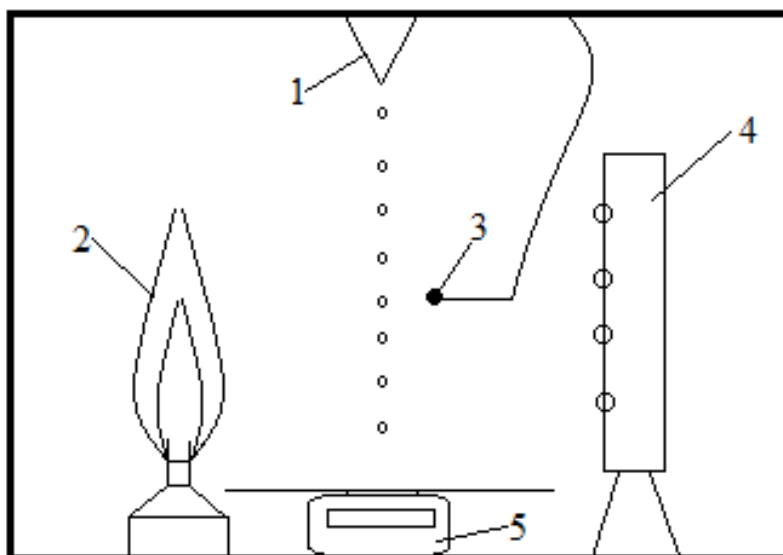


Рис. 5.10. Схема проведення досліджень по встановленню швидкості випаровування крапель опадів в осередку горіння: 1 – форсунка; 2 – відкрите полум'я; 3 – термопара; 4 – ультрафіолетовий електронагрівач; 5 – електронні ваги

Дослідження швидкості поширення полум'я проводили відповідно до методики [468].

Вологість зразків (W_o) визначалася згідно [469] шляхом вимірювання маси зразка (m_1) відносно маси зразка після повного висушування (m_2):

$$W_o = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100\%. \quad (5.14)$$

Зразки деревини довжиною 320 мм, шириною 140 мм, та фактичною товщиною 10 мм закріплювалися на металевому тримачі у вертикальному та горизонтальному положеннях (рис. 5.11, а) [469]. Зразки гілок сосни мали порівнянні з деревиною розміри й так само закріплювалися у вертикальному та горизонтальному положенні за допомогою тримача. Степову траву та торф досліджували тільки на швидкість горизонтального поширення полум'я. Трав'яний масив і торф із розмірами зразка деревини розміщали на

металевій підкладці товщиною 1,5 мм, закріплений на тримачі (рис. 5.11, б) [469-471].

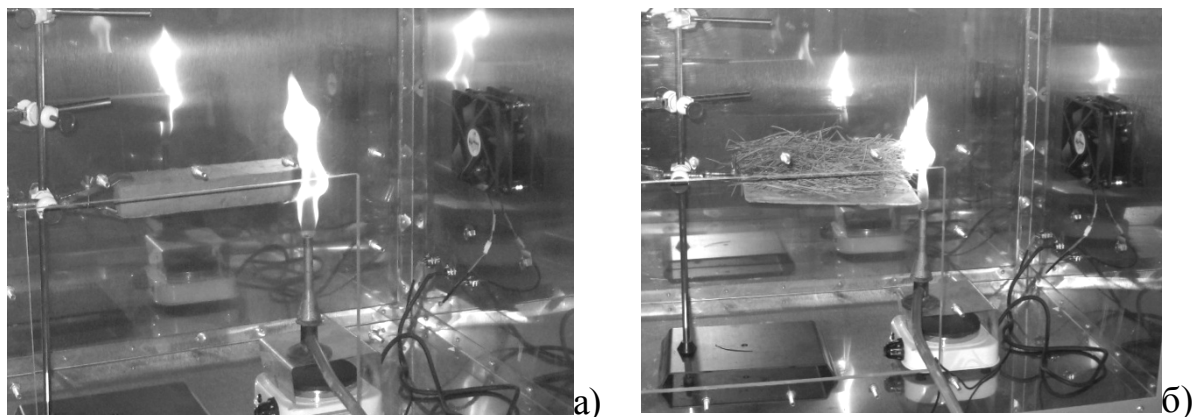


Рис. 5.11. Зразки в камері: а) деревина; б) степова трава

Стенд для дослідження процесів горіння складається з герметичного корпусу, в верхній частині якого знаходиться трубопровід для виведення продуктів горіння із запірною арматурою. Камера стенду обладнана герметичним технологічним люком, який забезпечує доступ усередину камери. Для швидкої зміни хімічного складу газового середовища та зміни тиску в об'ємі камери в її нижній частині розташовані трубопроводи для відведення газового середовища та трубопровід нагнітання повітря, які обладнані запірною арматурою. Також крізь трубопровід в камеру подаються газові вогнегасні речовини для дослідження процесів припинення горіння. Зміна концентрації кисню в робочому об'ємі стенду здійснюється шляхом введення кисню через трубопровід. Зміна вологості в камері відбувається за рахунок нагнітання в робочий об'єм водяного аерозолі з дисперсністю ~ 10 мкм, що утворює ультразвуковий диспергатор. Прозорість газового середовища контролюється шляхом виміру відносного ступеня поглинання променя, який проходить крізь об'єм камери від лазера до фотоприймача. Контроль параметрів газового середовища відбувається за допомогою детекторів температури, диму, монооксиду карбону та кисню, які розміщено в верхній частині камери. Всі детектори під'єднані за допомогою

роз'єднувальних роз'ємів, що дозволяє змінювати та встановлювати детектори різного призначення, принципу детектування та конструкційного виконання для перевірки та порівняння їх характеристик. Поведінка горючих матеріалів при високих температурах досліджується шляхом розміщення зразка на електронагрівачі, температурний режим нагріву контролюється термопарою. Для дослідження швидкості поширення горіння на штативі закріплюється зразок, один край якого розміщується над газовою горілкою. Для дослідження впливу вітру на швидкість поширення горіння примусовий потік повітрі здійснюється електровентилятором, який за рахунок зміни швидкості та напрямку обертання може змінювати швидкість та напрямок вітру.

Таким чином, розроблена лабораторна установка для дослідження процесів горіння при різних метеорологічних умовах та методика експерименту, яка дозволяє перевірити достовірність розроблених математичної моделі процесу локалізації та ліквідації штучно ініційованими опадами осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням та організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізації осередків інтенсивного горіння.

5.4. Результати лабораторної експериментальної перевірки достовірності організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізації осередків інтенсивного горіння

Лабораторні експериментальні дослідження проводились в два етапи: по-перше, проведено перевірку розроблених моделей поведінки крапель опадів в осередку горіння. На другому етапі виконано комплекс експериментальних досліджень стосовно впливу основних метеорологічних

параметрів (швидкість вітру, вологість повітря та ін.) і вологості горючого матеріалу.

Для перевірки достовірності моделі порівнювались розрахункові та виміряні дані по відношенню маси води, що випарувалась в осередку горіння, до поданої маси води (m_s/m_0). Результати експериментів представлено на рис. 5.12.

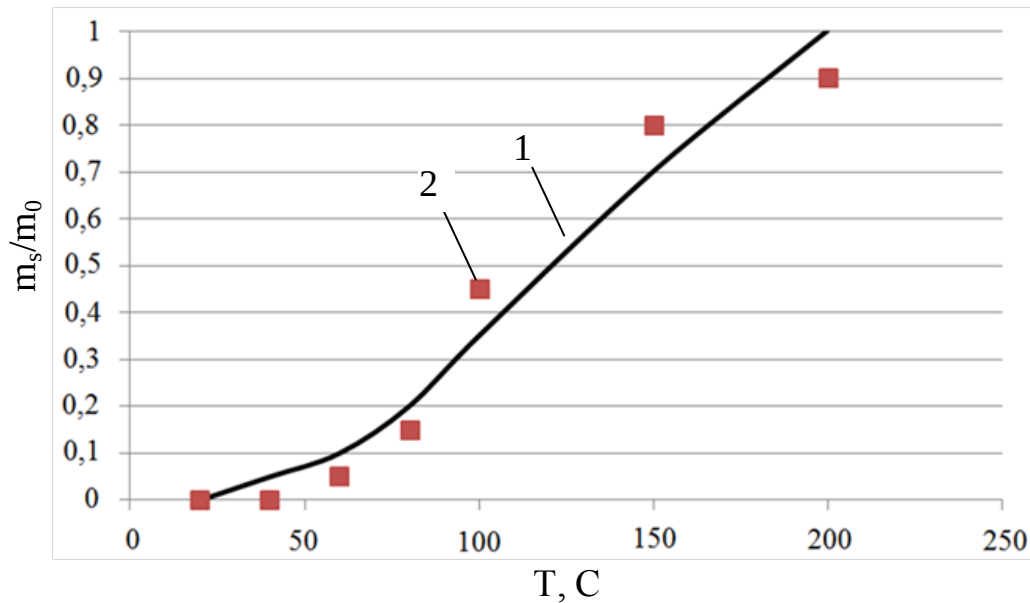


Рис. 5.12. Залежність інтенсивності випаровування крапель дощу при різних температурах середовища: 1 – розрахункові дані; 2 – експериментальні дані.

Перевірка адекватності моделі проводилась за критерієм Фішера [463]:

$$F = 2,7862 < F_{(0,05; f_{ад}; f_y)} = 3,429.$$

Відповідно перевірка адекватності модифікованої моделі дала позитивний результат.

Для дослідження впливу основних метеорологічних параметрів в якості горючого матеріалу обрані: деревина (сосна), гілки сосни, трава й торф. Всі матеріали досліджували на швидкість поширення пожежі по горизонталі. У випадку лісових пожеж необхідно додатково провести

дослідження вертикальної швидкості поширення пожежі на зразках деревини та гілок сосни.

Для реалізації даного дослідження поставлено експеримент типу 2^3 [463]. Для побудови полінома другого порядку користувалися методом Бокса-Вільсона [463], відповідно до якого використовували ортогональні плани першого порядку як ядро, на якому потім добудовували конструкцію плану другого порядку. Переведення натуральних змінних у кодовані представлено у табл. 5.4.

Верхній рівень значень вологості зразків обумовлений максимальною вологістю, при якій можливий процес горіння даного матеріалу. Верхнім рівнем вологості повітряного середовища є максимальна природна вологість атмосферного повітря. Нижній рівень вологості повітряного середовища визначається мінімальним значенням вологості на території України за останні 10 років (21 %) [472]. Із цього джерела так само встановлено, що вітер зі швидкістю > 16 м/с становить менше 1 % від загальнорічного розподілу швидкості вітру, отже це значення обрано як верхній рівень.

Таблиця 5.4

Кодування даних

Рівень та інтервал зміни факторів	Вологість зразка, %				Вологість повітряного середовища, %	Швидкість вітру, м/с
	дер.	гіл.	трава	торф		
Нульовий рівень, $x_i=0$	41	42	44	47	59	8
Інтервал зміни, δ_i	41	42	44	47	39	8
Верхній рівень, $x_i=1$	82	84	88	94	98	16
Нижній рівень, $x_i=-1$	0	0	0	0	20	0
Кодове позначення	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_2	X_3

Матриця двофакторного експерименту по визначенню залежності швидкості поширення полум'я за зразком від швидкості вітру, вологості повітряного середовища та вологості зразка наведена в таблиці 5.5.

Для отриманих з розрахунку моделей за критерієм Стьюдента перевірено значущість коефіцієнтів. Довірчий інтервал визначено за формулою (5.7).

Таблиця 5.5

Ядро центрального композиційного планування другого порядку для трьох факторів

Експеримент	$X_1(W_o)$	$X_2(W_{пс})$	$X_3(V_0)$	$V \cdot 10^2, \text{ м/с}$					
				дерево (гориз.)	дерево (верт.)	гілки (гориз.)	гілки (верт.)	трава	торф
Планування типу 2^3	-1	-1	-1	3,2	3,7	3,6	4,2	4,6	5,3
	+1	-1	-1	1,3	1,5	1,3	1,7	2,8	3,3
	-1	+1	-1	1,7	2,0	1,6	1,9	2,2	2,6
	+1	+1	-1	0,3	0,5	0,2	0,3	0	0
	-1	-1	+1	4,4	3,5	4,7	4,0	5,1	5,8
	+1	-1	+1	0,9	0,6	1,3	0,8	1,2	1,3
	-1	+1	+1	1,2	0,8	1,5	1,1	1,4	1,6
	+1	+1	+1	0	0	0	0	0	0
Нульова точка	0	0	0	2,4	2,1	3,0	2,7	5,2	7,3

Після виключення малозначущих коефіцієнтів регресії результати моделювання представлено у вигляді (5.15)–(5.20):

$$V_{\text{дер.гор.}} = -0.0105 \cdot X_{11}^2 + 0.0131 \cdot X_3^2 - 0.0121 \cdot X_{11} \cdot X_2 - 0.121 \cdot X_{11} \cdot X_3 + \\ + 1.621 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.0579 \cdot X_{11} - 0.874 \cdot X_2 + 0.679 \cdot X_3 + 5.15; \quad (5.15)$$

$$V_{\text{дер.верт.}} = -0.0173 \cdot X_{11}^2 + 0.0124 \cdot X_3^2 - 0.21 \cdot X_{11} \cdot X_2 - 0.086 \cdot X_{11} \cdot X_3 + \\ + 2.683 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.257 \cdot X_{11} - 0.344 \cdot X_2 - 0.679 \cdot X_3 + 5.23; \quad (5.16)$$

$$V_{\text{гілки гор.}} = -0.0925 \cdot X_{12}^2 + 0.312 \cdot X_3^2 - 0.472 \cdot X_{12} \cdot X_3 + 1.621 \cdot X_2 \cdot X_3 - \\ - 0.239 \cdot X_{12} - 0.741 \cdot X_2 + 1.028 \cdot X_3 + 6.02; \quad (5.17)$$

$$V_{\text{гілки верт.}} = 0.083 \cdot X_2^2 + 0.0651 \cdot X_3^2 + 1.396 \cdot X_{12} \cdot X_2 - 0.431 \cdot X_{12} \cdot X_3 + \\ + 1.007 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.126 \cdot X_{12} - 1.053 \cdot X_2 - 0.253 \cdot X_3 + 6.28; \quad (5.18)$$

$$V_{\text{трава}} = -0.165 \cdot X_{13}^2 - 2.034 \cdot X_{13} \cdot X_2 - 0.963 \cdot X_{13} \cdot X_3 + 2.821 \cdot X_2 \cdot X_3 + \\ - 0.079 \cdot X_{13} - 0.392 \cdot X_2 + 1.259 \cdot X_3 + 7.03; \quad (5.19)$$

$$V_{\text{торф}} = 0.32 \cdot X_2^2 + 1.277 \cdot X_3^2 - 0.441 \cdot X_{14} \cdot X_2 + 2.358 \cdot X_2 \cdot X_3 + \\ - 1.0276 \cdot X_{14} - 1.157 \cdot X_2 + 1.206 \cdot X_3 + 7.57. \quad (5.20)$$

Адекватність та відтворюваність моделей перевірено за допомогою критеріїв Фішера та Кохрена.

Отримавши поліноміальну модель, проведено статистичну оцінку. Відтворюваність процесу перевірено по критерію Кохрена за формулою:

$$G = \frac{s_{u\max}^2}{\sum_{u=1}^n s_u^2} \leq G_{(0.05; f_n; f_u)}, \quad (5.21)$$

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

досліджень на u -му рівні факторів;

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

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

$G_{(0.05; f_n; f_u)}$ – табличне значення критерію Кохрена за 5% – го рівня значущості;

$f_n = n$ – число незалежних оцінок дисперсії;

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

$$G = 0.652 < G_{(0.05; f_n; f_u)} = 0.953, \quad (5.22)$$

Адекватність моделей перевіряли по критерію Фішера:

$$F = 2,7862 < F_{(0.05; f_{ад}; f_y)} = 4,384. \quad (5.23)$$

Відповідно до (5.15)–(5.20) для всіх видів зразків отримані рівняння регресії в натуральних змінних та, наприклад, для торфу побудована залежність швидкості поширення полум'я від вологості зразків і швидкості вітру при постійній вологості повітряного середовища, що відповідає середній вологості в літній період ($W_{пс} = 55\%$). Результати представлені на рис. 5.13.

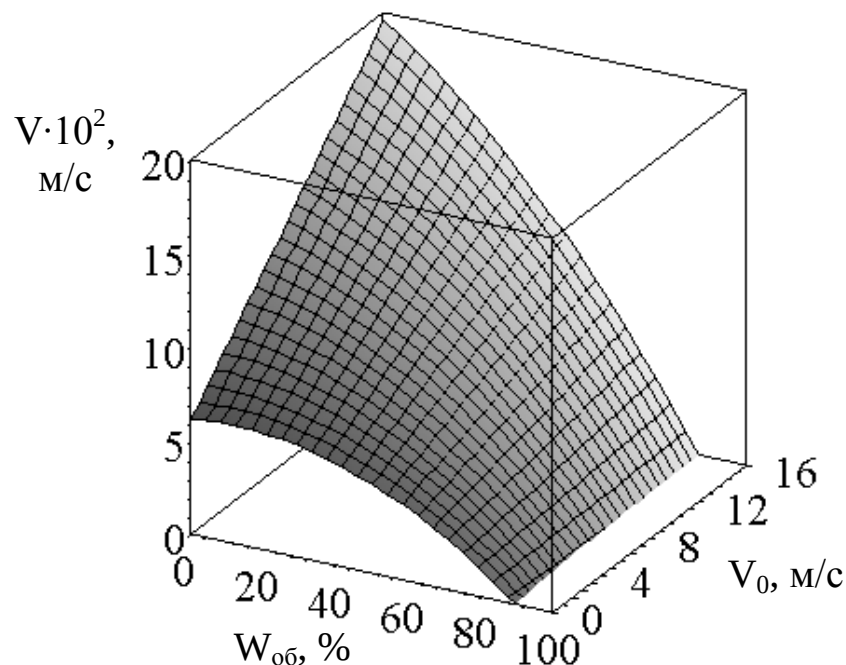


Рис. 5.13. Вплив вологості зразка торфу та швидкості вітру на швидкість поширення горіння при постійній вологості повітряного середовища

У другій серії залежностей (рис. 5.14) представлено вплив вологості повітряного середовища на швидкість поширення полум'я при постійній швидкості вітру ($V_0 = 5$ м/с) та вологості зразків відповідно до рекомендацій [468] ($W_{\text{древини}} = 35\%$; $W_{\text{гілок сосни}} = 45\%$; $W_{\text{трави}} = 30\%$; $W_{\text{торфу}} = 40\%$). Результати цих експериментів викладені в [451].

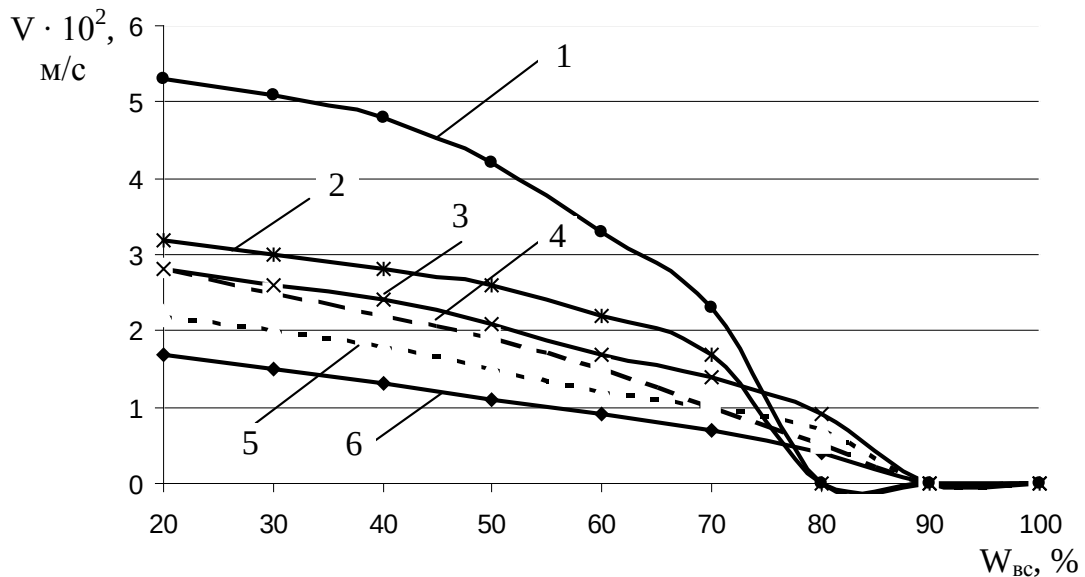


Рис. 5.14. Вплив вологості повітряного середовища на швидкість поширення полум'я при постійній вологості зразків та швидкості вітру: 1 – торф; 2 – степова трава; 3 – гілки сосни вертикальні; 4 – деревина вертикальна; 5 – гілки сосни горизонтальні; 6 – деревина горизонтальна

З аналізу моделей (5.15)–(5.20) та рис. 5.13–5.14 зроблено висновок, що швидкість вітру суттєво впливає лише при низькій вологості повітря та горючого матеріалу. З підвищенням вологості вплив вітру знижується, при певних значеннях вологості, близьких до критичних, висока швидкість вітру ($V_0 > 7$ м/с) навіть знижує швидкість поширення полум'я. Це, ймовірно, пояснюється ефектом зриву полум'я потоком повітря, що спостерігалось в експериментах. Отримані результати [451] добре корелюють з даними [473] та результатами, отриманими в роботі [456].

Дані рис. 5.14 свідчать про різке падіння швидкості поширення полум'я по поверхні трав'яного масиву та торфу за високої вологості повітряного середовища. Зазначений ефект спостерігається в матеріалах із високим ступенем пористості, що сприяє швидкому поглинанню зразком атмосферної вологи й, отже, різкому зниженню швидкості поширення полум'я.

Результати експерименту показують зворотну залежність швидкості горіння вертикальних зразків від швидкості вітру. Зниження швидкості поширення фронту полум'я по вертикальних зразках з підвищенням швидкості вітру в горизонтальному напрямку пояснюється відводом тепла вітром від зразка по напрямку потоку повітря. За результатами аналізу моделей (5.15)–(5.20) слід зазначити, що комплексне збільшення вологості горючого матеріалу та повітряного середовища знижує показник критичної вологості, при якому припиняється подальше поширення полум'я.

Таким чином, результати виконаних експериментів вкладаються в довірчий інтервал, розрахований за критерієм Фішера з надійністю 0,95, що засвідчує достовірність розроблених математичної моделі процесу локалізації та ліквідації штучно ініційованими опадами осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням та організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізації осередків інтенсивного горіння.

Висновки по розділу 5

1. Розроблена лабораторна установка для дослідження процесів осадження газоподібних та дисперсних речовин представляє собою камеру для дослідження процесів масообміну, та методика експериментів, яка дозволяє перевіряти достовірність розроблених моделей осадження штучно ініційованими атмосферними опадами небезпечних речовин та організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин.

2. Результати виконаних експериментів вкладаються в довірчий інтервал, розрахований за критерієм Фішера з надійністю 0,95, що засвідчує достовірність розроблених математичної моделі осадження штучно ініційованими атмосферними опадами небезпечних речовин та

організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин.

3. Розроблена лабораторна установка для дослідження процесів горіння при різних метеорологічних умовах та методика експерименту, яка дозволяє перевірити достовірність розроблених математичної моделі процесу локалізації та ліквідації штучно ініційованими опадами осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням та організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізації осередків інтенсивного горіння.

4. Результати виконаних експериментів вкладаються в довірчий інтервал, розрахований за критерієм Фішера з надійністю 0,95, що засвідчує достовірність розроблених математичної моделі процесу локалізації та ліквідації штучно ініційованими опадами осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням та організаційно-технічного методу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізації осередків інтенсивного горіння.

РОЗДІЛ 6.

ВАРІАНТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНИХ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНИХ МЕТОДІВ ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ПРИРОДНОГО ТА ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ

6.1. Система ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду в атмосферу небезпечних речовин

Для реалізації основних положень законодавства по забезпеченню цивільного захисту та відповідно до вимог Кодексу цивільного захисту України [315], тобто забезпечення готовності міністерств та інших центральних та місцевих органів виконавчої влади, органів місцевого самоврядування, підпорядкованих їм сил і засобів до дій, спрямованих на запобігання і реагування на надзвичайні ситуації; захист населення у разі виникнення надзвичайних ситуацій; проведення рятувальних та інших невідкладних робіт щодо ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, організація життєзабезпечення постраждалого населення; пом'якшення можливих наслідків надзвичайних ситуацій у разі їх виникнення; оповіщення населення про загрозу та виникнення надзвичайних ситуацій, своєчасне та достовірне інформування про фактичну обстановку і вжиті заходи в дисертаційній роботі розроблені основи створення системи ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду в атмосферу небезпечних речовин. Така система базується на тому, що підсистема підтримки управлінського рішення має комплекс математичних інструментів для прогнозування змін стану зони забруднення та реалізації процесу впливу на неї, а підсистема виконання рішень володіє новими, розробленими в дисертації, ефективними способами ліквідації забруднення та методиками їхнього використання.

Комплексна функціональна схема системи ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду в атмосферу небезпечних речовин, базується на загальних принципах побудови систем забезпечення цивільного захисту [261-267, 319-320, 475] та представлена на рис. 6.1 [476, 477].

Алгоритм функціонування запропонованої системи ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій на стаціонарних та/або пересувних потенційно небезпечних об'єктах (ПНО) для атмосфери у межах регіону представлено на рис. 6.2. Запропонована система припускає взаємозв'язок між центром моніторингу та формування антикризових рішень і всіх елементів системи [478-480].

Перший рівень системи моніторингу містить у собі три необхідні складові. На першому етапі проводиться моніторинг зони забруднення з виявленням розмірів зони забруднення, її географічних координат, висоти нижньої та верхньої границь забруднення, хімічного складу забруднюючих речовин, кількісного складу забруднюючих речовин, дисперсності забруднюючого аерозолю. На другому етапі, або паралельно з першим, проводиться моніторинг метеорологічних параметрів у зоні забруднення: атмосферний тиск, температура, вологість, швидкість та напрямок вітру.

Третьою складовою першого рівня системи моніторингу є реєстрація метеорологічних параметрів у зоні можливого опадоутворення [481].

Далі дані надходять на другий та третій рівні системи моніторингу, де відбувається їхня обробка, аналіз та систематизація.

Підготовлені результати моніторингу зони ураження атмосфери та метеорологічної обстановки надходять у систему підтримки ухвалення управлінського рішення, де на початковому етапі відбувається оцінка доцільності функціонування розробленої системи мінімізації зони ураження [482].

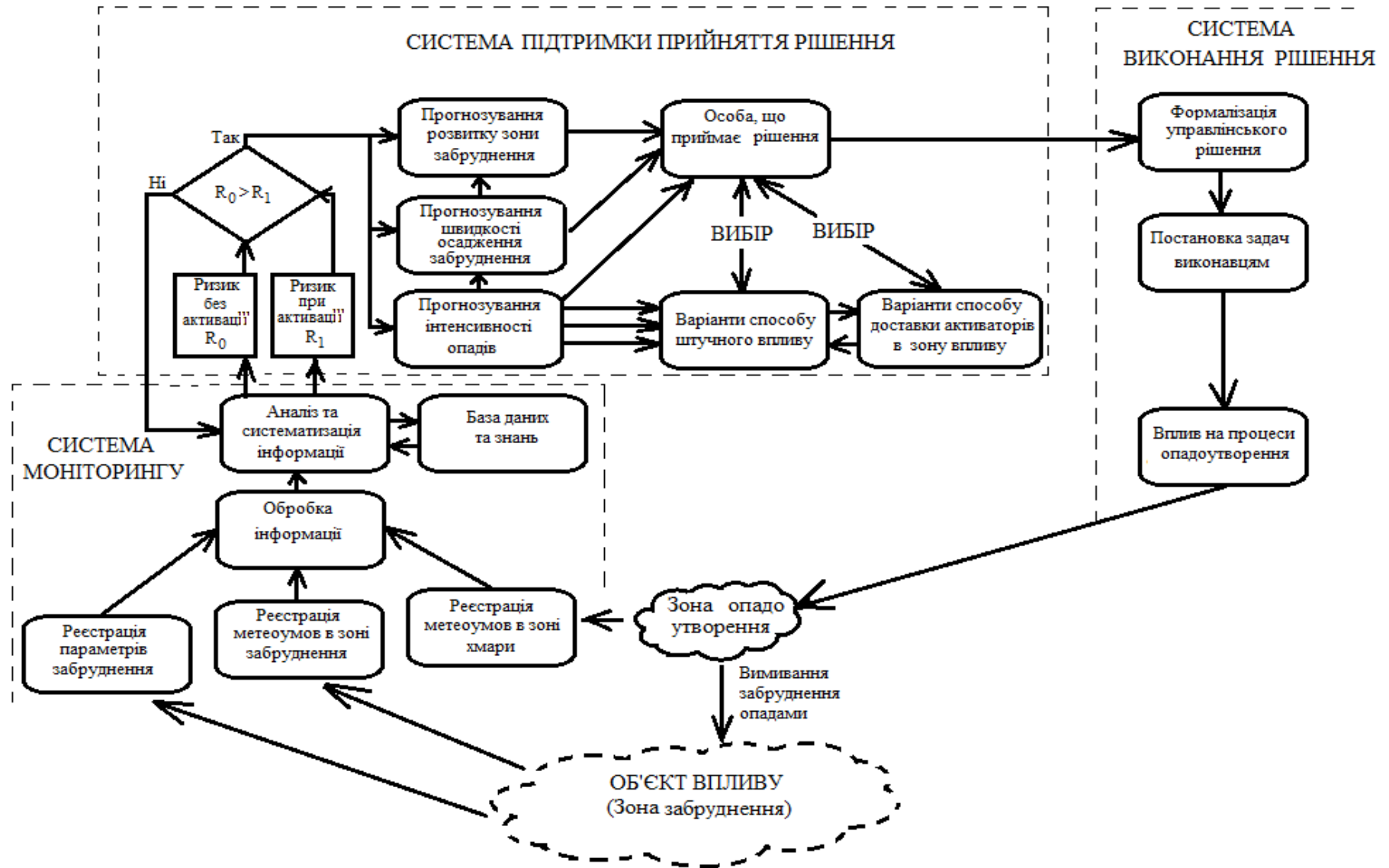


Рис. 6.1. Комплексна функціональна схема системи ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду в атмосферу небезпечних речовин

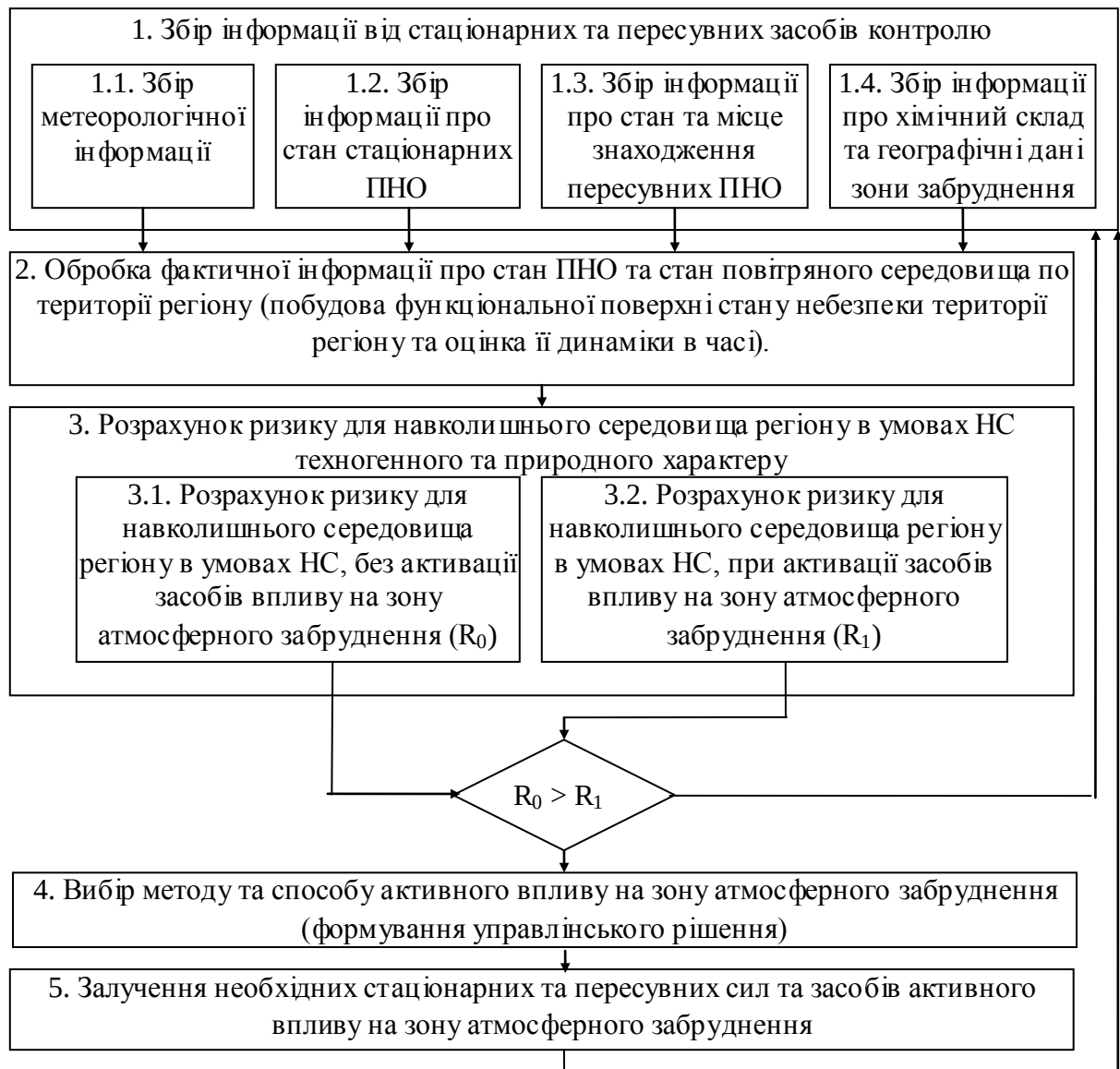


Рис. 6.2. Алгоритм функціонування системи ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду в атмосферу небезпечних речовин

Критерієм доцільності є відношення ризиків від наслідків НС для навколишнього середовища без активації (R_0) та при активації розробленого комплексу заходів (R_1).

Ризики (R) для навколишнього середовища визначаються добутком ймовірності події (Z) та збитку від наслідків (A):

$$R = Z \cdot A. \quad (6.1)$$

Оскільки оцінюються ризики від тієї ж самої події (НС), то ймовірності є рівними ($Z_0=Z_1$). Відповідно ризики (R_0, R_1) будуть визначатися відповідними збитками (A_0, A_1).

Згідно затвердженої Кабінетом Міністрів України Методики оцінки збитків від наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру [483], збитки розраховуються по формулі:

$$A = H_p + M_p + P_{c/x} + P_{л/x} + P_{p/x} + P_{рек} + P_{пзф} + A_{\phi} + B_{\phi} + Z_{\phi}, \quad (6.2)$$

де H_p – втрата життя та здоров'я населення; M_p – руйнування та ушкодження основних фондів, знищення майна; $P_{c/x}$ – видалення або порушення сільськогосподарських угідь; $P_{л/x}$ – втрати деревини та інших лісових ресурсів; $P_{p/x}$ – втрати рибного господарства; $P_{рек}$ – знищення або погіршення якості рекреаційних зон; A_{ϕ} – забруднення атмосферного повітря; B_{ϕ} – забруднення поверхневих та підземних вод та джерел, внутрішніх морських вод та територіального моря; Z_{ϕ} – забруднення земель несільськогосподарського призначення; $P_{пзф}$ – збиток, завданий природно-заповідному фонду.

Процедура розрахунку кожного параметра викладена в Методиці [483], однак основними факторами, що визначають більшість параметрів, є розміри зони забруднення, хімічний склад та кількість забруднюючих речовин. При порівнянні ризиків розглядається одна надзвичайна ситуація, тому хімічний склад та кількість забруднюючих речовин для R_0 та R_1 будуть однаковими (за винятком випадків використання штучно ініційованих опадів при гасінні масштабних пожеж). Відповідно ризики R_0 та R_1 визначаються тільки розміром зон забруднення.

При виборі хімічного методу опадоутворення негативним екологічним впливом можна знехтувати, тому що концентрація реагентів, що вводиться, на 2-3 порядки нижче їх гранично допустимих концентрацій.

За умови $R_0 \leq R_1$ активація системи не доцільна, однак ситуація розвивається в часі, тому необхідний постійний контроль моніторингових параметрів для відстеження моменту можливої зміни ситуації. За умови $R_0 > R_1$ відбувається активація основних систем підтримки ухвалення рішення, де на основі отриманих даних з використанням розробленого комплексу розрахункових інструментів проводиться прогнозування інтенсивності опадів, які визначають швидкість виведення забруднення з нижньої атмосфери. У свою чергу, швидкість осадження забруднення визначає розміри зони ураження атмосфери від НС.

Однак інтенсивність опадів, крім метеорологічних умов у зоні опадоутворення, залежить від методу та способу штучного впливу. Тому особа, що приймає управлінське рішення, на основі отриманих у результаті прогнозування даних повинна вибрати найбільш ефективний спосіб впливу, що підходить для даних умов. У цьому випадку істотним є й вибір способу доставки активаторів у зону опадоутворення, що залежить від обраного способу впливу. Вибір необхідного способу доставки також перебуває в компетенції особи, що приймає рішення.

Після того, як керівник процесу ліквідації забруднення визначився зі способами впливу та доставки активних центрів краплеутворення в зону впливу, управлінське рішення надходить у систему виконання рішення, де відбувається його формалізація та постановка конкретних завдань перед виконавцями. В якості виконавців можуть виступати пілоти літаків для розпилення реагентів, оператори БПЛА, призначених для доставки реагентів, або оператори багатопозиційної системи наземних випромінювачів при виборі електрофізичного методу впливу.

При штучному впливі на хмарні утворення починають випадати опади, осаджуючи небезпечні речовини із зони забруднення. При цьому проводиться моніторинг зони забруднення по залишковій концентрації небезпечних речовин, що дає можливість оцінити ефективність як

використаного способу очищення атмосфери, так і прийнятих управлінських рішень.

Таким чином, запропонована нова комплексна система ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду в атмосферу небезпечних речовин, на основі розроблених алгоритмів методів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, як шляхом осадження штучно ініційованими опадами газоподібних та дисперсних небезпечних хімічних та радіоактивних речовин, так і шляхом локалізації зони інтенсивного горіння з використанням штучно ініційованих опадів. До складу розробленої системи включені три підсистеми – моніторингу, підтримки управлінського рішення та його виконання. Система моніторингу дозволяє одержати повний спектр даних про зону забруднення та метеорологічну ситуацію. Система підтримки прийняття управлінських рішень дозволяє проводити прогнозування інтенсивності опадів над зоною забруднення, інтенсивності очищення зони забруднення та динаміки її розвитку. Система виконання управлінського рішення має у своєму розпорядженні вискоєфективні способи штучного опадоутворення, які застосовні в широкому діапазоні умов та мають спеціалізацію при використанні по видах забруднення. Універсальність розроблених методів ліквідації наслідків НС природного та техногенного характеру забезпечує інтегрування нових та перспективних, як хімічних, так і фізичних, методів штучного впливу на атмосферні процеси.

6.2. Економічне обґрунтування ефективності використання розроблених методів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду в атмосферу небезпечних речовин

При розробці будь-якого технічного рішення невід'ємним моментом доказу його актуальності (доцільності) є встановлення економічної

доцільності його впровадження та використання. Для оцінки економічної ефективності використання запропонованої в роботі системи мінімізації наслідків НС для атмосфери проведено порівняльну оцінку екологічного збитку від масштабної пожежі з економічними витратами на використання запропонованих у роботі методів боротьби з таким забрудненням.

Як приклад масштабної пожежі обрано масштабну техногенну екологічну катастрофу, викликану загорянням нафтопродуктів та супутніми вибухами на нафтобазі біля с.м.т. Глеваха (безпосередньо біля с. Кобци) Васильківського району Київської області, що почалася 8 червня 2015 року. Внаслідок пожежі шість чоловік загинули та 15 постраждали.

Базуючись на офіційних звітах Міністерства екології та природних ресурсів України [484], оцінена кількість згорілого палива становить 3-4 тис. тонн.

Розрахунок збитку від забруднення атмосфери продуктами горіння проводився на основі Методики оцінки збитків від наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру [483]. Слід зазначити, що розрахунок збитку проводився тільки від забруднення атмосферного повітря, тоді як тривале знаходження шкідливих речовин в атмосфері є основним чинником високих розмірів зони забруднення та, як наслідок, додаткових збитків від порушень сільськогосподарських угідь, збитку тваринництва, порушення рекреаційних зон, забруднення поверхневих і підземних вод та ін.

Згідно п. 10 [483] розрахунок збитку від забруднень атмосферного повітря проводиться по наступній формулі:

$$A_{\phi} = \sum (M_i \cdot \Pi_i \cdot A_i \cdot K_T \cdot K_{zi}), \quad (6.3)$$

де A_{ϕ} – збиток від забруднення атмосферного повітря, гривень; M_i – маса i -ї забруднюючої речовини, що була викинута в повітря внаслідок НС, тонн; Π_i – базова ставка компенсації збитків у частках мінімальної заробітної плати

за одну тонну умовної забруднюючої речовини, гривень/тонну; A_i – безрозмірний показник відносної небезпеки забруднюючої речовини; K_T – коефіцієнт урахування територіальних соціально-екологічних особливостей; K_{zi} – коефіцієнт забруднення атмосферного повітря в населеному пункті.

Спочатку необхідно встановити вид та кількість забруднюючої речовини, викинутої в атмосферу із продуктами горіння. У розділі 2 даної роботи наведено аналіз хімічного та масового складу продуктів горіння різних горючих речовин. Розрахункові результати середньої кількості отруйних речовин, що потрапили в атмосферу при пожежі на нафтобазі ТОВ «Битрембудматеріали», з розрахунку зазначеної кількості згорілих нафтопродуктів, наведені в таблиці 6.1 [331].

Мінімальна зарплата часто змінюється, тому задамо значення на момент проведення розрахунків (листопад–травень 2016р.) – $\Pi_i = 1450$ грн.

Безрозмірний показник відносної небезпеки забруднюючої речовини розраховується по формулі:

$$A_i = \frac{1}{ГДК_i}, \quad (6.4)$$

де $ГДК_i$ – середньодобова гранично припустима концентрація (ГДК) i -ї забруднюючої речовини, $мг/м^3$. Дані наведені в таблиці 6.1.

Коефіцієнт, що враховує територіальні соціально–екологічні особливості (K_T), залежить від чисельності жителів населеного пункту, його народногосподарського значення та розраховується по наступній формулі:

$$K_T = K_{нас.} \cdot K_{\phi}, \quad (6.5)$$

де $K_{нас.}$ – коефіцієнт, що залежить від чисельності жителів населеного пункту та визначається по табл. 6.2.; K_{ϕ} – коефіцієнт, що враховує народногосподарське значення населеного пункту та визначається по табл. 6.3.

Таблиця 6.1

Оцінена кількість забруднюючих атмосферу речовин при пожежі на нафтобазі ТОВ «Битрембудматеріали»

Небезпечна речовина	Оцінена вага продуктів горіння, тонн	Середньодобова ГДК [48], мг/м ³
Оксид вуглецю (CO)	3320	3
Діоксид азоту (NO ₂)	220	0,04
Оксид азоту (NO)	152	0,06
Дигідросульфід (H ₂ S)	11	0,008
Оксиди сірки (SO _x)	152	0,05–0,1
Тетраетилсвинець (Pb(C ₂ H ₅) ₄)	2	0,005
Синильна кислота (HCN)	11	0,01
Формальдегід (HCHO)	9	0,003
Органічні кислоти (R-COOH)	140	0,02 – 0,14
Сажа (C)	280	0,05
Зола	200	0,02

Оскільки зона забруднення продуктами горіння досягала м. Києва, то для розрахунків приймемо $K_{\text{нас.}}=1,80$, а $K_{\text{ф}}=1,25$. Таким чином, по формулі (6.5): $K_{\text{т}}=1,80 \cdot 1,25=2,25$.

Таблиця 6.2

Значення коефіцієнтів, що залежать від чисельності жителів населеного пункту [482]

Чисельність населення, тис. чол.	$K_{\text{нас.}}$
До 100	1,00
100,1–250	1,20
250,1–500	1,35
500,1–1000	1,55
більше 1000	1,80

Згідно [483] у випадку, коли середньорічна концентрація забруднюючих речовин по даним прямих інструментальних вимірів на стаціонарних постах за попередній рік не перевищувала ГДК, коефіцієнт забруднення атмосферного повітря в населеному пункті ($K_{\text{зп}}$) приймається рівним 1.

Таблиця 6.3

Значення коефіцієнтів, що враховують народногосподарське значення населеного пункту [483]

Тип населеного пункту	К _ф .
I. Організаційно-господарські та культурно-побутові центри місцевого значення з перевагою аграрно-промислових функцій (районні центри, міста, селища районного підпорядкування) і села	1,00
II. Багатофункціональні центри, центри з перевагою промислових і транспортних функцій (обласні центри, міста обласного підпорядкування, великі промислові та транспортні вузли)	1,25
III. Центри з переважно рекреаційними функціями	1,65

Таким чином, підставивши чисельні значення, одержимо:

$$A_{\phi} = (3320 \cdot 0,33 + 220 \cdot 25 + 152 \cdot 16,7 + 11 \cdot 125 + 152 \cdot 20 + 2 \cdot 200 + 11 \cdot 100 + 9 \cdot 333,3 + 140 \cdot 50 + 280 \cdot 20 + 200 \cdot 50) \cdot 1450 \cdot 2,25 \cdot 1 \approx 132,6 \text{ млн грн.}$$

Отриманий збиток від забруднення атмосфери необхідно порівняти з витратами на очищення зони забруднення запропонованими в роботі методами штучного опадоутворення. Відповідно до звітів ДСНС зона забруднення під час пожежі становила близько 600 км². Тому при розрахунках будемо орієнтуватися на ці значення області забруднення як на найгірший варіант розвитку подій.

Спочатку необхідно визначити кількісні параметри опадів, здатні забезпечити екологічну безпеку в зоні забруднення. Як показано в розділі 3 даної роботи, найменшу швидкість осадження серед забруднюючих реагентів мають газоподібні речовини. Серед газоподібних продуктів горіння рідких вуглеводнів найменшу інтенсивність вимивання опадами має діоксид азоту (NO₂). Згідно з цим час осадження NO₂, з концентрацією, рівною ГДК, залежно від інтенсивності опадів, лежить у межах 20–50 хв. Як активний реагент пропонується використати розроблену та запатентовану сполуку ПС-4-61 [354], а, крім ефективних опадоутворюючих властивостей, має функцію нейтралізації кислотності атмосферного середовища.

Згідно багатьох експериментальних та теоретичних даних мінімальна витрата кристалоутворюючих реагентів подібного класу становить порядку 0,3-1,2 г/км² [304, 343]. Однак у практиці штучного ініціювання опадів рекомендується використовувати 3-5 кратний запас реагенту [309]. Обираючи найгірший варіант, визначимо, що для повного впливу на хмару над зоною забруднення необхідно 3600 м реагенту. При виборі ринкової вартості піропатронів подібного класу будемо орієнтуватися на дані фірми-виробника «ЛЮЗА» [344]. Маса реагенту в піропатроні становить 67 м, відповідно необхідно використати 54 піропатрони вартістю 930 грн кожний. Відповідно витрати на піропатрони становлять 50220 грн. Вартість години польоту літака типу АН-26 становить порядку 25000 грн. Це основні витрати, також можна врахувати додаткові витрати на роботу експертів по локалізації забруднення, моніторингу зони забруднення (який проводиться в кожному разі) та ін., що додатково становить близько 10000 грн. У такий спосіб приблизна оцінка загальних витрат на забезпечення екологічної безпеки нижньої атмосфери в зоні техногенної пожежі становить:

$$B \approx 50220 + 25000 + 10000 \approx 85 \text{ тис. грн.}$$

У результаті порівняльного аналізу одержуємо, що витрати на забезпечення екологічної безпеки на 3 порядки нижче екологічного збитку від забруднення нижньої атмосфери. Крім того, слід зазначити, що використання запропонованої системи забезпечення екологічної безпеки в перші години масштабної пожежі дозволить не допустити таких великих масштабів забруднення. Використання як засобу доставки реагенту в зону впливу БПЛА приведе до істотного зниження вартості літаковильотів. У цих умовах матеріальні витрати на очищення атмосфери можна істотно знизити.

Таким чином, проведено розрахунок економічного ефекту від впровадження розробленої системи ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду в

атмосферу небезпечних речовин, на прикладі пожежі на нафтобазі ТОВ «Битрембудматеріали», який показав зменшення збитків на 2 порядки.

Висновки по розділу 6.

1. Запропонована нова комплексна система ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду в атмосферу небезпечних речовин на основі розроблених алгоритмів методів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, як шляхом осадження штучно ініційованими опадами газоподібних та дисперсних небезпечних хімічних та радіоактивних речовин, так і шляхом локалізації зони інтенсивного горіння з використанням штучно ініційованих опадів. До складу розробленої системи включені три підсистеми – моніторингу, підтримки управлінського рішення та його виконання. Система моніторингу дозволяє одержати повний спектр даних про зону забруднення та метеорологічну ситуацію. Система підтримки прийняття управлінських рішень дозволяє проводити прогнозування інтенсивності опадів над зоною забруднення, інтенсивності очищення зони забруднення та динаміки її розвитку. Система виконання управлінського рішення має у своєму розпорядженні високоефективні способи штучного опадоутворення, які застосовні в широкому діапазоні умов та мають спеціалізацію при використанні по видах забруднення. Універсальність розроблених методів ліквідації наслідків НС природного та техногенного характеру забезпечує інтегрування нових та перспективних, як хімічних, так і фізичних, методів штучного впливу на атмосферні процеси.

2. Проведено розрахунок економічного ефекту від впровадження розробленої системи ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду в атмосферу небезпечних речовин, на прикладі пожежі на нафтобазі ТОВ «Битрембудматеріали», який показав зменшення збитків на 2 порядки.

ВИСНОВКИ

Вирішено актуальну науково-практичну проблему в галузі забезпечення цивільного захисту держави, а саме: розроблено нові організаційно-технічні методи ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду в атмосферу газоподібних та дисперсних небезпечних речовин.

При виконанні дисертаційної роботи отримані наступні висновки:

1. Аналіз існуючих систем та принципів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру з викидом в атмосферу небезпечних речовин показує, що передові держави світу, такі як США, держави Європейської співдружності та Китай, використовують багатофункціональні системи моніторингу для прогнозу та попередження цих надзвичайних ситуацій. В державах СНД ведеться розвиток систем в цьому напрямку. В арсеналі цих держав є системи штучного ініціювання опадів різного призначення, які можуть бути використані для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

2. Особливості надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру з викидом в атмосферу небезпечних речовин, які відбуваються в Україні, показують, що одним з перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є розробка нових організаційно-технічних методів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду в атмосферу небезпечних газоподібних та дисперсних речовин, шляхом штучного ініціювання опадів, які, з одного боку, повинні приводити до осадження хімічних та радіоактивних небезпечних речовин з атмосфери, а з іншого – дозволяти локалізувати осередки природних та техногенних катастроф, що супроводжуються інтенсивним горінням.

3. На базі математичної моделі осадження штучно ініційованими атмосферними опадами газоподібних та дисперсних небезпечних хімічних та

радіоактивних речовин, що викидаються в атмосферу внаслідок надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, розроблено організаційно-технічний метод ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом осадження з атмосфери небезпечних газоподібних та дисперсних речовин. Він призначений для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводять до викиду в атмосферу газоподібних та дисперсних небезпечних хімічних та радіоактивних речовин. Його використання передбачає виконання п'яти процедур, а саме: отримання керівником ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій необхідного комплексу моніторингової інформації; розрахунок часу вільного поширення зони ураження у атмосфері; визначення розмірів прогнозованої зони атмосферного ураження; проведення оцінки належності площі НС області допустимих рішень; залучення сил та засобів для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

4. На базі математичної моделі процесу локалізації та ліквідації штучно ініційованими опадами осередків природних та техногенних катастроф з інтенсивним горінням розроблено організаційно-технічний метод ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру шляхом локалізації осередків інтенсивного горіння. Він призначений для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру з осередками інтенсивного горіння. Його використання передбачає використання чотирьох процедур, а саме: збір, обробка та систематизація моніторингових даних; прогнозування розвитку осередку горіння та інтенсивності опадів; постановка конкретних задач виконавцям; безпосередній вплив на атмосферні процеси.

5. Результати лабораторних експериментів, виконаних на лабораторній установці для дослідження процесів осадження газоподібних та дисперсних речовин, яка включає: герметичний корпус, системи контролю концентрації газу в об'ємі камери, пристрій подачі в камеру дрібнодисперсного рідинного

аерозолю, відсік для горіння, та лабораторній установці для дослідження процесів горіння при різних метеорологічних умовах, яка включає: герметичну камеру, модельний осередок горіння, системи контролю середовища та джерело запалювання, розраховані з надійністю 0,95 за критерієм Фішера, що засвідчує достовірність розроблених моделей та організаційно-технічних методів.

6. На основі розроблених організаційно-технічних методів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру запропонована нова комплексна система ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру з викидом в атмосферу небезпечних речовин. До складу розробленої системи включені три підсистеми – підсистема моніторингу, підсистема підтримки управлінського рішення та підсистема виконання управлінського рішення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Соботович Э.В., Довгий С.А., Лысенко О.Б. Экологическая энциклопедия: [в 5 т.]. Киев: Логос, Т. 3. 2012. 970 с.
2. Небел Б. Наука об окружающей среде М.: Наука, 1993. 386 с.
3. Скурлатов Ю.И., Дука Г.Г., Мизити А. Введение в экологическую химию. М.: Высшая школа, 1994. 400 с.
4. Андруз Дж., Бримблекумб П., Джикелз Т., Лисс П. Введение в химию окружающей среды. М.: Мир, 1999. 271 с.
5. Бримблекумб П. Состав и химия атмосферы. М.: Мир, 1988. 351 с.
6. Вернигорова В.Н., Макридин Н.И., Соколова Ю.А., Максимова И.Н. Химия загрязняющих веществ и экология. М.: Издательство «Палеотип», 2005. 240 с.
7. Ларин И. К. Химия ночной тропосферы. I. Процессы с участием окислов азота. *Экологическая химия*. 2011. № 20(3). С. 155 - 162.
8. Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x. *Atmos. Environ.* 2000. № 34. pp. 2063–2101.
9. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Поздняков Д.В. Атмосферный аэрозоль. Гидрометеиздат. 1983. 224 с.
10. Pepin T. J. Observations of stratospheric aerosols from the Apollo-Soyuz test project (A.S.T.P.), in *Proceedings of the Symposium on Radiation in the Atmosphere*, ed by H.-J. Bolle, IAMAP Radiation Symposium; Garmisch-Partenkirchen, West Germany. 1976. pp. 151–152.
11. Заиков Г.Е., Маслов С.А., Рубайло В.Л. Кислотные дожди и окружающая среда. М., Химия, 1991. 144 с.
12. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли – пыли, дымы, туманы. Л.: Химия, 1972. 426 с.
13. Хорват Л. Кислотный дождь. М.: Стройиздат. 1990. 81 с.
14. Богатырева Н.А., Богатырева Н.А., Лесненко Е.И. Химия Земли и экология. М.: МГУ. 1997. 204 с.

15. Houser C.A., Nickling W.G. The emission and vertical flux of particulate matter < 10 microns from a disturbed clay-crust surface. *Sedimentology*. 2001. № 48(2). С. 255–268.
16. Thibodeaux L.J. Mackay D. Chemical Mass Transport in the Environment. CRC Press., 2010. 631 с.
17. Barndorff-Nielsen O.E., Willetts B.B. Aeolian Grain Transport 1: Mechanics. *Springer Science & Business Media*. 2012. 183 с.
18. Lewis E.R., Schwartz S.E. Sea Salt Aerosol Production: Mechanisms, Methods, Measurements, and Models. *Geophysical Monograph Series, Washington*. 2004. Vol. 152. 413 p.
19. Brennan W.J., Schultz P.A. Atmospheric Aerosol Properties and Climate Impacts. *U.S. Climate Change Science Program Synthesis and Assessment Product*. 2009. 128 p.
20. Chin M., Ginoux P., Kinne S. Tropospheric aerosol optical thickness from the GOCART model and comparisons with satellite and sunphotometer measurements. *J. Atmos. Sci.* 2002. № 59. pp. 461–483.
21. Ивлев Л.С., Довгальок Ю.А. Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб.: НИИХ СПбГУ. 1999. 194с.
22. Стан довкілля в Україні. Інформаційно-аналітичний огляд. URL: <http://www.ecobank.org.ua/GovSystem/EnvironmentState/Reviews/Pages/default.aspx> (дата звернення: 05.10.2018).
23. Витрищак С.В., Санина Е.В., Сичанова Е.В. и др. Анализ загрязнения атмосферного воздуха крупных промышленных городов и его влияние на уровень заболеваемости детей и подростков. *Український журнал клінічної та лабораторної медицини*. Луганск, 2010. Т.5, №4. С 167–172.
24. Исаева Л.К. Экология пожаров, техногенных и природных катастроф. М.: Академия ГПС МВД России, 2000. 301 с.
25. Тимонин А.С. Инженерно-экологический справочник. Калуга, 2003. 971 с.

26. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2013 році. URL: http://www.mns.gov.ua/content/annual_report_2013.html (дата звернення: 05.10.2018).
27. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2004 році. URL: http://www.mns.gov.ua/content/annual_report_2004.html (дата звернення: 05.10.2018).
28. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2005 році. URL: http://www.mns.gov.ua/content/annual_report_2005.html (дата звернення: 05.10.2018).
29. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2006 році. URL: http://www.mns.gov.ua/content/annual_report_2006.html (дата звернення: 05.10.2018).
30. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2007 році. URL: http://www.mns.gov.ua/content/annual_report_2007.html (дата звернення: 05.10.2018).
31. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2008 році. URL: http://www.mns.gov.ua/content/annual_report_2008.html (дата звернення: 05.10.2018).
32. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2009 році. URL: http://www.mns.gov.ua/content/annual_report_2009.html (дата звернення: 05.10.2018).
33. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2010 році. URL: http://www.mns.gov.ua/content/annual_report_2010.html (дата звернення: 05.10.2018).
34. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2011 році. URL: http://www.mns.gov.ua/content/annual_report_2011.html (дата звернення: 05.10.2018).
35. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2012 році. URL: http://www.mns.gov.ua/content/annual_report_2012.html (дата звернення: 05.10.2018).

36. Абдурахманов М.И., Баришпольц В.А., Манилов В.Л., Пирумов В.С. Основы национальной безопасности. М.: Друза, 1998. 327 с.
37. Исидоров В.А. Органическая химия атмосферы. СПб., Химиздат, 2001. 352 с.
38. NAOPEX — Nighttime Aerosol/Oxidant Plume Experiment URL: [http://www.atmos.anl.gov/ACP/2003AS Ppresentations/ZaveriASP03.pdf](http://www.atmos.anl.gov/ACP/2003AS/Ppresentations/ZaveriASP03.pdf) (Last accessed: 05.10.2018).
39. PROPHET 2001 — Program for Research on Oxidants: Photochemistry, Emissions, and Transport. URL: http://ams.confex.com/ams/annual2002/techprogram/paper_31302.htm (Last accessed: 05.10.2018).
40. Transport and chemical transformation of Environmentally Relevant Trace Constituents in the Troposphere over Europe URL: http://www.helmholtz-muenchen.de/eurotrac/what_is/old-sp.htm (Last accessed: 05.10.2018).
41. Sommariva R., Pilling M.J., Bloss W.J. et al. Nighttime radical chemistry during the NAMBLEX campaign. *Chem. Phys.* 2007. № 7. pp. 587–598.
42. Ladstatter-Weissenmayer A., Heland J., Kormann R. Transport and build-up of tropospheric trace gases during the MINOS campaign: Comparison of GOME, in situ aircraft measurements and MATCH-MPIC-data. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2003. № 3. pp. 3051–3094.
43. Emmerson K.M., Carslaw N. Night-time radical chemistry during the TORCH campaign. *Atmos. Environ.* 2009. № 43. pp. 3220 - 3226.
44. CHEMATA 2.0. URL: <http://www.chemata.com> (Last accessed: 05.10.2018).
45. Stockwell W.R., Kirchner F., Kuhn M. A new mechanism for regional atmospheric chemistry modeling. *J. Geophys. Res.* 1997. № 102. pp. 25847-25879.
46. Carslaw N., Jacoba P.J., Pilling M. J. Modeling OH, HO₂, and RO₂ radicals in the marine boundary layer 2. Mechanism reduction and uncertainty analysis. *J. Geophys. Res.* 1999. № 104. pp. 30257-30273.
47. Atkinson R. Gas-phase tropospheric chemistry of organic compounds: a review. *Atmospheric Environment*. 2007. № 41. pp. 200 – 240.

48. Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами). ДСП 201-97. Діє від 1997-07-09. Наказ Міністерства охорони здоров'я України № 201. 43 с.
49. Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов. ГОСТ 17.2.3.01-86. Действует от 1987-01-01. Постановление Государственного комитета СССР по стандартам от 10 ноября 1986 г. № 3359. 4 с.
50. Охрана природы. Атмосфера. Правила установления допустимых выбросов. Вредных веществ промышленными предприятиями. ГОСТ 17.2.3.02-78. Действует от 1980-01-01. Постановление Государственного комитета СССР по стандартам от 24 августа 1978 г. № 2329. 15 с.
51. Атмосферный воздух и воздух закрытых помещений, санитарная охрана воздуха. СанПиН 2.1.6.575-96. Действует от 1996-01-11. Постановление Госкомсанэпиднадзора России от 31 октября 1996 года № 48. 21с.
52. The National Ambient Air Quality Standard (NAAQS). The U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Dec. 14, 2012. 43 p.
53. MOD04_L2. URL: ftp://ladsweb.nascom.nasa.gov/allData/51/MOD04_L2/ (Last accessed: 05.10.2018).
54. OMTO3d. URL: http://eosps0.gsfc.nasa.gov/eos_homepage/for_scientists/atbd/docs/OMI/ (Last accessed: 05.10.2018).
55. AIRX2RET. URL: http://eosps0.gsfc.nasa.gov/eos_homepage/for_scientists/atbd/docs/AIRS/ (Last accessed: 05.10.2018)
56. Advancing the Science of Climate Change. URL: <http://dels.nas.edu/resources/static-assets/materials-based-on-reports/reports-in-brief/Science-Report-Brief-final.pdf> (Last accessed: 05.10.2018)
57. ГОСТ СССР 17.6.1.01-83. Охрана природы. Охрана и защита лесов. Термины и определения: Введ. 01.07.84. М.: Изд. стандартов, 1984. 12 с.
58. Коротинський П.Н. Захист природних екосистем України від пожеж. *Надзвичайна ситуація*. 2002. №3. С. 48–51.

59. Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука СО. 1977. 237 с.
60. Иличкин В.С., Леснович А.А., Яненко М.В. Термические превращения и токсичность продуктов горения древесины. *Обз.инф.* М.: ГИЦ МВД СССР, 1990. №8. 67 с.
61. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. Л.: Химия, 1988. 312 с.
62. Сучков В.П., Безродный И.Ф., Вязниковцев А.В. и др. Пожары резервуаров с нефтью и нефтепродуктами. *Обз.инф.: Сер. Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья.* М.: ЦНИИТЭФТЕХИМ, 1992. Вып. 3–4. 97 с.
63. Violi A., D'Anna A., D'Alessio A. Modeling of particulate formation in combustion and pyrolysis. *Chemical Engineering Science.* 1999. V. 54. pp. 3433 – 3442.
64. Hall-Roberts V.J., Hayhurst A.N., Knight D.E., Taylor S.G. The origin of soot in flames: Is the nucleus an ion. *Combustion Flame.* 2000. V. 120, I. 4. pp. 578 – 584.
65. Kreatinin A.V. Detailed modeling of soot formation in hydrocarbon pyrolysis. *Combustion Flame.* 2000. V. 121. pp. 513 - 524.
66. Bockhorn H. Soot formation in combustion. *Springer*, Berlin/Heidelberg. 1994. p. 124.
67. Neri G., Bonaccorsi L., Donato A., Milone C., Musolino M.G., Visco A.M. Catalytic combustion of diesel soot over metal oxide catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental.* 1997. V. 11. pp. 217 – 231.
68. Stanmore B.R., Brilhac J.F., Gilot P. The oxidation of soot: a review of experiments, mechanisms and models. *Carbon.* 2001. V. 39. pp. 2247 – 2268.
69. Courcot D., Abi-Aad E., Capelle S., Aboukais A. Investigation of copper-cerium oxide catalysts in the combustion of diesel soot. *Studies in Surface Science and Catalysis.* 1998. V. 116. pp. 625 – 634.

70. Akhter M.S., Chughtai A.R., Smith D.M. The Structure of Hexane soot II: Extraction Studies. *Applied Spectroscopy*. 1985. V. 39. pp. 154–167.
71. Sergides C.A., Jassim J.A., Chughtai A.R., Smith D.M. The Structure of Hexane soot III: Ozonation Studies. *Applied Spectroscopy*. 1987. V. 41. pp. 482–492.
72. Akhter M.S., Chughtai A.R., Smith D.M. The Structure of Hexane soot I: Spectroscopic Studies. *Applied Spectroscopy*. 1985. V. 39. P. 143–153.
73. Rockne K.J., Taghon G.L., Kosson D.S. Pore structure of soot deposits from several combustion sources. *Chemosphere*. 2001. V. 41. pp. 1125–1135.
74. NRA. Readings of Environmental Radiation Level by emergency monitoring (March 2011). URL: <http://radioactivity.nsr.go.jp/en/list/207/list-201103.html> (Last accessed: 05.10.2018).
75. UNSCEAR 2000. Exposures and effects of the Chernobyl accident (Annex J). New York: United Nations URL: <http://www.unscear.org/docs/reports/annexj.pdf> (Last accessed: 05.10.2018).
76. Yoshenko V.I. Resuspension and redistribution of radionucleotides during grassland and forest fires in the Chernobyl exclusion zone, Part I: Fire experiments. *J. Environ. Radioactiv.* 2006. № 86. pp. 143–163.
77. Yoshenko V.I. Resuspension and redistribution of radionucleotides during grassland and forest fires in the Chernobyl exclusion zone, Part II: Modeling the transport process. *J. Environ. Radioactiv.* 2006. № 86. pp. 260–278.
78. Yamauchi M., Takeda M., Makino M., Owada T., Miyagi I. Settlement process of radioactive dust to the ground inferred from the atmospheric electric field measurement. *Ann. Geophys.* 2012. № 30. pp. 49–56.
79. Pöllänen R., Valkama I., Toivonen H. Transport of radioactive particles from the Chernobyl accident. *Atmospheric Environment*. 1997. № 21. pp. 3575–3590.
80. 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. № 38. pp. 993–1003.

81. Stohl A. Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition. *Atmos. Chem. Phys.* 2012. № 12. pp. 2313–2343.
82. Winiarek V., Bocquet M., Saunier O., Mathieu A. Estimation of errors in the inverse modeling of accidental release of atmospheric pollutant: Application to the reconstruction of the cesium-137 and iodine-131 source terms from the Fukushima Daiichi power plant. *J. of Geophysical Research.* 2012. № 117. pp. 5122–5159.
83. De Cort M., Dubois G., Fridman S.D. et al. Atlas of cesium deposition on Europe after the Chernobyl accident. *EUR Report Nr. 16733. Brussels-Luxemburg: Office for Official Publications of the European Communities; ECSC-EEC-EAEC.* 1998. p. 236.
84. Diehl J.F. Radioaktivität in Lebensmitteln. Weinheim: Wiley-VCH., 2003 p. 138.
85. Yoshida N., Takahashi Y. Land-surface contamination by radionuclides from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Elements.* 2012. vol. 8 № 3. pp. 201–206.
86. Steinhauser G., Brandl A., Johnson T.E. Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts. *Science of the Total Environment.* 2014. № 470–471. pp. 800–817.
87. Dreicer M., Aarkrog A., Alexakhin R., Anspaugh L., Arkhipov N.P., Johansson K-J. Consequences of the Chernobyl accident for the natural and human environments. *EC, IAEA & WHO, editors. One decade after Chernobyl: summing up the consequences of the accident.* Vienna: IAEA. 1996. pp. 319–361.
88. Kirchner G., Noack C. Core history and nuclide inventory of the Chernobyl core at the time of accident. *Nucl Saf.* 1988. № 29. pp. 1–5.
89. Aldahan A., Possnert G. ¹²⁹I anthropogenic budget: major sources and sinks. *Appl Geochem.* 2007. № 22. pp. 606–618.

90. UNSCEAR 2008. Sources and effects of ionizing radiation (annex D). New York: United Nations. URL: http://www.unscear.org/docs/reports/2008/11-80076_Report_2008_Annex_D.pdf (Last accessed: 05.10.2018).
91. Kashparov V.A., Lundin S.M., Zvarych S.I. et al. Territory contamination with the radionuclides representing the fuel component of Chernobyl fallout. *Sci Total Environ.* 2003. № 317. pp. 105–119.
92. Paul M., Fink D., Hollos G. et al. Measurement of iodine-129 concentrations in the environment after the Chernobyl reactor accident. *Nucl Instrum Meth B.* 1987. № 29. pp. 341–345.
93. Anspaugh L.R., Catlin R.J., Goldman M. The global impact of the Chernobyl reactor accident. *Science.* 1988. № 242. pp. 1513–1519.
94. Ahlswede J., Hebel S., Ross J.O., Schoetter R., Kalinowski M.B. Update and improvement of the global krypton-85 emission inventory. *J Environ Radioact.* 2013. № 115. pp. 34–42.
95. Stohl A., Seibert P., Wotawa G. The total release of xenon-133 from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. *J Environ Radioact.* 2012. № 112. pp. 155–159.
96. Tagami K., Uchida S., Ishii N., Zheng J. Estimation of ^{132}Te distribution in Fukushima Prefecture at the early stage of the Fukushima Daiichi nuclear power plant reactor failures. *Environ Sci Technol.* 2013. № 47. pp. 5007–5012.
97. Hou X., Povinec P.P., Zhang L. et al. Iodine-129 in seawater offshore Fukushima: distribution, inorganic speciation, sources, and budget. *Environ Sci Technol.* 2013. № 47. pp. 3091–3098.
98. Chino M., Nakayama H., Nagai H., Terada H., Katata G., Yamazawa H. Preliminary estimation of release amounts of ^{131}I and ^{137}Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the atmosphere. *J Nucl Sci Technol.* 2011. № 48. pp. 1129–1134.
99. Hamada N., Ogino H., Fujimichi Y. Safety regulations of food and water implemented in the first year following the Fukushima nuclear accident. *J Radiat Res.* 2012. № 53. pp. 641–671.

100. Ten Hoeve J.E., Jacobson M.Z. Worldwide health effects of the Fukushima Daiichi nuclear accident. *Energy Environ Sci.* 2012. № 5. pp. 8743–8757.
101. Kobayashi T., Nagai H., Chino M., Kawamura H. Source term estimation of atmospheric release due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident by atmospheric and oceanic dispersion simulations. *J. Nucl Sci Technol.* 2013. № 50. pp. 255–264.
102. Zheng J., Tagami K., Watanabe Y. et al. Isotopic evidence of plutonium release into the environment from the Fukushima DNPP accident. *Sci. Rep.* 2012. № 2. pp. 304–311.
103. Ahamdach N. The Chernobyl pilot site project: isolation and microscopic characterisation of fuel particles. *Radioprotection-Colloques.* 2002. № 37. pp. 1055–1060.
104. Kashparov V.A. Hot particles at Chernobyl. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2003. № 10 (1). pp. 21–30.
105. Kashparov V.A., Ivanov Yu.A., Zvarich S.I. et al. Formation of hot particles during the Chernobyl nuclear power plant accident. *Nucl. Technol.* 1996. № 114. pp. 246–253.
106. Kashparov V.A., Oughton D.H., Zvarich S.I., Protsak V.P., Levchuk S.E. Kinetics of fuel particle weathering and ⁹⁰Sr mobility in the Chernobyl 30-km exclusion zone. *Health Phys.* 1999. № 76. pp. 251–259.
107. Kashparov V.A., Protsak V.P., Ahamdach N. et al. Dissolution kinetics of particles of irradiated Chernobyl nuclear fuel: influence of pH and oxidation state on the release of radionuclides in contaminated soil of Chernobyl. *J. Nucl. Mater.* 2000. № 279. pp. 225–233.
108. Kashparov V.A., Lundin S.M., Khomutinin Yu.V. et al. Soil contamination with ⁹⁰Sr in the near zone of the Chernobyl accident. *J. Environ. Radioactiv.* 2001. № 56. pp. 285–298.
109. Kashparov V.A., Ahamdach N., Dewire L. Trench Source Term Characterization on the Chernobyl Pilot Site. *Rapport DEI/SARG no.04–14.*

Institute for Radioprotection and Nuclear Safety, Fontenat-aux-Roses, France.
2004. p. 135

110. Kashparov V.A., Ahamdach N., Zvarich S.I. et al. Kinetics of dissolution of Chernobyl fuel particles in soil in natural conditions. *J. Environ. Radioactiv.* 2004. № 72. pp. 335–353.
111. Kashparov V., Ahamdach N., Levchuk S. et al. Dissolution of particles of irradiated nuclear fuel in the temporary storages of radioactive waste in Chernobyl zone: sources for radionuclides migration. *Radioactive Particles in the Environment, Proceedings of the NATO ARW on Hot Particles Released from Different Nuclear Sources*, Yalta, Ukraine. 2009. pp. 139–156.
112. Kashparov V., Yoschenko V., Levchuk S. et al. Radionuclide migration in the experimental polygon of the Red Forest waste site in the Chernobyl zone – Part 1: Characterization of the waste trench, fuel particle transformation processes in soils, biogenic fluxes and effects on biota. *Applied Geochemistry*. 2012. № 27. pp. 1348–1358.
113. Ushakov S.V., Burakov B.E., Shabalev S.I., Anderson E.B. Interaction of UO_2 and Zircaloy During the Chernobyl Accident Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 1996. № 465. pp. 1313–1318.
114. Zheltonozhsky V., Mück K., Bondarkov M. Classification of hot particles from the Chernobyl accident and nuclear weapons detonations by non-destructive methods. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2001. № 57. pp. 151–166.
115. Emergency Response Guidebook 2016, U.S. Department of Transportation Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration. Washington, 2016. 136 p.
116. Zasady organizacji dekontaminacji w warunkach skażenia środkami CBRN w przypadku zdarzeń masowych podczas Światowych Dni Młodzieży. *PSPRP Polska*. Warszawa, 2016. 20p.

117. Guidelines for Mass Casualty Decontamination During a HAZMAT/ Weapon of Mass Destruction Incident, Volumes I and II. *U.S. Army Chemical, Biological, Radiological and Nuclear School*. USA. 2016. 136 p.
118. Munn R.E. Global Environment Monitoring System. *SCOPE Report*. 1973. № 3. 130 p.
119. NASA Launches Advanced Landsat Earth-Watching Satellite Into Orbit by Mike Wall URL: <http://www.space.com/19728-nasa-launches-landsat-earth-satellite-ldcm.html> (Last accessed: 05.10.2018).
120. Torres O., Bhartia P., Herman J. and other A long-term record of aerosol optical depth from TOMS observations and comparison to AERONET measurements. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2002. № 59. pp. 398-413.
121. В США предложили план применения ГЛОНАСС для экстренных служб URL: <http://www.gisa.ru/107688.html> (дата звернения: 05.10.2018).
122. Levy R., Remer L., Dubovik O. Global aerosol optical properties and application to MODIS aerosol retrieval over land. *Journal of Geophysical Research*. 2007. № 112. pp. 1321–1343.
123. Лесные пожары в США подтверждают необходимость создания недорогой системы мониторинга и обнаружения пожаров URL: <http://www.sst-us.com/u-s-wildfires-highlight-need> (Last accessed: 05.10.2018).
124. Andersson S.M., Martinsson B.G., Friberg J. and other. Composition and evolution of volcanic aerosol from eruptions of Kasatochi, Sarychev and Eyjafjallajokull in 2008–2010 based on CARIBIC observations. *Atmos. Chem. Phys.* 2013. № 13. pp. 1781–1796
125. Flannigan M.D., Vonder Haar T.H. Forest fire monitoring using NOAA satellite AVHRR. *Canadian Journal of Forest Research*. 1986. Vol.16. pp. 975 – 982.

126. Dowty P.A. Theoretical Investigation of Fire Detection with AVHRR Data. *Department of Environmental Sciences, University of Virginia, Charlottesville, Virginia, 1993. P. 89.*
127. Wooster M.J., Zhukov B., Oertel D. Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment.* 2003. Vol.86. P. 83 – 107.
128. Kaufman Y.J., Tucker C.J., Fung I. Remote Sensing of Biomass Burning in the Tropics. *Journal of Geophysical Research.* 1990. Vol. 95. №7. pp. 9927-9939.
129. Franca J.R., Brustet J.M., Fontan J. A multispectral remote sensing of biomass burning in West Africa. *Submitted to Journal of Atmospheric Chemistry.* 1993. pp. 1153 – 1155.
130. Franca J.R., Brustet J.M., Fontan J., Gregoire J.M., Malingreau J.P. A Multi-Spectral Remote Sensing of Biomass Burning in West Africa During 90/91 Dry Season. *Presented at the XVM-EGS General Assembly, May 1993, Wiesbaden, Germany, 1993. pp. 105 – 106.*
131. Jeffrey G. Miller. Fundamentals of Negotiation Guide for Environmental Professionals. Washington. 1989. 76 p.
132. Recommendations of the International Commission on Radiation Protection. *ICRP Publication 60. Pergamon Press. Oxford. 1991. 21 p.*
133. Chrzanowski A., Wilkins R. Accuracy evaluation of geodetic monitoring of deformations in large open pit mines. *12th FIG Symposium on Deformation Measurements, Baden, May 2006. 11 p.*
134. Tse C., Luk J. Design and implementation of automatic deformation monitoring system for the construction of railway tunnel: a case study in West Island line, 2011. 7 p.
135. Wilkins R., Bastin G., and Chrzanowski A. Alert: a fully automated real time monitoring system. *Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece, 2003. 8 p.*

136. Dubrov M.N., Smirnov V.M. Excitation of the Earth surface and ionosphere recorded simultaneously by laser strainmeter and GPS data processing. *XXIII General Assembly of the Int. Union of Geodesy and Geophysics (IUGG2003)*, Sapporo, Japan, 2003. p. 7.
137. Radiological Protection Policy for the Disposal of Radioactive Waste. *Publication 77. Pergamon Press*. New York. 1997. 27 p.
138. Giglio L., Descloitres J., Justice C.O., Kaufman Y.J. An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment*. 2003. Vol.87. pp. 273 – 282.
139. Justice C.O., Giglio L., Korontzi S., Owens J., Morisette J., Roy D. The MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol.83. pp. 244-262.
140. Ramseier R.O., Gray L., Campbell W.J. Scatterometer and imaging results obtained over Big Bear. *AIDJEX, 1975, Proc. Symp. On Sea Ice Proces. And Models*, 1977. Vol. 1. pp. 30 – 40.
141. Oberstadler R., Hoensh H., Huth D. Assessment of the mapping capabilities of ERS-1 SAR data for flood mapping. *A case study in Germany 2nd ERS Applications workshop*. 1995. pp. 237 – 255.
142. Prinnet V., Zhou Z.X., Songde M.A. A framewok: for flood assessment using satellite images. *TRGASS'1998*, Seattle. 1998. pp. 1123 – 1131.
143. Stancalie G., Alecu C., Catanu S. Flood hazard assessment and monitoring using geographic information and remotely sensed data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Amsterdam, 2000. Vol. XXXIII. Part B7. P. 1472 – 1478.
144. Ramsey E.W. Monitoring floodings in coastal wetlands by using radar imagery and ground based information. *Int. J. Remote Sensing*, 1995. Vol. 16. No. 13. P. 2495 – 2502.
145. Prins E.M., Menzel W.P. Trends in South American biomass burning detected with the GOES visible infrared spin scan radiometer atmospheric sounder

- from 1983 to 1991. *Journal of Geophysical Research*. 1994. Vol. 99. pp. -16735.
146. Baudoin C., Cohen E., Dotson C. and other Security for Cloud Computin. Ten Steps to Ensure Success. *Cloud Standards Customer Council*. 2017. 48 p. URL: <http://www.cloud-council.org/deliverables/CSCC-Security-for-Cloud-Computing-10-Steps-to-Ensure-Success.pdf> (Last accessed: 05.10.2018).
 147. Liebig V., Aschbacher J. Global Monitoring for Environment and Security. *ESA Earth Observation*. 2015. pp. 21-26. URL: http://www.esa.int/esapub/bulletin/bulletin123/bul123c_liebig.pdf (Last accessed: 05.10.2018).
 148. Artiola J., Papper I., Bruseau M. Environmental Monitoring and Characterization. *Elsevier Science & Technology Books*. 2004. p. 27.
 149. ANNEX to the Commission Implementing Decision on the adoption of the 2017 Copernicus Work Programme. Brussels. 2017. 140. URL: http://www.copernicus.eu/sites/default/files/library/Com_Impl_Decision_WP_2017_0.pdf (Last accessed: 05.10.2018).
 150. Bormann N., Saarinen S., Kelly G., Thepaut J. The Spatial structure of observation errors in Atmospheric Motion Vectors from geostationary satellite data. *EUMETSAT/ECMWF Fellowship Programme*, №. 12. 2002. p. 13.
 151. Butterworth P., English S., Hilton F., Whyte K. Improvements in forecasts at the Met Office through reduced weights for satellite winds. *Met-Office*, Bracknell. UK. 2002. p. 15.
 152. Stoffelen Ad. Wind Observations. *Royal Netherland Meteorological Institute*. 2016. p. 17. URL: <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2016/16618-satellite-scatterometer-winds-and-how-they-compare-nwp-model-winds.pdf> (Last accessed: 05.10.2018).
 153. Zadelhoff G.-J., Van A., Stoffelen P. Atmospheric Measurement Techniques Retrieving hurricane wind speeds using cross-polarization C-band measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2014. № 7(2). pp. 437-449.

154. Bay C., Merete B., Mouche A. and other. NORSEWInD satellite wind climatology. *DTU Wind Energy*. Denmark. 2012. p. 68. URL: http://orbit.dtu.dk/files/12300459/Norsewind_satellite_report.pdf (Last accessed: 05.10.2018).
155. Pryor S. C., Nielsen M., Barthelmie R. J., Mann J. Can satellite sampling of offshore wind speeds realistically represent wind speed distributions? Part II Quantifying uncertainties associated with sampling strategy and distribution fitting methods. *Journal of Applied Meteorology*. № 43. 2004. pp. 739-750.
156. Sweet W.V., Kopp R.E., Weaver C.P. and other. Global and Regional Sea Level Rise Scenarios for the United States. *NOAA Technical Report NOS*. Maryland. 2017. p. 75. URL: https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/techrpt83_Global_and_Regional_SLR_Scenarios_for_the_US_final.pdf (Last accessed: 05.10.2018).
157. National Oceanic and Atmospheric Administration. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 2010. p. 15.
158. Budget estimates. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 2012. p. 1151.
159. Soop M. Report on photo-sheath calculations for the satellite GEOS. *Planetary and Space Science*. V.20, I. 6. 1972. pp. 859-870.
160. Berge K., Krieger R. GEOS — The First Scientific Geostationary Satellite Sponsored by ESRO. *Astronautical Research*. 1971. pp 443-453.
161. Rokosh K. RADARSAT. *Canadian Space Agency*. 1995. p. 18. URL: <https://www.ieee.ca/millennium/radarsat/radarsat.pdf> (Last accessed: 05.10.2018).
162. Radarsat constellation mission. URL: <https://mdacorporation.com> (Last accessed: 05.10.2018).
163. Kondraiyeve K.Ya. Global security and ecology. *Gcofisica Internacional*. 1990. V. 29. № 3. pp. 123 – 128.
164. Scientific Orientation and Programming. Interdisciplinary Research Environment Program. CNRS, Paris, December 1990. 53 p.

165. Dowty P.A. Theoretical Investigation of Fire Detection with AVHRR Data. *Department of Environmental Sciences, University of Virginia, Charlottesville, Virginia, 1993. p. 89.*
166. Flannigan M.D., Vonder Haar T.H. Forest fire monitoring using NOAA satellite AVHRR. *Canadian Journal of Forest Research*. 1986. Vol.16. pp. 975 – 982.
167. Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) Satellite F8 Langley DAAC Source/Platform Document URL: https://eosweb.larc.nasa.gov/sites/default/files/project/ssmi/guide/dmsp_f8.pdf (Last accessed: 05.10.2018).
168. Defense Meteorological Satellite Program. ARCHIVED REPORT. URL: <http://www.forecastinternational.com> (Last accessed: 05.10.2018).
169. Andrews R. National polar-orbiting operational environmental satellite system (NPOESS). *Northrop Grumman Space & Mission Systems Corporation, California. 2010. URL: https://jointmission.gsfc.nasa.gov/sciencedocs/2015-06/D34651E_NPOESS_to_Field_Terminal_ICD.pdf* (Last accessed: 05.10.2018).
170. Stevens T. The national polar-orbiting operational environmental satellite system: over budget and behind schedule, options to move forward. *Committee on commerce, science, and transportation United States senate. Washington. 2011. p. 45.*
171. Mineart G.M., Grano V. The National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System – Restructured Capabilities for Operational Ocean Remote Sensing. *Conference and Exhibition held in Quebec City, Canada. 2008. p. 9. URL: http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a502487.pdf* (Last accessed: 05.10.2018).
172. 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.

173. Klein P. Coriolis Mission Operation Collaboration. GSAW. 2005. p. 12. URL: <http://csse.usc.edu/GSAW/gsaw2005/s9d/klein.pdf> (Last accessed: 05.10.2018).
174. WindSat Quick Guide by NASA. URL: https://weather.msfc.nasa.gov/sport/survey/windSat/WindSat_Reference_Guide.pdf (Last accessed: 05.10.2018).
175. Linwood W. J., Park J.D., Soisuvarn and S. other. Deep-Space Calibration of the WindSat Radiometer. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*. V. 44, N. 3. 2006. pp. 476-495. URL: https://www.nrl.navy.mil/WindSat/pdfs/TGRS06_WindSat_Jones.pdf (Last accessed: 05.10.2018).
176. Steitz D., Kenitzer A., Diller G. and other. Terra: Flagship of the Earth Observing System. NASA. 1999. p. 26. URL: https://www.nasa.gov/pdf/156293main_terra_press_kit.pdf (Last accessed: 05.10.2018).
177. Herring D. Terra Spacecraft. NASA. 2001. p. 7. URL: https://eosps0.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/mission_handbooks/Terra.pdf (Last accessed: 05.10.2018).
178. Liu J., Drummond J. R., Li Q., Gille J. C., Ziskin D. C. Satellite mapping of CO emission from forest fires in northwest America using MOPITT measurements. *Rem. Sens. Environ.* 2005. № 95. p. 502–516.
179. 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. № 40. p. 1449–1466.
180. Potter C. NASA Terra Satellite with MODIS. NASA. 2006. p. 16. URL: http://www.climatechange.ca.gov/climate_action_team/forestry/meetings/chris_potter.pdf (Last accessed: 05.10.2018).
181. Parkinson C.L. Monitoring the Earth's Water Cycle and Associated Variables from the Vantage of Space. NASA. 2002. p. 44. URL: https://www.nasa.gov/pdf/151986main_Aqua_brochure.pdf (Last accessed: 05.10.2018).
182. THE EARTH OBSERVING SYSTEM AQUA. NASA. URL: <https://aqua.nasa.gov> (Last accessed: 05.10.2018).

183. Parkinson C.L. Summarizing the First Ten Years of NASA's Aqua Mission. *IEEE journal of selected topics in applied Earth observations and remote sensing*. V. 6, №. 3. 2013. pp. 1179-1189. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6423809> (Last accessed: 05.10.2018).
184. Aumann H.H., Chahine M. T., Gautier C. and other. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: Design, science objectives, data products, and processing systems. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* v. 41, №. 2. 2003. pp. 253–264.
185. Barnes W. L., Xiong X., Salomonson V. V. Status of Terra MODIS and Aqua MODIS. *Adv. Space Res.* v. 32, № 11. 2003. pp. 2099–2106.
186. Collier C.G. United Kingdom weather radar status report. Measurement of precipitation by radar. *COST Project 72 – Proceeding of a final seminar*. Madrid, 1985. p. 156.
187. Malkomes M., Toussiant M., Mamment T. The new radar data processing software for the German Weather Radar Network. *Proc. of ERAD, Copernicus GmbH*, Delft, Netherlands, 2002. pp. 335–338.
188. Alberoni P.P. The Italian radar network: current status and future developments. *Proceedings of ERAD (2002), Copernicus GmbH*, Delft, Netherlands, 2002. pp. 339–344.
189. Yoshino F. Overview of radar networking by MOC. Japan and its data dissemination system (FRJCS). 1989. pp. 123–132.
190. Serafin R.J., Wilson J.W. Operational weather radar in the U.S.: Progress and opportunity. *COST 75*. Madrid, 1998. pp. 35–61.
191. Proceedings of International Conference "Unmanned Aircraft Systems - Towards Civil Applications". 2009. Graz, Austria. URL: http://www.fh-joanneum.at/aw/home/Studienangebot/fachbereich_information_design_technologien/lav/News_Events/lav_events/~bshr/lav-ev-/?lan=de (Last accessed: 05.10.2018).
192. Proceedings of European Commission's UAS Conference. Brussels, Belgium. 2010. URL: <http://www.eda.europa.eu/Otheractivities/UAStrafficsinsertion/UASConference> (Last accessed: 05.10.2018).

193. Paneque-Gálvez J., McCall M. K., Napoletano B. M., Wich S. A., Pin Koh L. Small Drones for Community-Based Forest Monitoring: An Assessment of Their Feasibility and Potential in Tropical Areas. *Forests*. №5. 2014. pp. 1481-1507.
194. Casbeer D.W., Kingston D.B., Beard R.W., McLain T.W. Cooperative Forest Fire Surveillance using a Team of Small Unmanned Air Vehicles. *Int. J. Syst. Sci.* № 37. 2006. pp. 351–360.
195. Kückelhaus M. Unmanned aerial vehicle in logistics. *DHL Customer Solutions & Innovation*. Troisdorf, Germany. 2014. p. 24.
196. Simon J., Essex A., Muhlhausen J., Scott J. Drones and Environmental Monitoring. *Environmental Law Institute*, Washington. 2017. p. 11.
197. Baxter R.A., Bush D.H. Use of Small Unmanned Aerial Vehicles for Air Quality and Meteorological Measurements. *National Ambient Air Monitoring Conference*. 2014. p. 19.
198. Shaw Ian G. R. Predator Empire: The Geopolitics of US Drone Warfare. *Geopolitics*, London. 2013. pp. 1-24. URL: http://www.unice.fr/crookall-cours/iup_geopoli/docs/predator-drones.pdf (Last accessed: 05.10.2018).
199. Wilson C.T.R. Condensation of water vapor in the presence of dust free air and other gases. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 1897. № 189. P. 265.
200. 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. pp. 168-172.
201. 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. № 12. pp. 2777–2794.
202. Takaharu T., Tsuruta T., Nagayama G. Molecular Dynamics Studies on the Condensation Coefficient of Water. *J. Phys. Chem. B*. 2004. № 108(5). pp. 1736–1743.

203. 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. pp. 410 – 420.
204. Greenfield S.M. Rain scavenging of radioactive particulate matter from the atmosphere. *Journal of Meteorology*. 1957. № 14. pp. 115–123.
205. Fuchs N. A. The Mechanics of Aerosols, Dover Publications, 1989. p. 421.
206. Slinn W.G.N. Precipitation scavenging. *Atmospheric Science and Power Production*, Washington, D.C. 1984. pp. 466–532.
207. Abdulla M.Sc., Al Mandoos A.Y. Analysis of the cumulonimbus clouds characteristics and the efficiency of the precipitation enhancement over the eastern area of the UAE. Beograd. 2012. p. 119.
208. Strunin V.A., Manelis G.B. Analysis of elementary model for steady-state combustion of solid propellants. *Journal of Propulsion and Power*. 1995. V.11, № 4. pp. 666–676.
209. Beckstead M.W., Derr R.L., Price C.F. A Model of Composite Solid-Propellant Combustion Based on Multiple Flames. *AIAA Journal*. 1970. № 12. pp. 2200-2207.
210. Cohen N.S., Strand L.D. An Improved Model for the Combustion of AP Composite Propellants. *AIAA Journal*. 1982. V.20, № 12. pp. 1739 - 1746.
211. Kumar M.A., Wills J.E., Kulkarni A.K., Kuo K.K. Comprehensive Model for AP-Based Composite Propellant Ignition. *AIAA Journal*. 1984. V. 22, № 4. pp. 526–534.
212. Kumar R.N. Condensed Phase Details in the Time Independent Combustion of AP/composite Propellants. *Combust. Sci. Technol.* 1973. Vol.8. pp. 133-148.
213. Merzhanov A.G., Rogachev A.S. Structural macrokinetics of SHS processes. *Pure and Applied Chemistry*. 1992. V.64, №.7. P. 941–953.

214. Glick R.L., Condon J.A. Statistical Analysis of Polidisperse Heterogeneous Propellant Combustion: Steady State. *13th JANNAF Comb. Meet.*, CPIA 281. 1976. Vol. 11. pp. 313 – 345.
215. Strahle W.C. Some statistical consideration in the burning of composite solid propellants. *AIAA Journal*. 1978. V.16, № 8. pp. 843 - 847.
216. Jackson T.L., Buckmaster J. Heterogeneous Propellant Combustion. *AIAA Journal*. 2002. Vol. 40. pp. 1122–1130.
217. Massa L., Jackson T.L., Buckmaster J., Campbell M. The Three - Dimensional Combustion of Heterogeneous Propellants. *38th JANNAF Combustion Meeting*, Destin, Florida, April 2002. pp. 121 – 136.
218. Xue L., Hashimoto A., Murakami M., Rasmussen R. and other. Implementation of a silver iodide cloud seeding parameterization in WRF. Part I: Model description and idealized 2D sensitivity tests. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2013. №52. pp. 1433–1457.
219. Xue L., Hashimoto A., Murakami M., Rasmussen R. and other. Implementation of a silver iodide cloud seeding parameterization in WRF. Part II: 3D simulations of actual seeding events and sensitivity tests. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2013. №52. pp. 1458–1476.
220. Boe B.A., Heimbach J.A. Jr. Microphysical effects of wintertime cloud seeding with silver iodide over the Rocky Mountains. Part II: Observations over the Bridger Range. *J. Appl. Meteor.* 1988. № 27. pp. 1152–1165.
221. The European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) URL: <http://www.emep.int> (Last accessed: 05.10.2018).
222. WMO Expert Committee on Weather Modification Research URL: http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/3_6_WMO_Expert_Committee_Weather_Modification_Research.pdf (Last accessed: 05.10.2018).
223. WMO DOCUMENTS ON WEATHER MODIFICATION Updated in the meeting of the Expert Team on Weather Modification Research URL:

- <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/aerosol.html> (Last accessed: 05.10.2018).
224. Weather Modification Association, WMA capabilities statement on weather modification. URL: <http://www.weathermodification.org/capabilities.php>. (Last accessed: 05.10.2018).
 225. Weather Modification Association (2009). “Weather Modification Association Capability Statement.” WMA URL: http://www.weathermodification.org/images/AGI_toxicity.pdf (Last accessed: 05.10.2018).
 226. Lahav R., Rosenfeld D. The search for the optimal size of hygroscopic seeding particles. *Agriculture Defense Coalition*, California URL: http://www.agriculturedefensecoalition.org/sites/default/files/pdfs/5R_2002_Weather_Modification_Rosenfeld_Clouds.pdf (Last accessed: 05.10.2018).
 227. Rocket anti-hail technologies, Sky Clear 6. URL: http://cloud-seeding.eu/en/anti_hail/anti_hail_rocket.htm (Last accessed: 05.10.2018).
 228. Rozenfeld D., Axisa D., Woodley W.L., Lahav R. A Quest for Effective Hygroscopic Cloud Seeding. *J. Appl. Met.* 2010. V.49., № 7. pp. 1548–1562.
 229. Jin R., Wang W., Song W., Wang Z. Tianjin Precipitation Feature and Analysis of Weather Modification Influence. *Proceedings of the 10th WMO scientific conference on weather modification*. Bali, Indonesia. 2011. pp. 127-132.
 230. IU Z., ZHEN Y., LI J., CHEN J., YAN Z. Temperature inversion characteristics of low-air atmosphere of Urumqi City. *Arid Land Geography*. № 3. 2007. pp. 423-431.
 231. Fei M., Jiancheng K., Tiantian W., Yan A., Wenhao Y. Characteristics and Influence Factors of Summer Precipitation Temporal and spatial Distribution in Shanghai during One Hundred Years. *Meteorological and Environmental Sciences* № 3. 2007. pp. 276-279.
 232. Bo Z., Shan-xiong C., Fei Y., Xi-chang X. An in-situ testing method of swelling pressure on expansive soils. *Rock and Soil Mechanics*. № 29(12). 2008. pp. 35-43.

233. Chandrashekar S., Perumal S. China's Constellation of Yaogan Satellites & the Anti-Ship Ballistic Missile. *International Strategic and Security Studies Programme*. 2016. p. 15.
234. Peri D. Yaogan Satellites and Chinese Asbm Capability. *Scholar warrior*. 2014. pp. 109-111.
235. Li S., Chen X., Chen L. and other Data Reception Analysis of the AIS on board the TianTuo-3 Satellite. *The Journal of Navigation*. V. 70, Is. 4. 2017. pp. 761-774.
236. Pu L., Zhien C., Haifeng Z. and other. Design of Light-weight Laser Retro-reflector for Nano-Satellite and Analysis of Laser Ranging. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai*. 2014. p. 10.
237. Zhang X., Xiang J., Zhang Y. Space Object Detection in Video Satellite Images Using Motion Information. *International Journal of Aerospace Engineering*. 2009. p. 9.
238. Sheng Y., Xiao Q. Progress on Flood Monitoring Using Meteorological Satellites in China, in Chinese. *Satellite Applications*, 1994, Vol. 2, No. 2. pp. 36 – 40.
239. Sheng Y., Xiao Q. Flood Monitoring Using FY-1B Satellite Data, in Chinese. *Remote Sensing Of Environment In China*, 1994. Vol. 9. No. 3. pp. 228 – 233.
240. National Nuclear Safety Admanastration. URL: <http://nnsa.mep.gov.cn> (Last accessed: 05.10.2018).
241. Jin R., Wang W., Song W., Wang Z. Tianjin Precipitation Feature and Analysis of Weather Modification Influence. *Proceedings of the 11th WMO scientific conference on weather modification*. Bali, Indonesia. 2012. pp. 127-132.
242. IU Z., ZHEN Y., LI J., CHEN J., YAN Z. Temperature inversion characteristics of low-air atmosphere of Urumqi City. *Arid Land Geography*. № 3. 2007. pp. 432-441.

243. Fei M., Jiancheng K., Tiantian W., Yan A., Wenhao Y. Characteristics and Influence Factors of Summer Precipitation Temporal and spatial Distribution in Shanghai during One Hundred Years. *Meteorological and Environmental Sciences* № 3. 2007. pp. 276-279.
244. Bo Z., Shan-xiong C., Fei Y., Xi-chang X. An in-situ testing method of swelling pressure on expansive soils. *Rock and Soil Mechanics*. № 29(12). 2008. pp. 35-43.
245. Shao-hua X., Ying-zi X., Hai-lin Y., Zheng L., Zhi-yong L., Cheng D. Model test study of constraint to deformation of expansive soil by anchor reinforced vegetation system. *Rock and Soil Mechanics*. № 38. 2017. pp. 158-166.
246. Bi-wei G., Dan-rui Z., Xiao-sheng W. Study of relationship between electrical conductivity and swelling properties of expansive soil. *Rock and Soil Mechanics*. № 37. 2016. pp. 323-328.
247. Shi L., Dong X., Lu F., Hu X. Xiangfeng Hu Aircraft Measurements of Atmospheric Aerosol over North China in Autumn. *Advanced Materials Research*. V. 726-731. 2013. pp. 1416-1421.
248. Ding Y. Summer Monsoon Rainfalls in China. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*. V. 70, Is. 1B. 1992. p. 373-396.
249. Kang Z., Gui H., Hua C. National Environmental Meteorological Services in China. *Advances in Meteorology*. 2016. p. 1-7.
250. Zhang X.Y., Sun J., Wang Y. Q. et al. Factors contributing to haze and fog in China. *Chinese Science Bulletin*. v. 58, №. 13. 2013. pp. 1178–1187.
251. Qian G., Guanghe W., Yueqin S. Numerical Simulation and Seeding Tests on the Stratiform Precipitation in North China. *Semantic Scholar*. 2011. pp. 18-28.
252. Zhou C.-H., Gong S., Zhang X.-Y. et al. Towards the improvements of simulating the chemical and optical properties of Chinese aerosols using an online coupled model—CUACE/Aero. *Tellus B*. v. 64. 2012. pp. 1-20.
253. Renhe Z. Annual report of CAMS. Chinese Academy of Meteorological Sciences. 2007. p. 83.

254. Zhang Q., Xu C.-Y., Zhang Z., Chen Y. D. Changes of atmospheric water vapor budget in the Pearl River basin and possible implications for hydrological cycle. *Theor Appl Climatol.* V. 102. 2010. pp. 185–195.
255. Wang H., He J., Wei M., and Zhang Z. Synthesis analysis of one severe convection precipitation event in jiangsu using ground-based GPS technology. *Atmosphere.* v. 6, №. 7. 2015. pp. 908–927.
256. Liang H., Cao Y., Wan X., Xu Z., Wang H., Hu H. Meteorological applications of precipitable water vapor measurements retrieved by the national GNSS network of China. *Geodesy and Geodynamics.* v. 6, №. 2. 2015. pp. 135–142.
257. Peng J., Shirong Y., Dezhong C. et al. Retrieving PW Vapor data using GPS zenith delays and global reanalysis data in China. *Remote Sensing.* v. 8, №. 389. 2016. pp. 1–21.
258. Zhao Z., Lei H. C., Wu Y. X. A new explicit microphysical scheme in MM5 and numerical simulation. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese).* № 29. 2005. pp. 609–619.
259. Zhao Z., Lei H.-C. Numerical Simulation of Seeding Extra-Area Effects of Precipitation Using a Three-Dimensional Mesoscale Model. *Atmospheric and Oceanic Science Letters.* V. 3, №. 1. 2010. pp. 19-24.
260. Guo X., Zheng G., Jin D. A numerical comparison study of cloud seeding by silver iodide and liquid carbon dioxide. *Atmos. Res.* № 79. 2006. pp. 183–226.
261. Андронов В.А., Дівізінюк М.М., Калугін В.Д., Тютюник В.В. Науково-конструкторські основи створення комплексної системи моніторингу надзвичайних ситуацій в Україні. Х.: НУЦЗУ, 2016. 319 с.
262. 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.
263. Азаренко Е.В., Гончаренко Ю.Ю., Дивизинюк М.М. Проблема управления экологической безопасностью прибрежных вод и пути ее

- решения. *Системи обробки інформації*. Харків: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. 2012. Вип. 2(100). С. 271–275.
264. 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.
265. Калач А.В., Савинова В.И., Калач Е.В. Интеллектуальная интегрированная система безопасности. *Технологии техносферной безопасности*. 2012. Вип. 5(45). URL: <http://academygps.ru/img/UNK/asit/ttb/2012-1/05-05-12.ttb.pdf> (Last accessed: 05.10.2018).
266. Крутков В.А., Полищук Ю.М. Геоинформационное обеспечение мониторинга окружающей среды и климата. *Оптика атмосферы и океана*. 2002. № 1. С. 12 – 20.
267. Лисиченко Г.В., Забулонов Ю.Л., Бабинець В.А. та інші. Про вдосконалення системи моніторингу довкілля в світлі задач сталого розвитку. *Зб. Тр. Севастоп. Нац. ун-ту ядерної енергії і промисловості*. №14. Севастополь, 2005. С. 50 – 59.
268. Родкин М.В., Мухин В.И. Фундаментальные проблемы мониторинга и прогнозирования природных и техногенных катастроф. *Научные и образовательные проблемы гражданской защиты*. Химки: ФГБОУ ВПО «АГЗ МЧС России», 2010. № 1. С. 9 – 14.
269. Зотова О., Ленева В., Синякова Н. Стратегия безопасности в чрезвычайных ситуациях. *Вопросы экономики*. 1992. № 1. С. 68 – 73.
270. Абдурахманов М.И., Баришпольц В.А., Манилов В.Л., Пирумов В.С. Основы национальной безопасности. М.: Друза, 1998. 327 с.
271. Волошин И. Комплексное решение безопасности – ключ к успеху. *F+S: Технологии безопасности и противопожарной защиты*. 2007. № 6(30). С. 68 – 71.
272. Кірючкін О.Ю., Левтєров О.А., Тютюник В.В., Шевченко Р.І. Формування інтегральної системи безпеки – запорука добробуту

- України. *F+S: технологии безопасности и противопожарной защиты*. 2008. № 6(36). С. 60 – 63.
273. Н.В., Брылев Г.Б., Ватиашвили М.Р. Диагноз шквалов по данным МРЛ. *Радиолокационная метеорология*. Л.: Гидрометеиздат. 1989. С. 64–67.
274. Брылев Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминога Г.Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 234 с.
275. Итоги работы сетевых АМПК «Метеоячейка» за 1996 – 2002 гг. по отдельным показателям работы: Информ. письмо / ИРАМ. М., 2002. 25 с.
276. Калинин Н.А. Исследование атмосферы с помощью импульсных метеорологических радиолокаторов. Перм. ун-т, Пермь, 2000. 295 с.
277. Бачарников Н.В., Брылев Г.Б., Кузнецова Л.И. и др. Автоматизированные метеорологические радиолокационные комплексы «Метеоячейка». Санкт-Петербург, Гидрометеиздат. 2007. 243 с.
278. Автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс (АМПК) «Метеор-Метеоячейка» URL: http://www.iram.ru/iram/p11_meteor_ru.php (Last accessed: 05.10.2018)
279. Komarovsky D. The automated system of the radiation control of parameters, important for safety on the atomic power station with power units VVER. *Technical section*. Dysnai. 2006. p. 11.
280. ОАО «Союзатомприбор» URL: <http://www.sapmonitoring.ru/index.htm> (Last accessed: 05.10.2018)
281. Барбашев С.В., Пристер Б.С. Автоматизированные системы контроля радиационной обстановки: принципы построения и методы реализации. *Ядерна та радіаційна безпека*, 2013. №1(57). С. 41–47.
282. Ключков В.В., Никитова А.К. Методы прогнозирования спроса на беспилотные летательные аппараты и работы по воздушному патрулированию. URL: <http://www.ecfor.ru>. (Last accessed: 05.10.2018)
283. Группа компаний ZALA AERO URL: <http://zala.aero> (Last accessed: 05.10.2018).

284. Куни Ф.М. Проблемы теоретической физики. Л.: Изд-во ЛГУ, 1988. 192 с.
285. Слезов В.В., Сагалович В.В. Диффузионный распад твердых растворов. *УФН*. 1987. Вып. 151. С. 67-104.
286. Куни Ф.М. Физические основы теории фазовых превращений вещества. *Соросовский образовательный журнал*. 1996. №1. С. 108 - 112.
287. Куни Ф.М., Щекин А.К., Русанов А.И. К теории зародышеобразования на заряженных ядрах. 2. Термодинамические параметры равновесного зародыша. *Коллоидный журн*. 1982. Т.44. №6. С.1062-1068.
288. Мейсон Б.Дж. Физика облаков. Л.: Гидрометиздат, 1962. 541 с.
289. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 463 с.
290. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. Ленинград: Гидрометеорологическое издательство, 1969. 645 с.
291. Рамм В.М. Абсорбция газов. М., Химия. 1976. 656 с.
292. Алоян А.Е. Динамика и кинетика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере. М.: ИВМ РАН, 2002. 201 с.
293. 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. pp. 9059–9223, URL: <http://www.atmos-chem-phys.net/10/9059/2010/> (Last accessed: 05.10.2018)
294. Лесная энциклопедия: В 2-х т. Гл.ред. Г.И. Воробьев М.: Сов. энциклопедия, 1985. 563 с.
295. Никандров В.Я. Искусственные воздействия на облака и туманы. Гидрометеиздат, 1959. 190 с.
296. Арцыбашев Е.С. Тушение лесных пожаров искусственно вызываемыми осадками из облаков. М.: Лесн. пром, 1973. 87 с.
297. Martinez-Castro D., Pérez-Sanchez C.A., Koloskov B.P. Randomized convective cloud seeding experiment in extended areas in cuba (exparex).

Revista Brasileira de Meteorologia. V.26, №.4. 2011. pp. 515 – 528. URL: <http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v26n4/a02v26n4.pdf> (Last accessed: 05.10.2018)

298. Мадякин Ф.П. Пиротехнические составы для активного воздействия на переохлажденные облака и туманы. Казань: Изд-во Казан. хим. технол. ин-та, 1979. 43 с.
299. Козлов В.Н., Емельянова Н.А., Коршун Н.А. Искусственное регулирование осадков. *Saarbrücken Deutschland*. Изд.: LFP LAMBERT Academic Publishing. 2013. 372 с.
300. Пат. 2563933 Российская Федерация, МПК A01G15/00 (2006.01) Способ и устройство искусственного регулирования осадков / Козлов В.Н., Коршун Н.А.; патентообладатель: Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение "Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова" (ФГБУ "ГГО"). № 2013107400 от 19.02.2013.
301. Манелис Г.Б., Струнин В.А. Механизм и элементарная теория горения смесевых твердых топлив. Черноголовка, Препринт, 1975. 21 с.
302. Мержанов А.Г., Хайкин Б.И. Теория волн горения в гомогенных средах. Черноголовка, ОИХФ АН СССР, 1992. 161 с.
303. Струнин В.А., Манелис Г.Б. Механизм горения смесевых твердых топлив. *ФГВ*. 1979. т.15, № 5. С. 24–33.
304. Куни Ф.М., Щекин А.К., Гринин А.П. Теория гетерогенной нуклеации в условиях постепенного создания метастабильного состояния пара. *УФН*. 2001. Т. 171, № 4. С. 345-385.
305. Колосков Б.П., Корнеев В.П., Щукин Г.Г. Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов. Изд. РГГМУ. Санкт Петербург. 2012. 342 с.
306. Абшаев М.Т., Вареных Н.М., Несмеянов П.А. и др. Технические средства с пиротехническими генераторами аэрозолей для АВ на облака. *Труды Второй Всероссийской конференции «Современные проблемы пиротехники»*. Сергиев Посад. 2003. С. 48–62.

307. Дьяченко Ю.Д., Кудашкин Г.Д., Сидоров А.И., Силин Н.А., Шишкин Н.С. Разработка пиротехнического самолетного аэрозольного генератора для воздействия на облака. *Труды. ГГО*. 1981. Вып. 439. С. 69–73.
308. Пат. 2073969 Российская Федерация, МПК А 01 G 15/00. Аэрозольный кассетный генератор / В.Н. Козлов, А.В. Лихачев, С.М. Окунев, В.А. Фомин; патентообладатель: В.Н. Козлов, А.В. Лихачев, С.М. Окунев, В.А. Фомин. № 93041432/23; заявл. 08.09.1993; опубл. 27.02.1997.
309. РД 52.04.628-2001. Инструкция. Порядок проведения работ по искусственному вызыванию осадков из конвективных облаков при борьбе с лесными пожарами с борта легкомоторных воздушных судов / Козлов В.Н., Клинго В.В., Лихачев А.В., Окунев С.М., Щербаков А.П. Щукин Г.Г. СПб.: Гидрометеиздат. 2002. 24 с.
310. Невзоров А.Н. Самолетный измеритель влажности облаков. *Труды ЦАО*. 1983. Вып.147. С. 19–26.
311. Козлов В.Н., Коршун Н.А. Естественный природный реагент для активных воздействий на облака. *Метеоспектр*. 2013. Вып. 3. С. 34–54.
312. ФорсункиTurbotak URL: <http://www.turbosonic.com/products/nozzles/turbotak> (дата звернення: 05.10.2018)
313. Куни Ф.М., Щекин А.К., Русанов А.И. К теории зародышеобразования на заряженных ядрах. 2. Термодинамические параметры равновесного зародыша. *Коллоидный журн*. 1982. Т.44. №.6. С.1062-1068.
314. Заярін В. Ан –26: Біографія триває. *Авіація і Час*. 2002. № 4. С. 29-31.
315. Кодекс цивільного захисту України від 2 жовтня 2012 року № 5403-VI. Голос України. 2012. листопад (№ 220 (5470)). URL: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/5403-17/page> (Last accessed: 05.10.2018)
316. Постанова Кабінету Міністрів України від 30.03.1998 року № 391 „Про затвердження Положення про державну систему моніторингу довкілля” URL: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/391-98-п> (Last accessed: 05.10.2018)

317. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1991, № 41, ст.546 URL: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/1264-12> (Last accessed: 05.10.2018)
318. Санітарні правила і норми охорони поверхневих вод від забруднення. СанПіН 4630-88. Діє від 1988-07-04. Наказ Міністерства охорони здоров'я СРСР № 4630. 37 с.
319. Гранично допустимі концентрації хімічних речовин у ґрунті (ГДК). Діє від 1980-10-30. Наказ Міністерства охорони здоров'я СРСР № 2264. 12 с.
320. Данилов-Данильян В.И. Экология, охрана природы и экологическая безопасность. М.: МНЭПУ. 1997. 367 с.
321. Постанова Кабінету Міністрів України від 17.11.2001 № 1551 «Про утворення Міжвідомчої комісії з питань моніторингу довкілля» URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1551-2001-п> (дата звернення: 05.10.2018)
322. Наказ МНС України від 06 листопада 2003 року №425 «Про затвердження Положення про моніторинг потенційно небезпечних об'єктів» URL: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/z1238-03>. (дата звернення: 05.10.2018)
323. Закон України «Про охорону атмосферного повітря» Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1992, № 50, ст.678. URL: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/2707-12> (дата звернення: 05.10.2018)
324. Сокирників Б.Н. Європейське право. Москва, 1998. 212 с.
325. Малишева Н.Р. Гармонізація екологічного законодавства в Європі. Київ, 1996. 148 с.
326. Власюк О. С., Прейгер Д. К. Проблеми міжнародного співробітництва України в галузі ядерної енергетики. *Стратегічна панорама*. 2008. № 1. С. 12 – 19.
327. Збірник нормативно-правових актів Європейського Союзу у сфері охорони навколишнього середовища. Львів, 2004. 192 с.

328. 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.
329. Сушик О.В. Порівняльно-правовий аналіз забезпечення радіаційної безпеки у країнах СНД. *Університетські наукові записки*. 2014. Вип. 1(49). С. 112 – 119.
330. Кустов М.В., Калугин В.Д. Физико-химические и физические основы процессов осаждения вулканической пыли в атмосфере земли. *Зб. Материалов VI науч.-практ. конф. «Пожарная и аварийная безопасность»*. Иваново, 2011. с. 95–99
331. Кустов М.В. Химически опасные выбросы в атмосферу при крупных пожарах. Матеріали 17 Всеукраїнської наук.-практ. конференції рятувальників «Сучасний стан цивільного захисту України: перспективи та шляхи до європейського простору» Київ: ІДУ ЦЗ, 2015. С. 222–225.
332. Zhurba M., Kashparov V., Ahamdach N., Salbu B., Yoschenko V., Levchuk S. The “hot particles” data base. *Radioactive Particles in the Environment, Environmental Security*. 2009. pp. 187–195.
333. IAEA 2015. Nuclear Data Section. Live Chart of Nuclides. Nuclear structure and decay data URL: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html> (Last accessed: 05.10.2018)
334. Кустов М.В., Соболев О.О., Тютюник В.В., Калугін В.Д. Підсистема мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій для атмосфери, яка побудована на базі методів штучного опадотворення. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Х.: НУЦЗУ, 2018. Вип. 27. С. 52–65.
335. Андреев А.О., Дукальская М.В., Головина Е.Г. Облака: происхождение, классификация, распознавание. СПб: РГГМУ, 2007. 228 с.
336. World Meteorological Organization. WMO cloud classifications. URL: http://www.weatheranswer.com/public/Clouds_WMO.pdf (Last accessed: 05.10.2018)

337. Стромберг А.Г., Семченко Д.П. Физическая химия. М.: Высшая школа, 1999. 527 с.
338. Матвеев Л. Т. Физика атмосферы. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 778 с.
339. Лапшин В.Б., Васильева М.А., Жохова Н.В. и др. Результаты испытаний электрофизического метода рассеивания тумана в большой аэрозольной камере НПО «Тайфун». *Исследовано в России*. 2009. № 719. URL: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2009/060.pdf>. (Last accessed: 05.10.2018)
340. Кустов М.В. Физико-химические основы процесса каплеобразования в атмосфере на заряженных центрах конденсации. *Технологии техносферной безопасности*: Интернет-журнал. №1(53). 2014. URL: <http://academygps.ru/img/UNK/asit/ttb/2014-1/15-01-14.ttb.pdf>. (Last accessed: 05.10.2018)
341. Кустов М.В., Калугин В.Д. Анализ основных классов химических реагентов для искусственного осадкообразования. *Материалы Всеукр. науч.-практ. конф. «Проблемы техногенно-экологічної безпеки: освіта, наука, практика»* Харьков, НУЦЗУ, 2016. С. 175-176.
342. Пат. № 2 090 548, Российская Федерация, C06D3/00, C06B31/02, A01G15/00 Пиротехнический состав для вызывания осадков / Козлов В.Н. (RU), Лихачев А.В. (RU), Окунев С.М. (RU), Фомин В.А. (RU); патентообладатель Товарищество с ограниченной ответственностью "Восток Лтд." (RU) № 94004563/23; заявл. 08.02.1994; опубл. 20.09.1997.
343. Haryanto U., Goenawan R.D., and Harsanti D. The Development of Hygroscopic Cloud Seeding Flare In Indonesia: Evaluation and Measurement of Distribution Particles. URL: http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/OBS.Haryanto_Indonesia_paper_1.pdf (Last accessed: 05.10.2018)
344. ЛОЗА. Стройпроект. София. URL: <http://cloud-seeding.info/index.php> (Last accessed: 05.10.2018)

345. Чебоксарское производственное объединение имени В. И. Чапаева URL: <http://www.chapaew.ru/Production.aspx?id=e07863f9-bd1b-413d-b888-502f926ab228&parent=sediments> (дата звернення: 05.10.2018).
346. Кустов М.В., Калугин В.Д. Исследование процесса горения пиротехнических составов для искусственного осадкообразования. Материалы VII Межд. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций» Кокчетав (Казахстан), 2016. С. 100-103.
347. Rosenband V., Gany A., Timnat Y. M. A model for low-temperature ignition of magnesium particles. *Combust. Sci. Technol.* 1995. V. 105. pp. 279 – 294.
348. Шевцов В.И. Модель парофазного окисления частиц металлов. *Физика горения и взрыва*. 1996. Т. 32, № 3. С. 95–101.
349. Ягодников Д.А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 432 с.
350. Кустов М.В. Современные способы искусственного инициирования осадков для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. Харьков. 2016. 130 с.
351. Кустов М.В., Калугин В.Д. Расчет температуры горения пиротехнических составов для искусственного осадкообразования. Матеріали Міжнародн. наук.-практ. конф. «Пожежна та техногенна безпека». Львів. ЛДУБЖД, 2016. С. 319-321.
352. Kustov M., Kalugin V. Modification of pyrotechnic composition to effectively neutralize acidic and chemically hazardous atmospheric precipitation. *Техногенно-екологічна безпека*. Х.: НУЦЗУ, 2018. № 3 С. 28–32.
353. Кустов М.В., Калугин В.Д. Модификация пиротехнических составов для эффективного осаждения из атмосферы вредных веществ. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Х.: НУЦЗУ, 2016. Вып. 24. С. 77–81.
354. Пат. 108420 України, МПК G06D 31/02 (2016.01) Піротехнічний склад для штучного опадоутворення / Калугін В.Д., Кустов М.В.;

патентовласник: Національний університет цивільного захисту України.
№ 201601505 от 18.02.2016.

355. Кондратьев К.Я. Аэрозоль и климат. Под ред. акад. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 542 с.
356. Kustov M., Kalugin V., Levterov A. The main physical and chemical properties of the Radioactive particles ejected into the atmosphere at Accidents. *Scientific Bulletin Of North University Center Of Baia Mare*, Baia Mare, Romania, 2015. Series D, Volume XXIX №. 2. pp. 101 – 113.
357. Абрамзон А.А. Поверхностно-активные вещества. Свойства и применение. Л., Химия, 1975. 248 с.
358. Schwartz S.E. Mass-transport considerations pertinent to aqueous phase reactions of gases in liquid-water clouds, in: NATO ASI Ser. *Springer-Verlag*, New York. 1986. pp. 415–471.
359. Кустов М.В., Калугин В.Д. Прогнозирование интенсивности осаждения газообразных токсичных химических веществ атмосферными осадками. *East European Science Journal*. Варшава, 2016. Вип. 2(6). С. 52–59.
360. Ферцигер Дж., Капер Г. Математическая теория процессов переноса в газах. пер. с англ. М.: «Мир». 1976. 556 с.
361. Эйнштейн А., Смолуховский М. Броуновское движение: сб. статей. Ленинград: ОНТИ. Главная редакция общетехнической литературы, 1936. 606 с.
362. Fuchs N.A., Sutugin A.G. Highly dispersed aerosols. *Ann Arbor Science Publishers*. London. 1970. 237 p.
363. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: АН СССР. 1955. 351 с.
364. Knudsen M. The kinetic theory of gases. *Ann. Phys.* 1910. Vol. 32. p. 809
365. Li Y.Q., Davidovits P., Shi Q., Jayne J.T. Mass and Thermal Accommodation Coefficients of H₂O(g) on Liquid Water as a Function of Temperature. *J. Phys. Chem. A*. 2001. № 105(47). pp. 10627–10634.

366. 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. № 93. pp. 075701 – 075723.
367. Bongartz A., Schweighoefer S., Roose C., Schurath U. The mass accommodation coefficient of ammonia on water. *Journal of Atmospheric Chemistry*. 1995. V. 20. pp. 35 – 58.
368. Viececi J., Roeselova M., Tobias D. J. Accommodation coefficients for water vapor at the air/water interface. *Chemical Physics Letters*. 2004. V. 393. pp. 249 – 255.
369. Mozurkewich M. Mass Accommodation Coefficient for HO₂ Radicals on Aqueous Particles. *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92. pp. 4163 – 4170.
370. Davidovits P., Kolb C.E., Williams L.R. and other. Mass Accommodation and Chemical Reactions at Gas–Liquid Interfaces. *Chem. Rev.* 2006. № 106 (4). pp 1323 – 1354.
371. 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. pp. 10561-10605.
372. Gilde A., Siladke N., Lawrence C. P. Molecular Dynamics Simulations of Water Transport through Butanol Films. *J. Phys. Chem. A*. 2009. № 113(30). pp. 8586–8590.
373. Compilation of Henry's Law Constants for Inorganic and Organic Species of Potential Importance in Environmental Chemistry. URL: <http://www.henryslaw.org/henry-3.0.pdf> (Last accessed: 05.10.2018)
374. Pauthenier M., Cochet R. Evolution d'une gouttelette d'eau chargée dans un nuage à température positive. *Rev. gén. élec.*, 1953. № 62. pp. 255 – 262.
375. Levin L.M. Research in physics coarse aerosols. Moscow, Academy of Sciences of the USSR, 1961. p. 266.
376. Кустов М.В., Калугин В.Д. К вопросу о возможности применения различных методов конденсации для осаждения атмосферной влаги. *Зб. научн. трудов ХУПС*. Харьков. 2012. Вып 31. С. 134-138

377. Буваков К.В., Заворин А.С., Гладков В.Е. Морфологические особенности зола от энергетического сжигания бурого угля. *Известия Томского политехнического университета*. 2006. Т. 309. № 5. С. 136–140.
378. Кустов М.В. Прогнозирование эффективности очистки атмосферы от твёрдых продуктов горения. *Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист*. Київ: ІГНС НАН України, 2015. Вип. 9. С. 78-91.
379. Morton B.R., Taylor G.T., Turner Y.S. Turbulent Gravitational Convection from Maintained and Instantaneous Sources. *Proc. Royal Soc. A*. 1956. Vol. 234, № 1196. pp. 1–23.
380. Копылов Н.П., Рыжов А.М., Хасанов И.Р. Математическое моделирование крупномасштабного экспериментального пожара. *Физика горения и взрыва*. 1985. № 5. С. 51–54.
381. Музафаров И.Ф., Утюжников С.В. Численное моделирование конвективных колонок над большим пожаром в атмосфере. *Теплофизика высоких температур*. 1995. № 4. С. 594–601.
382. Dubinin M.M. Water vapor adsorption and the microporous structures of carbonaceous adsorbents. *Carbon*. 1980. № 18. p. 355.
383. Ferry D., Suzanne J., Nitsche S., Popovicheva O.B., Shonija N.K. Water adsorption and dynamics on kerosene soot under atmospheric conditions. *J.Geophys. Res.* 2002. № 107(D23). p. 4734.
384. Popovicheva O.B., Persiantseva N.M., Lukhovitskaya E.E. et al. Aircraft engine soot as contrail nuclei. *Geophys. Res. Lett.* 2004. № 31. pp. 11104.
385. Торопов Н.А., Барзановский В.Н. и др. Диаграммы состояния силикатных систем. Л.: "Наука". 1972. 448 с.
386. Кустов М.В. Исследование динамики образования и выпадения кислотных осадков в результате крупных природных и техногенных пожаров. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. Харьков, 2016. Вип. 10(79). С. 11-17.

387. Kim Y.-H., Yiacoumi S., Lee I., McFarlane J., Tsouris C. Influence of radioactivity on surface charging and aggregation kinetics of particles in the atmosphere. *Environ. Sci. Technol.* 2014. №48. pp. 182–189.
388. Kim Y.-H., Yiacoumi S., Tsouris C. Surface charge accumulation of particles containing radionuclides in open air. *J. Environ. Radioactiv.* 2015. №143. pp. 91–99.
389. Kim Y.-H., Yiacoumi S., Nenes A., Tsouris C. Charging and coagulation of radioactive and nonradioactive particles in the atmosphere. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2015. №15. pp. 23795–23840.
390. Tsouris C., Yiacoumi S., Scott T. Kinetics of heterogeneous magnetic flocculation using a bivariate population-balance equation. *Chem. Eng. Commun.* 1995. №137. pp. 147–159.
391. Chin C.-J., Yiacoumi S., Tsouris C. Shear-induced flocculation of colloidal particles in stirred tanks. *J. Colloid Interf. Sci.* 1998. №206. pp. 532–545.
392. Meszaros E. Fundamental of atmospheric aerosol chemistry. Budapest, Ak. Kiado, 1999. p. 308.
393. Violi A., D'Anna A., D'Alessio A. Modeling of particulate formation in combustion and pyrolysis. *Chemical Engineering Science.* 1999. №54. pp. 3433–3442.
394. Artyukhov V.I., Pulver A.Yu., Peregudov A., Artyuhov I. An xenon in water inhibit ice growth? Molecular dynamics of phase transitions in water–Xe system. *J. Chem. Phys.* 2014. №141. pp. 0345–0356.
395. Kustov M.V., Kalugin V., Levterov A. Rain scavenging of a radioactive aerosol atmospheric precipitation. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, Vienne. 2016. № 3–4. Pp 73–76.
396. Кустов М.В., Калугін В.Д., Тютюник В.В. Узагальнена процедура штучного ініціювання опадів над зоною ураження від надзвичайних ситуацій. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Х.: НУЦЗУ, 2017. Вып. 26. С. 87–96.

397. Наказ МНС України, Мінагрополітики України, Мінекономіки України, Мінекології України від 27.03.2001 року № 73/82/64/122 «Про затвердження методики прогнозування наслідків розливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах та транспорті»: URL: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/z0326-01/page>. (дата звернення: 05.10.2018)
398. Методика по прогнозированию и оценке радиоактивного загрязнения воздуха, почвы, водных объектов, а также возможных доз облучения в случае радиационных аварий на АЭС для различных вариантов метеорологических условий. М.: Госкомгидромет. 1988. 100 с.
399. Кустов М.В. Дополнения к методикам прогнозирования зон химического и радиационного загрязнения территории. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків: НУЦЗУ, 2016. Вип. 23. С. 67-77.
400. Кустов М.В., Шаршанов А.Я. Модель процесса испарения атмосферных осадков в воздушной среде в зоне ландшафтных пожаров. *Проблемы пожарной безопасности*. Х.: НУЦЗУ, 2013. Вып. 33. С. 104 - 112.
401. Кустов М.В. Исследование процесса каплеобразования в атмосфере при различной влажности воздуха. Зб. праць Міжн. конф. «*Теорія та практика гасіння пожеж та ліквідації НС*». 6-7 грудня 2013 року. Черкаси. 2013. С. 213-215.
402. Scharrer L. Condensation of supersaturated vapor on ions. *Ann. d. Physik*, 1939. №35. 619 p.
403. Палей А.А., Лапшин В.Б., Жохова Н.В., Москаленко В.В. Исследование процессов конденсации паров на электрически заряженных аэрозольных частицах. *Исследовано в России* URL: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/027.pdf>. (Last accessed: 05.10.2018).
404. Кустов М.В., Калугин В.Д. Воздействие мощного электромагнитного излучения на процессы каплеобразования в атмосфере. Сб. Материалов VII науч.-практ. конф. «*Пожарная и аварийная безопасность*». Иваново. 2012. С. 118–121

405. Кустов М.В., Калугин В.Д. Интенсификация процесса каплеобразования в атмосфере путем активного воздействия на неё мощного электромагнитного излучения. *Проблемы пожарной безопасности*. Харьков: НУГЗУ. 2012. Вып. 31. С. 109–119.
406. Кустов М.В., Калугин В.Д. Электромагнитный метод интенсификации осадкообразования в атмосфере земли. Материалы III Международной научно-практической конференции «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы» (20 сентября) Воронеж, 2012. С. 149–151.
407. Кустов М.В. Исследование механизма каплеобразования при тушении пожаров атмосферными осадками. *Проблемы пожарной безопасности*. Х.: НУГЗУ, 2011. Вып. 30. С. 139–146.
408. Mallard G., Linstrom P.J. NIST Standart Reference Database. 2000. Vol. 69. p. 36.
409. Семиохин И.А., Страхов Б.В., Осипов А.И. Кинетика химических реакций. М.: Изд-во МГУ, 1995. 351 с.
410. Салем Р.Р. Теоретическая электрохимия. М.: Вузовская книга, 2012. 326 с.
411. Бойко В.И., Казарян М.А., Шаманин И.В. и др. Оценка размеров сольватной оболочки катионных аквакомплексов в растворах солей. *Известия Томского политехнического университета*. 2006. Т. 309., № 4. С. 81–85.
412. Казарян М.А., Ломов И.В., Шаманин И.В. Физические модели и приложения процесса сольватации ионов в растворах солей в полярных диэлектриках. *Альтернативная энергетика и экология*. 2007. № 11(55). С. 150–159.
413. Неволин В.К. Физические основы туннельно-зондовой нанотехнологии. *Электронная промышленность*. 1993. № 10. С. 8–15.
414. Allen M.P., Tildesley D. Computer Simulation of Liquids. Clarendon Press, Oxford, 1987. p. 112.

415. Birgin E.G., Sobral F.N.C. Minimizing the object dimensions in circle and sphere packing problems. *Computers & Operations Research*. 2008. 35. pp. 2357–2375.
416. Кустов М.В. Влияние концентрации ионов в атмосфере на интенсивность осадков над зоной выброса опасных веществ. 36. матеріалів. Всеукраїнської наук.-практ. конф. *Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів*. Харків: НУЦЗУ, 12.03.2015. С. 225–228.
417. Кустов М.В., Калугин В.Д. Влияние межчастичных взаимодействий на процесс осадкообразования в искусственно ионизированной области атмосферы. *Пожарна безпека*. Львів: ЛДУБЖД, 2013. №. 23. С. 94-101.
418. Борисов Н.Д., Гуревич А.В., Милих Г.М. Искусственная ионизированная область в атмосфере. М.: ИЗМИРАН, 1986. 348 с.
419. Гуревич А.В. Ионизованный слой в газе (в атмосфере). *Успехи физических наук*. 1980. Т. 132, № 4. С. 685 – 690.
420. Кустов М.В., Калугин В.Д. Электрофизический метод интенсификации осадков над зоной масштабного пожара. Матеріали Міжнародн. наук.-практ. конф. «Проблеми пожежної безпеки». Харків. НУЦЗУ, 2016. С. 96-98.
421. Кустов М.В., Поспелов Б.Б. Исследование процессов искусственной стимуляции осадков при частичной ионизации атмосферы электромагнитным излучением. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків: НУЦЗУ, 2013. Вип. 17. С. 72–81.
422. Кустов М.В. Влияние концентрации ионов в атмосфере Земли на процессы осадкообразования над зоной пожара. *Научные и образовательные проблемы гражданской защиты*. Химки: АГЗ МЧС России. 2014. № 2(21). С. 114–118.
423. Кустов М.В. Влияние концентрации ионов в атмосфере на интенсивность осадков над зоной выброса опасных веществ. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків: НУЦЗ України. 2014. № 20. С. 93–98.

424. Дятко Н.А., Кочетов И.В., Напортович А.П. Кинетика электронов в СВЧ-разряде. *Высокочастотный разряд в волновых полях*. 1988. С. 9 - 40.
425. Кустов М.В., Калугин В.Д. Интенсификация процесса разрушения аквааэрозолей в атмосфере при воздействии на них мощным электромагнитным излучением. *Дисперсные системы: материалы XXV науч. конф. стран СНГ (17-21 сентября)*. Одесса: ОНУ. 2012. С. 157–158.
426. Кустов М.В., Поспелов Б.Б. Параметры импульсного сверхвысокочастотного излучения для интенсификации осадкообразования в зоне чрезвычайных ситуаций. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків: НУЦЗУ, 2013. Вип. 18. С. 95–105.
427. Поспелов Б.Б., Кустов М.В. Исследование процесса нуклеации водяного пара под воздействием электромагнитного излучения. *Чрезвычайные ситуации: образование и наука*. Гомель: ГИИ МЧС Республики Беларусь, 2013. Т.8, №. 2. С. 45–50.
428. Кустов М.В. Интенсификация осадкообразования в атмосфере с помощью импульсного СВЧ излучения. Сб. материалов Межд. конф. «Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций». Минск. 2013. С. 91–93.
429. Kustov M.V., Pospelov B.B. Determination of the electromagnetic sediment initiation field during radioactive and chemical substances deposition from the atmosphere. *Екологічна безпека*. Кременчук: КНУ ім. М. Остроградського, 2015. Вип. 1(19). С. 50–53.
430. Василин Н.Я., Гуринович А.Л. Зенитные ракетные комплексы. Минск: Белорусский дом печати, 2001. 463 с.
431. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 1. М.: Мир, 1981. 285 с.
432. Кустов М.В., Поспелов Б.Б. Инициирование атмосферных осадков многопозиционными системами излучателей. *Зб. научн. трудов ХУПС*. Харьков. 2014. Вып 40. С. 184–189.
433. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высш. шк., 1988. 432 с.

434. Кустов М.В., Калугин В.Д., Коврегин В.В. Влияние климатических факторов на процессы развития и прекращения крупных пожаров на открытой местности. *Проблемы пожарной безопасности*. Х.: НУГЗУ, 2011. Вып. 29. С. 127–135.
435. Stratton R.D. Guidance on Spatial Wildland Fire Analysis: Models, Tools, and Techniques. General Technical Report RMRS-GTR-183, 2006. 20 p.
436. Тарасенко А.А., Абрамов Ю.А. Модель динамики контура природного пожара под действием совместного влияния ландшафтно-метеорологических факторов. *Проблемы пожарной безопасности*. Харьков: УГЗУ, 2008. Вып. 24. С. 194–200.
437. Meteo.Infospace. URL: <http://meteo.infospace.ru>. (Last accessed: 05.10.2018)
438. Ключ П.П., Палюх В.Г., Пустовой А.С. та ін. Пожежна тактика. Х.: Основа, 1998. 592 с.
439. Кустов М.В., Калугин В.Д. Влияние влажности на процессы развития и прекращения крупных пожаров на открытой местности. X Міжнародна наук.-практ. конф. «Пожежна безпека-2011» Харків: НУЦЗУ, 2011. с. 262–263.
440. Кустов М.В., Калугин В.Д. Влияние климатических факторов на процессы развития и прекращения крупных пожаров на открытой местности. 3б. Материалов II Междунар. науч.-практ. конф. «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы». Воронеж, 2011. с. 208–209.
441. Нестеров В.Г. Горимость леса и методы её определения. М.: Гослесбумиздат, 1949. 76 с.
442. Моргунов В.К. Основы метеорологии, климатологии. Метеорологические приборы и методы наблюдений. Феникс. 2005. 336с.
443. Фукс Н.А. Испарение и рост капель в газообразной среде. *Итоги науки и техники, Сер. Физико-математических наук*, Т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 128с.
444. Михалев М.А. Инженерная гидрология. П-б., 2002. 124 с.

445. Кустов М.В., Калугин В.Д. Использование водосодержащих образований в атмосфере для тушения крупных пожаров на открытой местности. *Зб. научн. трудов ХУПС*. Харьков. 2011. Вып 2(28). С. 176–180
446. Шаршанов А.Я., Кустов М.В. Моделирование атмосферных осадков для определения их противопожарного потенциала. *Проблемы пожарной безопасности*. Х.: НУЦЗУ, 2013. Вып. 34. С. 186–193.
447. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике (2-е дополненное и переработанное издание). Москва: Издательство «Наука», 1967. 492 с.
448. Кустов М.В., Андронов В.А., Калугин В.Д. Установка для исследования горючих и огнезащитных свойств веществ и материалов при различных условиях. *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация*. Минск: НИИ ПБ и ЧС МЧС Беларусь. 2013. №. 2(34). С. 47-51.;
449. Пат. 104709 України, МПК А62С 99/00 (2014.01) Стенд для дослідження процесів горіння / Андрона В.А., Тарахно О.В., Калугін В.Д., Кустов М.В., Жернокльов К.В.; патентовласник: Національний університет цивільного захисту України. № 201306647 от 28.05.2013.
450. Павлюкевич Н.В. Введение в теорию тепло- и массопереноса в пористых средах. Мн.: ИТМО НАНБ, 2003 214с.
451. Кустов М.В. Влияние скорости ветра, влажности воздуха и горючего материала на скорость распространения ландшафтных пожаров. *Проблемы пожарной безопасности*. Х.: НУГЗУ, 2012. Вып. 32. С. 133-141.
452. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б. и др. Математическая теория горения. М.: Наука, 1980. 478 с.
453. Вулис Л.А. Тепловой режим горения. М.-Л.: Энергия, 1954. 348 с.
454. Блинов В.И., Худяков Г.Н. Диффузионное горение жидкостей. М.: изд. АН СССР, 1961. 423 с.
455. Абдурагимов И.М., Говоров В.Ю., Макаров В.Е. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. М.: МВД СССР, 1980. 254 с.

456. Тарахно О.В., Шаршанов А.Я. Фізико-хімічні основи використання води в пожежній справі. Харків. 2004. 252 с.
457. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Моделирование зажигания слоя лесного горючего материала сфокусированным потоком солнечного излучения с учётом пористости ЛГМ и проникновения излучения в слой. *Химическая физика и мезоскопия*. 2011. Т. 13, № 3. С. 326–330.
458. Кустов М.В. Определение необходимой интенсивности осадков для тушения ландшафтного пожара. *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. Москва: Академия ГПС МЧС России. 2014. №. 2. С. 10–15.
459. Кустов М.В. Тушение ландшафтных пожаров под действием атмосферных осадков. Матеріали ХІ Міжн. наук.-практ. конф. «Пожежна безпека – 2013», Київ. 2013. С. 407–411.
460. Розробка комп'ютерної системи прогнозування інтенсивності опадів на поверхні Землі в залежності від фізико-хімічних властивостей атмосфери: звіт про НДР (2016 – 2017) [Рукопис] / кер. роботи: М.В. Кустов; відп. викон. В.Д. Калугін; викон. А.Я. Шаршанов, О.А. Левтеров, В.В. Тютюник Х.: Національний університет цивільного захисту України, 2017. 77 с.
461. Пат. № 104957, Україна, B01D53/18 Камера для дослідження процесів масообміну / Калугін В.Д., Кустов М.В. (UA); патентовласник НУЦЗУ (UA) № 201508952; заявл. 16.09.2015; опубл. 25.02.2016.
462. Кустов М.В., Рябцев В.Н. Экспериментальная проверка моделей осаждения газообразных опасных химических веществ осадками. *Вестник УГЗБ*. Минск, 2017. Т. 1, № 1. С. 80-86.
463. Box G. E. P., Wilson K. B. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. “*Journal of the Royal Statistical Society*”. Series B, 1951. № 1, pp. 1–45.
464. Кустов М.В. Экспериментальное исследование интенсивности осаждения аэрозольных продуктов горения атмосферными осадками.

Екологічна безпека. Кременчуг: КНУ ім. М. Остроградського, 2015. Вип. 2(20). С. 84–90.

465. Кустов М.В. Экспериментальное исследование процесса осаждения дымов атмосферными осадками. Материалы VII Межд. науч.-практ. конф. *«Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация»*. Минск (РБ), 2016. С. 213-215.
466. Пат. 104561 України, МПК G05D 22/00 (2014.01) Кліматична камера / Калугін В.Д., Кустов М.В., Поспелов Б.Б.; патентовласник: Національний університет цивільного захисту України. № 201304372 от 10.02.2014.
467. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования: Введ. 01.07.92. М.: Изд-во стандартиформ, 2006. 68 с.
468. ГОСТ 16483.7-71. Древесина. Методы определения влажности: Введ. 01.01.73. М.: Изд-во стандартов, 1974. 8 с.
469. Кустов М.В., Несторчук И.В. Исследование скорости распространения пламени по горючим материалам ландшафтных пожаров. Зб. матер. Всеукр. наук.-практ. конф. *«Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення боєздатності оперативно-рятувальних підрозділів»*. Харків. НУЦЗУ, 2013. С. 66–67.
470. Кустов М.В., Несторчук И.В. Исследование скорости распространения пламени по материалам растительного происхождения. Зб. праць Всеукр. конф *«Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів»*. Харків. 2014. С. 91-92.
471. Дослідження гідравлічних струменів при створенні систем управління екологічною безпекою об'єктів підвищеного ризику. Звіт з НДР (2016-2017) [Рукопис] / кер. С.О. Вамболь; відп. викон. І.В. Міщенко; викон. О.М. Кондратенко, М.В. Кустов, Н.В. Дейнеко. № ДР 0116U002002. Х.: НУЦЗУ, 2017. 55 с.
472. Архів даних погоди Українського гідрометео центру МНС України. URL: http://meteo.gov.ua/ua/past_ukr. (дата звернення: 05.10.2018)

473. Іванніков В.П., Ключ П.П. Довідник керівника гасіння пожежі. М.: Стройиздат, 1987. 126 с.
474. Кустов М.В., Калугин В.Д. Установка для моделирования процессов конденсации в атмосферных аквааэрозолях. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Х.: НУЦЗУ, 2012. Вып. 16. С. 54–57.
475. Калугін В.Д., Тютюник В.В., Чорногор Л.Ф., Шевченко Р.І. Розробка науково-технічних основ для створення системи моніторингу, попередження та ліквідації надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру та забезпечення екологічної безпеки. *Системи обробки інформації*. Харків: ХУПС імені Івана Кожедуба, 2013. Вип. 9(116). С. 204 – 216.
476. Кустов М.В., Калугин В.Д. Система обеспечения экологической безопасности нижней атмосферы с использованием методов искусственного осадкообразования. *Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист*. Київ: ІГНС НАН України, 2016. Вип. 11. С. 37-43.
477. Тютюник В.В., Калугин В.Д., Тютюник Ю.В., Кустов М.В. Комплексна система моніторингу надзвичайних ситуацій для збереження та раціонального використання природних та енергетичних ресурсів України. Зб. доповідей. III Міжнародн. наук.-практ. конф. «Сучасні ресурсозберігаючі технології. Проблеми і перспективи». Одеса. ОНУ ім. І.І. Мечнікова, 2015. С. 268–276.
478. Тютюник В.В., Калугін В.Д., Кустов М.В. та ін. Науково-технічні напрямки розвитку підсистем комплексної системи моніторингу, попередження, ліквідації надзвичайних ситуацій та мінімізації їх наслідків в Україні. Матеріали IV Міжнар. Науково-практ. Конф. «Безпека життєдіяльності на транспорті і виробництві – освіта, наука, практика» Херсон, ХДМА. 2017. С. 83-89.
479. Тютюник В.В., Калугін В.Д., Кустов М.В. та ін. Наукові основи створення в Україні системи моніторингу, попередження, ліквідації надзвичайних ситуацій та особливості розвитку її підсистем. Матеріали

- 19 Всеукраїнської наук.-практ. конф. «Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку» Київ: ІДУ ЦЗ, 2017. С. 431-434.
480. Тютюник В.В., Калугін В.Д., Кустов М.В. та ін. Науково-технічні напрямки розвитку підсистеми моніторингу, попередження надзвичайних ситуацій та мінімізації їх наслідків єдиної державної системи цивільного захисту. Матеріали наук.-практ. конференції «Стратегія реформування організації цивільного захисту» Київ: УкрНДІЦЗ, 2018. С. 237-239.
481. Дослідження умов раннього моніторингу та попередження надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру: звіт про НДР (2012-2014) [Рукопис] / кер. роботи: В.В. Тютюник; відп. викон. В.Д. Калугін; викон. Б.Б. Поспєлов, Р.І. Шевченко, М.В. Кустов. Х.: Національний університет цивільного захисту України, 2014. 266 с.
482. Кустов М.В., Калугін В.Д., Тютюник В.В., Ольховиков С.В. Функционирование системы обеспечения экологической безопасности атмосферы при возникновении чрезвычайных ситуаций. *Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист*. Київ: ІГНС НАН України, 2017. Вип. 12. С. 24-37.
483. Постанова Кабінету Міністрів України від 15.02.2002 року № 175 „Про затвердження Методики оцінки збитків від наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру"
484. Звіт за результатами громадської оцінки впливів на довкілля, внаслідок пожежі на території нафтобази ТОВ «Побутрембудматеріали» у смт. Глеваха Васильківського району Київської області URL: http://www.menr.gov.ua/images/blog/news/06_10_2015/Zvit_NB_Basylkiv.pdf (дата звернення: 05.10.2018)

ДОДАТОК А

Список публікацій за темою дисертації

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Монографія:

1. **Кустов М.В.** Современные способы искусственного инициирования осадков для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. Харьков, СтилЬИздат, 2016. 130 с.

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

2. Поспелов Б.Б., **Кустов М.В.** Иницирование атмосферных осадков многопозиционными системами излучателей. *Зб. наук. праць Харківського університету Повітряних Сил*. Харків, 2014. Вип. 3(40). С. 184–189. (Включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

Здобувачу особисто належить постановка задачі, аналіз останніх досліджень і публікацій, вибір конфігурації розміщення випромінювачів.

3. **Kustov M.V., Pospelov B.B.** Determination of the electromagnetic sediment initiation field during radioactive and chemical substances deposition from the atmosphere. *Екологічна безпека*. Кременчук, 2015. Вип. 1/2015 (19). С. 50–53. (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Open Academic Journals Index, Ulrich's Periodicals Directory).

Здобувачу особисто належить постановка задачі, аналіз технічних засобів іонізації повітря, розрахунок зон електромагнітного впливу на хмари.

4. **Кустов М.В.** Экспериментальное исследование интенсивности осаждения аэрозольных продуктов горения атмосферными осадками. *Екологічна безпека*. Кременчук, 2015. Вип. 2/2015 (20). С. 84–90. (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Open Academic Journals Index, Ulrich's Periodicals Directory).

5. **Кустов М.В.** Исследование динамики образования и выпадения кислотных осадков в результате крупных природных и техногенных пожаров. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. Харьков, 2016. Вип. 1/10 (79). С. 11–17. (Включено до міжнародних наукометричних баз Scopus, Index Copernicus, Open Academic Journals Index, Ulrich's Periodicals Directory, American Chemical Society, Bielefeld Academic Search Engine, CrossRef).

6. **Кустов М.В.**, Калугін В.Д., Тютюник В.В. Узагальнена процедура штучного ініціювання опадів над зоною ураження від надзвичайних ситуацій. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2017. Вип. 26. С. 87–96. (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory).

Здобувачу особисто належить ідея статті, розробка деяких елементів процедури прийняття управлінського рішення та його виконання.

7. **Kustov M.**, Kalugin V. Modification of pyrotechnic composition to effectively neutralize acidic and chemically hazardous atmospheric precipitation. *Техногенно-екологічна безпека: наук.-техн. журн.* Харків, 2018. № 3 (1/2018). С. 28–32. (Включено до міжнародних наукометричних баз Root Indexing, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich Web, Cite Factor).

Здобувачу особисто належить проведення експериментів, інтерпретація результатів.

8. **Кустов М.В.**, Соболев О.М., Тютюник В.В., Калугін В.Д. Підсистема мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій для атмосфери, яка побудована на базі методів штучного опадоутворення. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2018. Вип. 27. С. 52–65. (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory).

Здобувачу особисто належить розробка методики мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій, проведення розрахунків розмірів зон ураження.

Статті у наукових фахових виданнях України:

9. **Кустов М.В.** Калугин В.Д. Использование водосодержащих образований в атмосфере для тушения крупных пожаров на открытой местности. *Зб. наук. праць Харківського університету Повітряних Сил*. Харків, 2011. Вип. 2(28). С. 176–179.

Здобувачу особисто належить узагальнення літературних джерел, аналіз особливостей використання опадів для гасіння пожеж.

10. **Кустов М.В.**, Калугин В.Д., Коврегін В.В. Влияние климатических факторов на процессы развития и прекращения крупных пожаров на открытой местности. *Проблемы пожарной безопасности*. Харьков, 2011. Вып. 29. С. 102–109.

Здобувачу особисто належить проведення експериментальних досліджень та обробка їх результатів.

11. **Кустов М.В.** Исследование механизмов каплеобразования при тушении пожаров атмосферными осадками. *Проблемы пожарной безопасности*. Харьков, 2011. Вып. 30. С. 153–159.

12. **Кустов М.В.**, Калугин В.Д. Интенсификация процесса каплеобразования в атмосфере путем активного воздействия на неё мощного электромагнитного излучения. *Проблемы пожарной безопасности*. Харьков, 2012. Вып. 31. С. 109–119.

Здобувачу особисто належить узагальнення літературних джерел, проведення теоретичних розрахунків процесу конденсації пари води на заряджених центрах краплеутворення.

13. **Кустов М.В.**, Калугин В.Д. К вопросу о возможности применения различных методов конденсации для осаждения атмосферной влаги. *Зб. наук. праць Харківського університету Повітряних Сил*. Харків, 2012. Вип. 2(31). С. 134–137.

Здобувачу особисто належить узагальнення літературних джерел, розрахунків критичного ступеню пересичення пари.

14. **Кустов М.В.** Влияние скорости ветра, влажности воздуха и горючего материала на скорость распространения ландшафтных пожаров. *Проблемы пожарной безопасности*. Харьков, 2012. Вып. 32. С. 133-141.

15. **Кустов М.В.,** Калугин В.Д. Установка для моделирования процессов конденсации в атмосферных аквааэрозолях. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2012. Вип. 16. С. 54–58.

Здобувачу особисто належить ідея статті, розробка схеми установки та методики проведення досліджень.

16. **Кустов М.В.,** Шаршанов А.Я. Модель процесса испарения атмосферных осадков в воздушной среде в зоне ландшафтных пожаров. *Проблемы пожарной безопасности*. Харьков, 2013. Вып. 33. С. 104–112.

Здобувачу особисто належить ідея статті, формулювання завдання, написання огляду.

17. Шаршанов А.Я., **Кустов М.В.** Моделирование атмосферных осадков для определения их противопожарного потенциала. *Проблемы пожарной безопасности*. Харьков, 2013. Вып. 34. С. 186–193.

Здобувачу особисто належить формулювання завдання, участь у інтерпретації результатів, написання огляду.

18. **Кустов М.В.,** Калугин В.Д. Влияние межчастичных взаимодействий на процесс осадкообразования в искусственно ионизированной области атмосферы. *Пожежна безпека*. Львів, 2013. №. 23. С. 93–101.

Здобувачу особисто належить проведення молекулярно-динамічного моделювання.

19. **Кустов М.В.,** Поспелов Б.Б. Исследование процессов искусственной стимуляции осадков при частичной ионизации атмосферы электромагнитным излучением. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2013. Вип. 17. С. 72–81.

Здобувачу особисто належить ідея статті, проведення експериментів, інтерпретація результатів.

20. **Кустов М.В.,** Поспелов Б.Б. Параметры импульсного сверхвысокочастотного излучения для интенсификации осадкообразования в зоне чрезвычайных ситуаций. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2013. Вип. 18. С. 95–105.

Здобувачу особисто належить формулювання завдання, написання огляду.

21. **Кустов М.В.** Влияние концентрации ионов в атмосфере на интенсивность осадков над зоной выброса опасных веществ. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2014. Вип. 20. С. 93–98.

22. **Кустов М.В.** Прогнозирование эффективности очистки атмосферы от твёрдых продуктов горения. *Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист*. Київ, 2015. Вип. 9. С. 78–91.

23. **Кустов М.В.** Дополнения к методикам прогнозирования зон химического и радиационного загрязнения территории. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2016. Вип. 23. С. 67–77.

24. **Кустов М.В.,** Калугин В.Д. Модификация пиротехнических составов для эффективного осаждения из атмосферы вредных веществ. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2016. Вип. 24. С. 77–81.

Здобувачу особисто належить розробка методики експерименту та його проведення.

25. **Кустов М.В.,** Калугин В.Д. Система обеспечения экологической безопасности нижней атмосферы с использованием методов искусственного осадкообразования. *Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист*. Київ, 2016. Вип. 11. С. 37–43.

Здобувачу особисто належить розробка структури системи та опис її складових.

26. **Кустов М.В.,** Калугин В.Д., Тютюник В.В., Ольховиков С.В. Функционирование системы обеспечения экологической безопасности

атмосферы при возникновении чрезвычайных ситуаций. *Техногенно-экологічна безпека та цивільний захист*. Київ: ІГНС НАН України, 2017. Вип. 12. С. 24-37.

Здобувачу особисто належить розробка методики розрахунку ризиків при використанні систем ліквідації наслідків НС.

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

27. Андронов В.А., Калугин В.Д., **Кустов М.В.** Установка для исследования горючих и огнезащитных свойств веществ и материалов при различных условиях. *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация*. Минск, 2013. № 2(34). С. 47–51. (Стаття у закордонному науковому виданні за фахом).

Здобувачу особисто належить ідея статті, розробка схеми установки та опис методики проведення досліджень.

28. Поспелов Б.Б., **Кустов М.В.** Исследование процесса нуклеации водяного пара под воздействием электромагнитного излучения. *Чрезвычайные ситуации: образование и наука*. Гомель, 2013. Т. 8, №. 2. С. 45–50. (Стаття у закордонному науковому виданні за фахом).

Здобувачу особисто належить розробка методики експериментів, проведення експериментів, інтерпретація результатів.

29. **Кустов М.В.** Физико-химические основы процесса каплеобразования в атмосфере на заряженных центрах конденсации. *Технологии техносферной безопасности: научный интернет-журнал*. Москва, 2014. № 1 (53). С. 1–9. URL: <http://academygps.ru/img/UNK/as it/ttb/2014-1/15-01-14.ttb.pdf>. (Стаття у закордонному науковому виданні за фахом – електронне видання).

30. **Кустов М.В.** Определение необходимой интенсивности осадков для тушения ландшафтного пожара. *Пожары и чрезвычайные ситуации:*

предотвращение, ликвидация. Москва, 2014. №. 1. С. 12–18. (Стаття у закордонному науковому виданні за фахом).

31. **Кустов М.В.** Влияние концентрации ионов в атмосфере Земли на процессы осадкообразования над зоной пожара. *Научные и образовательные проблемы гражданской защиты.* Химки, 2014. № 2(21). С. 114–118. (Стаття у закордонному науковому виданні за фахом).

32. **Kustov M., Kalugin V., Levterov A.** The main physical and chemical properties of the radioactive particles ejected into the atmosphere at accidents. *Scientific Bulletin Of North University Center Of Baia Mare.* Baia Mare, 2015. Series D, Volume XXIX, №. 2. Pp. 101–113. (Стаття у закордонному науковому виданні за фахом).

Здобувачу особисто належить аналіз та систематизація властивостей радіоактивних часток, встановлення особливостей їх осадження із атмосфери.

33. **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. Pp. 73–76. (Стаття у закордонному науковому виданні за фахом).

Здобувачу особисто належить формулювання завдання, моделювання процесу коагуляції.

34. **Кустов М.В., Рябцев В.Н.** Экспериментальная проверка моделей осаждения газообразных опасных химических веществ осадками. *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси.* Минск, 2017. Т. 1, № 1. С. 80–86. (Стаття у закордонному науковому виданні за фахом).

Здобувачу особисто належить розробка методики експерименту та його проведення, інтерпретація результатів.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

35. **Кустов М.В., Калугин В.Д.** Влияние климатических факторов на процессы развития и прекращения крупных пожаров на открытой местности.

Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. Сб. материалов II Междунар. науч.-практ. конф. 22 сентября 2011. Воронеж. 2011. С. 208–209. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить збір метеорологічних даних регіону, обробка результатів класифікації по рівню впливу.

36. **Кустов М.В.,** Калугин В.Д. Влияние влажности на процессы развития и прекращения крупных пожаров на открытой местности. *Пожежна безпека-2011.* X Міжнародна наук.-практ. конф. 12 травня 2011. Харків: НУЦЗУ. 2011. С. 262–263. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить проведення експериментальних досліджень та інтерпретація їх результатів.

37. **Кустов М.В.,** Калугин В.Д. Воздействие мощного электромагнитного излучения на процессы каплеобразования в атмосфере. *Пожарная и аварийная безопасность.* Сб. материалов VII науч.-практ. конф. 18 ноября 2012. Иваново. 2012. С. 118–121. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить моделювання впливу електромагнітного поля на процеси конденсації пари.

38. **Кустов М.В.,** Калугин В.Д. Электромагнитный метод интенсификации осадкообразования в атмосфере земли. *Пожарная безопасность: проблемы и перспективы.* Материалы III Международной научно-практической конференции. 20 сентября 2012. Воронеж. 2012. С. 149–151. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить ідея використання існуючих технічних засобів для штучної іонізації повітря.

39. **Кустов М.В.,** Калугин В.Д. Интенсификация процесса разрушения аквааэрозолей в атмосфере при воздействии на них мощным электромагнитным излучением. *Дисперсные системы.* Материалы XXV науч. конф. стран СНГ. 17-21 сентября 2012. Одесса: ОНУ. 2012. С. 157–158. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить розрахунок потужності електромагнітного поля для штучної інтенсифікації опадів.

40. **Кустов М.В.,** Несторчук И.В. Исследование скорости распространения пламени по горючим материалам ландшафтных пожаров. *Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення боєздатності оперативно-рятувальних підрозділів.* Зб. матер. Всеукр. наук.-практ. конф. 10 октября 2013. Харків. НУЦЗУ. 2013. С. 66–67. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить проведення експериментальних досліджень та інтерпретація їх результатів.

41. **Кустов М.В.** Интенсификация осадкообразования в атмосфере с помощью импульсного СВЧ излучения. *Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций.* Сб. материалов Межд. конф. 28 ноября 2013. Минск. 2013. С. 91–93. (Форма участі – очна).

42. **Кустов М.В.** Исследование процесса каплеобразования в атмосфере при различной влажности воздуха. *Теорія та практика гасіння пожеж та ліквідації НС.* Зб. праць Міжн. конф. 6-7 грудня 2013 року. Черкаси. 2013. С. 213-215. (Форма участі – очна).

43. **Кустов М.В.** Тушение ландшафтных пожаров под действием атмосферных осадков. *Пожежна безпека – 2013.* Матеріали XI Міжн. наук.-практ. конф. 25-26 вересня 2013. Київ. 2013. С. 407–411. (Форма участі – очна).

44. **Кустов М.В.,** Несторчук И.В. Исследование скорости распространения пламени по материалам растительного происхождения. *Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів.* Зб. праць Всеукр. конф. 12 березня 2014. Харків. 2014. С. 91-92. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить проведення експериментальних досліджень та інтерпретація їх результатів.

45. **Кустов М.В.** Влияние концентрации ионов в атмосфере на интенсивность осадков над зоной выброса опасных веществ. *Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів*. Зб. матеріалів. Всеукраїнської наук.-практ. конф. 10 березня 2014. Харків: НУЦЗУ. 2014. С. 225–228. (Форма участі – очна).

46. **Кустов М.В.** Химически опасные выбросы в атмосферу при крупных пожарах. *Сучасний стан цивільного захисту України: перспективи та шляхи до Європейського простору*. Матеріали 17 Всеукраїнської наук.-практ. конференції рятувальників. 10 жовтня 2015. Київ: ІДУ ЦЗ, 2015. С. 222–225. (Форма участі – заочна).

47. Тютюник В.В., Калугин В.Д., Тютюник Ю.В., **Кустов М.В.** Комплексна система моніторингу надзвичайних ситуацій для збереження та раціонального використання природних та енергетичних ресурсів України. *Сучасні ресурсозберігаючі технології. Проблеми і перспективи* Зб. доповідей. III Міжнародн. наук.-практ. конф. 9-13 листопада 2015. Одеса. ОНУ ім. І.І. Мечнікова, 2015. С. 268–276. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить розробка підсистеми ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру.

48. **Кустов М.В.** Экспериментальное исследование процесса осаждения дымов атмосферными осадками. *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация*. Материалы VII Межд. науч.-практ. конф. 1 ноября 2016. Минск (РБ). 2016. С. 213-215. (Форма участі – заочна).

49. **Кустов М.В.**, Калугин В.Д. Анализ основных классов химических реагентов для искусственного осадкообразования. *Проблеми техногенно-екологічної безпеки: освіта, наука, практика*. Матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. 24 листопада 2016. Харків. НУЦЗУ. 2016. С. 175-176. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить систематизація та класифікація основних небезпечних речовин, що викидаються в атмосферу при надзвичайних ситуаціях.

50. **Кустов М.В.**, Калугин В.Д. Исследование процесса горения пиротехнических составов для искусственного осадкообразования. *Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций*. Материалы VII Межд. науч.-практ. конф. 24 октября 2016. Кокчетав (Казахстан). 2016. С. 100-103. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить проведення експериментальних досліджень та інтерпретація їх результатів.

51. **Кустов М.В.**, Калугин В.Д. Расчет температуры горения пиротехнических составов для искусственного осадкообразования. *Пожарна та техногенна безпека*. Матеріали Міжнародн. наук.-практ. конф. 21 жовтня 2016. Львів. ЛДУБЖД. 2016. С. 319-321. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить розрахунок температури горіння піротехнічних складів.

52. **Кустов М.В.**, Калугин В.Д. Электрофизический метод интенсификации осадков над зоной масштабного пожара. *Проблеми пожежної безпеки*. Матеріали Міжнародн. наук.-практ. конф. 9 листопада 2016. Харків. НУЦЗУ. 2016. С. 96-98. (Форма участі – очна).

Здобувачу особисто належить ідея статті, постановка задач та аналіз результатів.

53. Тютюник В.В., Калугін В.Д., **Кустов М.В.** Науково-технічні напрямки розвитку підсистем комплексної системи моніторингу, попередження, ліквідації надзвичайних ситуацій та мінімізації їх наслідків в Україні. *Безпека життєдіяльності на транспорті і виробництві – освіта, наука, практика*. Матеріали IV Міжнар. Науково-практ. Конф. 20 травня 2017. Херсон, ХДМА. 2017. С. 83-89. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить розробка підсистеми ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

54. Тютюнник В.В., Калугін В.Д., **Кустов М.В.** Наукові основи створення в Україні системи моніторингу, попередження, ліквідації надзвичайних ситуацій та особливості розвитку її підсистем. *Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку*. Матеріали 19 Всеукраїнської наук.-практ. конференції 26 вересня 2017. Київ: ІДУ ЦЗ. 2017. С. 431-434. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить розробка підсистеми ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

55. Тютюнник В.В., Калугін В.Д., **Кустов М.В.** Науково-технічні напрямки розвитку підсистеми моніторингу, попередження надзвичайних ситуацій та мінімізації їх наслідків єдиної державної системи цивільного захисту. *Стратегія реформування організації цивільного захисту*. Матеріали наук.-практ. конференції 12 червня 2018. Київ: УкрНДІЦЗ. 2018. С. 237-239. (Форма участі – заочна).

Здобувачу особисто належить розробка підсистеми ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

56. **Кустов М.В.**, Калугін В.Д. Прогнозирование интенсивности осаждения газообразных токсичных химических веществ атмосферными осадками. *East European Scientific Journal*. Варшава, 2016. Вип. 2(6). С. 52–59.

Здобувачу особисто належить моделювання процесу сорбції небезпечних газів.

57. Пат. 104709 України, МПК А62С 99/00 (2014.01) Стенд для дослідження процесів горіння / Андронов В.А., Тарахно О.В., Калугін В.Д., **Кустов М.В.**, Жернокльов К.В.; патентовласник: Національний університет цивільного захисту України. – № 201306647 от 28.05.2013.

58. Пат. 104561 України, МПК G05D 22/00 (2014.01) Кліматична камера / Калугін В.Д., **Кустов М.В.**, Поспелов Б.Б.; патентовласник: НУЦЗ України. – № 201304372 от 10.02.2014.

59. Пат. № 104957, Україна, B01D53/18 Камера для дослідження процесів масообміну / Калугін В.Д., **Кустов М.В.** (UA); патентовласник НУЦЗУ (UA) – № 201508952; заявл. 16.09.2015; опубл. 25.02.2016.

60. Пат. № 108420 України, МПК G06D 31/02 (2016.01) Піротехнічний склад для штучного опадоутворення / Калугін В.Д., **Кустов М.В.**; патентовласник: Національний університет цивільного захисту України. – № 201601505 от 18.02.2016.

ДОДАТОК Б

Лістинги програми «Прогнозування атмосферних опадів»

```

function Present_Go_eq_sky_vap_07
% solution of eq_sky_vap_07 испарение падающей капли воды с примесью квазиводы
% с изменением концентрации вод. пара в воздухе
% в зависимости от времени (t) и высоты
% воздух неподвижен, скорость квазистационарн.
% z(k)- высота на уровне k=1 2 ...10   z(k)=h0-k*dz+dz/2   dz=h0/nn   nn=10
%-----
% y1 y2 ...y10 - n -плотность числа капель на уровне k=1 2 ...10
%-----
% y11 y12 ...y20 - s - площадь поверхности капли, м2 (s=4*pi*r^2) на уровне k=1 2 ...10
% y21 y22 ...y30 - T - температура капли, К на уровне k=1 2 ...10
%-----
% y31 y32 ...y40 - dens - плотность пара, кг/м3 на уровне k=1 2 ...10
% y41 y42 ...y50 - dTa - изменение температуры воздуха, К на уровне k=1 2 ...10
%-----
% y51 y52 y53 -dM/dF - масса воды, что протекла через единичную площадь, на уровне k=1,6,10,
кг/м2
%-----
global P0; % P1;
P0=1.01e5; %total давление в системе на нулевом уровне, Па
%Pws(z) - water vapour давление вдали, Па
%-----
global cp_ws cp_w cp_a;
cp_ws=2.4e3; % удельн. теплоемкость вод. пара, j/(kg*K)
cp_w=4.2e3; % удельн. теплоемкость воды, j/(kg*K)
cp_a=1.01e3; % удельн. теплоемкость воздуха, j/(kg*K)
%-----
global g; %ускорение свободного паден., м/с2
g=9.8;
%-----
global Mu_w Mu_a;
Mu_w=1.8e-2; % мол. масса воды, kg/mol
Mu_a=2.9e-2; % мол. масса воздуха, kg/mol
global nu_a; % коэф. кинематической в-зкости воздуха при 20 C, м2/с
nu_a=1.5e-5;
global lam; %lam - heat conductivity coefficient воздуха при 20 C, W/(m*K)
lam=2.6e-2;
global dh_ws; %difference gas-fluid entalpie H2O, J/kgm
dh_ws=2.25e6;
global den_w; %плотность воды, kg/m3
den_w=1000;
%-----
global h0; % h0 - начальн. высота положен. капли, м
h0=1000;
nn=10; % количество слоев разбиен.
global dz; % ширина слоев разбиен., м
dz=h0/nn;
%-----
global Tah; % Tah - абсолютн. температура воздуха на начальной высоте h0, К
Tah=10+273;
global Ta0; % Ta0- абсолютн. температура воздуха на нулевом уровне, К
Ta0=273+20;
%-----
% global Pws0; % Pws0- парциальное давление вод-ного пара на нулевом уровне, Па
% Pws0=0;
% global Pwsh; % Pwsh - парциальное давление вод-ного пара на начальной высоте h0, Па
% Pwsh=Ps(Tah);
%-----
global T0; %T0- абсолютн. температура капли на начальной высоте h0, К

```

```

T0= Tah;
%-----
% r0=0.5e-3; % начальный радиус капли, м
r0=0.625e-3; % начальный радиус капли, м
% r0=1.0e-3; % начальный радиус капли, м
global s0; % начальн. площадь поверхности капли, м2
s0=4*pi*r0^2;
global gc0; %gc0 начальное значение gc
gc0=1e-6;
%-----
den_r_0=1e-1; % begin плотность воды в дожде, кг/м3
%-----
global n0; % начальн. плотность числа капель, м-3
n0=3/(4*pi*r0^3)*den_r_0/den_w;
%-----
global time_f; %time_f - общее time процесса, s
time_f=400;
%-----

%----- Numerical solution -----
%---Определение начальных значений основной задачи----
y1=s0; y2=T0;
options=odeset('RelTol',1.0e-3,'AbsTol',1.0e-6);%задание точности
%-----
soll=ode15s(@eq_sky_var_041,[h0 0],[y1 y2],options); %задание единого выходного аргумента - soll
k=1:1:nn;%задание возможных точек входного аргумента nn=10; % количество слоев разбиен.
sxint=deval(soll,z(k)); % вычисление значений решений в заданных точках z(k)=h0-k*dz+dz/2;
% вызов конкретных значений решений
% входной аргумент определ_ет номер k
%-----
y1=0; y2=0; y3=0; y4=0; y5=0; y6=0; y7=0; y8=0; y9=0; y10=0;
%-----
y11=sxint(1,1); y12=sxint(1,2); y13=sxint(1,3); y14=sxint(1,4); y15=sxint(1,5);
y16=sxint(1,6); y17=sxint(1,7); y18=sxint(1,8); y19=sxint(1,9); y20=sxint(1,10);
%-----
y21=sxint(2,1); y22=sxint(2,2); y23=sxint(2,3); y24=sxint(2,4); y25=sxint(2,5);
y26=sxint(2,6); y27=sxint(2,7); y28=sxint(2,8); y29=sxint(2,9); y30=sxint(2,10);
%-----
y21=Ta(z(1)); y22=Ta(z(2)); y23=Ta(z(3)); y24=Ta(z(4)); y25=Ta(z(5));
y26=Ta(z(6)); y27=Ta(z(7)); y28=Ta(z(8)); y29=Ta(z(9)); y30=Ta(z(10));
%-----
dens0=0;
y31=dens0; y32=dens0; y33=dens0; y34=dens0; y35=dens0; y36=dens0; y37=dens0; y38=dens0;
y39=dens0; y40=dens0;
%-----
y41=0; y42=0; y43=0; y44=0; y45=0; y46=0; y47=0; y48=0; y49=0; y50=0;
%-----
y51=0; y52=0; y53=0;
%-----основное решение
% solution of eq_sky_var_06 -----
options=odeset('RelTol',1.0e-3,'AbsTol',1.0e-6);%задание точности
%задание единого выходного аргумента - solv
solv=ode15s(@eq_sky_var_07,[0 time_f],[y1 y2 y3 y4 y5 y6 y7 y8 y9 y10...
    y11 y12 y13 y14 y15 y16 y17 y18 y19 y20 y21 y22 y23 y24 y25 y26 y27 y28 y29 y30...
    y31 y32 y33 y34 y35 y36 y37 y38 y39 y40 y41 y42 y43 y44 y45 y46 y47 y48 y49 y50 y51 y52
    y53],options);
% %-----
n_dt=100; %количество точек на временном интервале
ddt=time_f/n_dt; %задание интервала между расчетными точками - ddt
t_in=0:ddt:time_f; %задание возможных точек входного аргумента - t_in
sol_in=deval(solv,t_in); % вычисление значений решений sol_in в заданных точках t_in
%----- graph plotting -----

```

```

% %-----
figure;
subplot(3, 2, 1)
plot(t_in,sol_in(1,:),'k-',t_in,sol_in(6,:),'k:',...
      t_in,sol_in(10,:),'k-', 'LineWidth', 2)
legend('950','450','50'); %legend('n_9_5_0','n_4_5_0','n_5_0');
%axis([0,time_f,0,n0*1.01]);
ylabel('n, 1/м^3');
xlabel('\tau, с');
title('Плотность числа капель воды')
grid on;
% %-----
subplot(3, 2, 2)
plot(t_in,sqrt(sol_in(11,:)/s0),'k-',...
      t_in,sqrt(sol_in(16,:)/s0),'k:',...
      t_in,sqrt(sol_in(20,:)/s0),'k-', 'LineWidth', 2)
legend('950','450','50'); %legend('(r/r_0)_9_5_0','(r/r_0)_4_5_0','(r/r_0)_5_0');
%legend('950','450','50');
axis([0,time_f,0,1.05]);
ylabel('r_d/r_0');
xlabel('\tau, с');
title('Отношение радиуса капли к начальному')
grid on;
% %-----
subplot(3, 2, 3)
plot(t_in,sol_in(21,:)-273,'k-',t_in,sol_in(26,:)-273,'k:',...
      t_in,sol_in(30,:)-273,'k-', 'LineWidth', 2)
legend('950','450','50'); %legend('t_k_9_5_0','t_k_4_5_0','t_k_5_0');
% axis([0,time_f,0,Tf_max-Tf0+10]);
ylabel('t_d, ^oC');
xlabel('\tau, с');
title('Температура капель')
grid on;
% % %-----
subplot(3, 2, 4)
plot(t_in,sol_in(41,:)+Ta(z(1))-273,'k-',...
      t_in,sol_in(46,:)+Ta(z(6))-273,'k:',...
      t_in,sol_in(50,:)+Ta(z(10))-273,'k-', 'LineWidth', 2)
legend('950','450','50'); %legend('t_a_9_5_0','t_a_4_5_0','t_a_5_0');
%legend('950','450','50');
% axis([0,time_f,0,Tf_max-Tf0+10]);
ylabel('t_a, ^oC');
xlabel('\tau, с');
title('Температура воздуха при испарении капель воды')
grid on;
% % %-----
subplot(3, 2, 6)
plot(t_in,sol_in(51,:),'k-',t_in,sol_in(52,:),'k:',...
      t_in,sol_in(53,:),'k-', 'LineWidth', 2)
legend('950','450','50');
%axis([0,time_f,0,n0*1.01]);
ylabel('dM/dF, кг/м^2');
xlabel('\tau, с');
title('Массоперенос капель воды через единицу площади')
grid on;
% %-----
% figure;
% plot(t_in,w(z(1),sol_in(11,:)),'k-',...
%      t_in,w(z(6),sol_in(16,:)),'k:',...
%      t_in,w(z(10),sol_in(20,:)),'k-', 'LineWidth', 2)
% legend('950','450','50');
% % axis([0,time_f,0,Tf_max-Tf0+10]);

```



```

% ylabel('w_d, м/с');
% xlabel('\tau, с');
% title('Скорость капель на данной высоте')
% grid on;
% % %-----
% figure;
% subplot(3, 1, 1)
% plot(t_in,den_r(sol_in(1,:),sol_in(11,:)), 'k-',...
%      t_in,den_r(sol_in(6,:),sol_in(16,:)), 'k:',...
%      t_in,den_r(sol_in(10,:),sol_in(20,:)), 'k-.', 'LineWidth', 2)
% legend('950', '450', '50'); %legend('\rho_w_9_5_0', '\rho_w_4_5_0', '\rho_w_5_0');
% %legend('950', '450', '50');
% % axis([0,time_f,0,Tf_max-Tf0+10]);
% ylabel('\rho_w, кг/м^3');
% xlabel('\tau, с');
% title('Плотность жидкой воды в воздухе при дожде')
% grid on;
% % % %-----
% subplot(3, 1, 2)
% plot(t_in,Pas(z(1),sol_in(31,:),sol_in(41:)), 'k-',...
%      t_in,Pas(z(6),sol_in(36,:),sol_in(46:)), 'k:',...
%      t_in,Pas(z(10),sol_in(40,:),sol_in(50:)), 'k-.', 'LineWidth', 2)
% legend('950', '450', '50'); %legend('P_s_9_5_0', 'P_s_4_5_0', 'P_s_5_0');
% %legend('950', '450', '50');
% % axis([0,time_f,0,Tf_max-Tf0+10]);
% ylabel('P_s_a, Па');
% xlabel('\tau, с');
% title('Парциальное давление вод. пара в воздухе')
% grid on;
% % % %-----
% subplot(3, 1, 3)
% plot(t_in,Js(z(1),sol_in(11,:),sol_in(21,:),sol_in(31,:),sol_in(41:)), 'k-',...
%      t_in,Js(z(6),sol_in(16,:),sol_in(26,:),sol_in(36,:),sol_in(46:)), 'k:',...
%      t_in,Js(z(10),sol_in(20,:),sol_in(30,:),sol_in(40,:),sol_in(50:)), 'k-.', 'LineWidth', 2)
% legend('950', '450', '50'); %legend('J_s_9_5_0', 'J_s_4_5_0', 'J_s_5_0');
% %legend('950', '450', '50');
% % axis([0,time_f,0,Tf_max-Tf0+10]);
% ylabel('J_s, кг/с');
% xlabel('\tau, с');
% title('Поток массы вод. пара от капли')
% grid on;
% %-----
% % %-----
% figure;
% plot(t_in,sol_in(21,:)-273,t_in,sol_in(26,:)-273,...
%      t_in,sol_in(30,:)-273,...
%      t_in,sol_in(41,:)+Ta(z(1))-273,t_in,sol_in(46,:)+Ta(z(6))-273,...
%      t_in,sol_in(50,:)+Ta(z(10))-273)
% legend('t_k_9_5_0', 't_k_4_5_0', 't_k_5_0', 't_a_9_5_0', 't_a_4_5_0', 't_a_5_0');
% % axis([0,time_f,0,Tf_max-Tf0+10]);
% ylabel('t_k и t_a, ^\circ C');
% xlabel('\tau, с');
% title('Температуры капель и воздуха')
% grid on;
% % %-----
% % %-----
figure;
plot(t_in,sol_in(21,:)-273, 'k-',...
     t_in,sol_in(26,:)-273, 'k:',...
     t_in,sol_in(30,:)-273, 'k-.',...
     t_in,sol_in(41,:)+Ta(z(1))-273, 'kx',...
     t_in,sol_in(46,:)+Ta(z(6))-273, 'k.',...

```

```

t_in,sol_in(50,:)+Ta(z(10))-273,'k+', 'LineWidth',2)
legend('t_d_9_5_0','t_d_4_5_0','t_d_5_0','t_a_9_5_0','t_a_4_5_0','t_a_5_0');
% axis([0,time_f,0,Tf_max-Tf0+10]);
ylabel('t_d и t_a, ^oC');
xlabel('\tau, c');
title('Температура капель t_d и воздуха t_a')
grid on;
% % %-----
figure;
plot(t_in,Pas(z(1),sol_in(31,:),sol_in(41,:)), 'k-',...
t_in,Pas(z(6),sol_in(36,:),sol_in(46,:)), 'k:',...
t_in,Pas(z(10),sol_in(40,:),sol_in(50,:)), 'k-',...
t_in,Ps(Ta(z(1))+sol_in(41,:)), 'kx',...
t_in,Ps(Ta(z(6))+sol_in(46,:)), 'k.',...
t_in,Ps(Ta(z(10))+sol_in(50,:)), 'k+', 'LineWidth',2)
legend('P_s_a_9_5_0','P_s_a_4_5_0','P_s_a_5_0','P_s_9_5_0','P_s_4_5_0','P_s_5_0');
%legend('950','450','50');
% axis([0,time_f,0,Tf_max-Tf0+10]);
ylabel('P_s_a и P_s, Па');
xlabel('\tau, c');
title('Давление пара')
grid on;
% % %-----
figure;
plot(t_in,den_r(sol_in(1,:),sol_in(11,:))/den_r_0,'k-',...
t_in,den_r(sol_in(6,:),sol_in(16,:))/den_r_0,'k:',...
t_in,den_r(sol_in(10,:),sol_in(20,:))/den_r_0,'k-',...
t_in,sqrt(sol_in(11,:)/s0),'kx',...
t_in,sqrt(sol_in(16,:)/s0),'k.',...
t_in,sqrt(sol_in(20,:)/s0),'k+', 'LineWidth',2)
legend('\rho_d_w_9_5_0/\rho_d_w_0','\rho_d_w_4_5_0/\rho_d_w_0','\rho_d_w_5_0/\rho_d_w_0',...
'r_d_9_5_0/r_0','r_d_4_5_0/r_0','r_d_5_0/r_0');
axis([0,time_f,0,1.1]);
ylabel('\rho_d_w/\rho_d_w_0 и r_d/r_0');
xlabel('\tau, c');
title('Отношение плотности жидкой воды и радиуса капель в дожде к исходным')
grid on;
% % %-----
figure;
plot(t_in,sol_in(51,:), 'k-',t_in,sol_in(52,:), 'k:',...
t_in,sol_in(53,:), 'k-', 'LineWidth',2)
legend('950','450','50');
%axis([0,time_f,0,n0*1.01]);
ylabel('dM/dF, кг/м^2');
xlabel('\tau, c');
title('Перенос массы воды через единицу площади')
grid on;
% % %-----
% figure;
% plot(t_in,den_r(sol_in(1,:),sol_in(11,:))/den_r_0,'k-',...
% t_in,den_r(sol_in(6,:),sol_in(16,:))/den_r_0,'k:',...
% t_in,den_r(sol_in(10,:),sol_in(20,:))/den_r_0,'k-', 'LineWidth',2)
% %legend('950','450','50'); %
% legend('\rho_w_9_5_0/\rho_w_0','\rho_w_4_5_0/\rho_w_0','\rho_w_5_0/\rho_w_0');
% axis([0,time_f,0,1.1]);
% ylabel('\rho_w/\rho_w_0');
% xlabel('\tau, c');
% title('Отношение плотности жидкой воды в дожде к исходной')
% grid on;
% % %-----
% %----- the end of file -----

```

ДОДАТОК В

Акти впровадження результатів досліджень

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Т.в.о. начальника 21 державного
пожежно-рятувального загону ГУ
ДСНС України у Донецькій області
майор служби цивільного захисту

О.О. Редченко

« 25 » 05 2018р.

АКТ

Впровадження результатів дисертаційної роботи
на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук
Кустова Максима Володимировича

Комісія у складі:

Голова комісії: - начальник 69 державної пожежно-рятувальної частини 21 державного пожежно-рятувального загону ГУ ДСНС України у Донецькій області, майор служби цивільного захисту Биба А.О.

Члени комісії:

- начальник караулу 69 державної пожежно-рятувальної частини 21 державного пожежно-рятувального загону ГУ ДСНС України у Донецькій області старший лейтенант служби цивільного захисту Куліш С.О.;

- начальник караулу 69 державної пожежно-рятувальної частини 21 державного пожежно-рятувального загону ГУ ДСНС України у Донецькій області капітан служби цивільного захисту Шнипко О.С.;

склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук Кустова М.В., а саме:

- методика прогнозування зони радіоактивного забруднення при випадінні атмосферних опадів;
- методика прогнозування зони хімічного забруднення при випадінні атмосферних опадів;

впровадженні у використання у оперативно-рятувальні підрозділи 21 державного пожежно-рятувального загону ГУ ДСНС України у Донецькій області.

Впровадження результатів дисертаційної роботи Кустова М.В. дозволили підвищити точність прогнозування зон радіоактивного та хімічного забруднення території при виникненні надзвичайних ситуацій техногенного характеру з урахування можливості випадіння опадів над зоною забруднення.

Голова комісії:

Члени комісії:

А.О. Биба

С.О. Куліш

О.С. Шнипко

“ЗАТВЕРДЖУЮ”:



І.В. Савельєв

20/7р.

Впровадження результатів дисертаційної роботи
на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук
Кустова Максима Володимировича

Комісія у складі:

Голова комісії: - начальник Управління реагування на надзвичайні ситуації ГУ ДСНС України у Луганській області, полковник служби цивільного захисту Солоха О.С.

Члени комісії: - заступник начальника Управління реагування на надзвичайні ситуації – начальник відділу організації реагування та готовності підрозділів ГУ ДСНС України у Луганській області, полковник служби цивільного захисту Велігоша А.С.;

- начальник відділу організації пожежогасіння та роботи с об'єктовими об'єктами, підполковник служби цивільного захисту Карпенко О.В.;

склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук Кустова М.В., а саме:

- безпілотні літальні засоби розвідки зони надзвичайної ситуації з використанням дистанційних пірометрів та лідарних приладів контролю хімічного забруднення;
- методика прогнозування зони хімічного забруднення при випадінні атмосферних опадів;

впровадженні у використання у оперативно-рятувальні підрозділи Головного управління ДСНС України у Луганській області.

Даний акт не є підставою для отримання грошової винагороди.

Впровадження результатів дисертаційної роботи Кустова М.В. дозволили підвищити якість розвідки лісних та степових пожеж великого масштабу та зони хімічного забруднення при виникненні техногенних аварій.

Голова комісії:

Члени комісії:

О.С. Солоха

А.С. Велігоша

О.В. Карпенко

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

В.о. начальника Інституту державного управління у сфері цивільного захисту
доктор наук з державного управління,
доцент, Заслужений лікар України

 П.Б. Волянський
«_____» _____ 2016 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук
Кустова Максима Володимировича

Комісія у складі: голови – заступника начальника Інституту з навчальної роботи, кандидата технічних наук, доцента Єременка С.А. і членів комісії – начальника навчально-методичного відділу, кандидата технічних наук, доцента Пруського А.В., начальника кафедри профілактики пожеж та безпеки життєдіяльності населення, кандидата технічних наук, доцента Сидоренка В.Л., завідувача кафедри організації управління у надзвичайних ситуаціях, кандидата технічних наук, доцента Юрченка В.О. склали цей акт про те, що результати дисертаційних досліджень Кустова М.В. впроваджені в навчальний процес Інституту державного управління у сфері цивільного захисту, а саме:

- методика прогнозування розмірів зон радіаційного та хімічного забруднення при випадінні атмосферних опадів при вивченні навчальної дисципліни «Організація аварійно-рятувальних робіт» (заочна форма навчання, освітньо-кваліфікаційний рівень «спеціаліст», спеціальність «Пожежна безпека», галузь знань «Цивільна безпека»);

- матеріали з прогнозування інтенсивності опадів при різних метеорологічних умовах та характеру забруднення повітря при вивченні навчальної дисципліни «Термодинаміка і теплопередача» (заочна форма навчання, освітньо-кваліфікаційний рівень «спеціаліст», спеціальність «Пожежна безпека», галузь знань «Цивільна безпека»);

- новітні способи штучної інтенсифікації опадів при осадженні небезпечних речовин з атмосфери та піротехнічні склади для їх реалізації при вивченні навчальної дисципліни «Тактика пожежогасіння та рятувальних робіт» (заочна форма навчання, освітньо-кваліфікаційний рівень «спеціаліст», спеціальність «Пожежна безпека», галузь знань «Цивільна безпека»).

Це дозволило підвищити ефективність навчального процесу та якість викладення аспектів ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

Даний акт не є підставою для одержання премій та інших винагород із фондів Інституту державного управління у сфері цивільного захисту.

Акт складений для представлення в спеціалізовану раду в зв'язку з захистом дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Голова комісії:



С.А. Єременко

Члени комісії:



А.В. Пруський



В.Л. Сидоренко



В.О. Юрченко