

Національний університет цивільного захисту України  
Державної служби України з надзвичайних ситуацій

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Мелешенко Руслан Геннадійович**

УДК 621.03.9

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНІ МЕТОДИ ПОПЕРЕДЖЕННЯ**  
**НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ**  
**НА ОБ'ЄКТАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЗА ДОПОМОГОЮ**  
**ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ СТАНУ**  
**ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА**

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

\_\_\_\_\_ Р.Г. Мелешенко

Науковий консультант: Рибка Євгеній Олексійович,  
доктор технічних наук, старший дослідник

Харків – 2020

## АНОТАЦІЯ

*Мелещенко Р. Г.* Інженерно-технічні методи попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища. – 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, ДСНС, Харків, 2020.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої наукової проблеми у сфері цивільного захисту – створення нових методів попередження НС техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) об'єктів.

Метою роботи є розробка інженерно-технічних методів попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища в приміщеннях та на території об'єкта.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення наступних завдань:

1. Проаналізувати світові тенденції реагування та попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на небезпечних об'єктах.

2. Розглянути стан та особливості процесу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури.

3. Розробити інженерно-технічний метод попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища приміщень об'єктів критичної інфраструктури.

4. Розробити інженерно-технічний метод попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури та комунікативні моделі бездротового середовища щодо реалізації метода на основі використання безпілотних рухомих платформ.

5. Перевірити достовірність розроблених математичних моделей та інженерно-технічних методів.

6. Запропонувати пропозиції щодо впровадження розроблених математичних моделей та інженерно-технічних методів.

Для вирішення поставлених завдань застосовувались методи: математичне та імітаційне моделювання, методи системного аналізу, теорії ймовірностей, математичної статистики, теорії нелінійної динаміки, фрактального та рекурентного аналізу, а також мір рекурентних станів.

У першому розділі роботи проаналізовано сучасний стан реагування та попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на небезпечних об'єктах, встановлено: по-перше, небезпека надзвичайних ситуацій техногенного характеру має всесвітній характер та негативну динаміку щодо зростання, причинами переважної більшості надзвичайних ситуацій є пожежі, при цьому як нормальна так і аварійна робота небезпечних об'єктів характеризується значними викидами в атмосферне повітря небезпечних речовин; по-друге, ефективним принципом попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру є застосування активних систем безпеки, заснованих на використанні чутливих елементів (датчиків), які відстежують стан небезпечного об'єкта і виявляють передумови виникнення аварійних ситуацій.

У другому розділі, розглянуті стан та особливості процесу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури України, показано, що для забезпечення стійкості об'єктів критичної інфраструктури до надзвичайних ситуацій потребують розробки нові інженерно-технічні методи попередження надзвичайних

ситуацій техногенного характеру, які базуються на оперативному контролі стану повітряного середовища об'єкта; існуючі методи та засоби попередження надзвичайних ситуацій розглядають повітряне середовище як лінійну систему, при цьому повітряне середовище в умовах небезпеки являє собою складну нелінійну динамічну систему, сучасним конструктивним підходом до вивчення таких систем є методи рекурентних діаграм (RP) і оцінки рекурентності станів (RQA), які попри беззаперечні переваги в системах попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру раніше не використовувались.

У третьому розділі, на основі розробленої математичної моделі для поточних показників фрактальності у вигляді кореляційної розмірності і рекурентності станів флуктуацій повітряного середовища при загорянні в приміщеннях об'єктів критичної інфраструктури розроблений відповідний інженерно-технічний метод попередження надзвичайних ситуацій внаслідок пожеж (вибухів) на об'єктах. Метод призначений для раннього виявлення загорянь в приміщеннях. Реалізація методу передбачає виконання семи процедур, пов'язаних з інженерно-технічним обґрунтуванням вхідних даних про об'єкти і небезпечні фактори повітряного середовища в приміщеннях, типів вимірювальних сенсорів, а також засобів і методик вимірювань стану повітряного середовища в приміщеннях. Процедури технічного вимірювання небезпечних факторів станів повітряного середовища в приміщеннях, а також обчислення поточних флуктуацій станів в реальному часі. Процедури інженерно-технічного використання запропонованої параметричної моделі для показників фрактальності флуктуацій станів газового середовища. Процедури інженерно-технічного обґрунтування порогів виявлення небезпечних станів за величиною кореляційної розмірності і рекурентності станів флуктуацій повітряного середовища в приміщеннях. Процедури виявлення моментів перевищення значеннями кореляційної розмірності і рекурентності станів відповідних порогів для попередження надзвичайних ситуацій внаслідок пожежі на об'єктах. Процедури обґрунтування і вибору

адекватних управлінських рішень з метою попередження та недопущення виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок пожежі в приміщеннях об'єктів критичної інфраструктури.

У четвертому розділі, на основі розробленої математичної моделі чисельних мір аналізу рекурентних діаграм динаміки станів забрудненого атмосферного повітря з урахуванням ризику здоров'ю людини розроблений інженерно-технічний метод попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури. Метод призначений для своєчасного попередження загрози здоров'ю людей понад допустимий рівень індивідуального ризику. Реалізація методу передбачає виконання восьми процедур, пов'язаних з визначенням вихідних даних про об'єкти критичної інфраструктури і небезпечні шкідливі речовини, що викидаються ними в атмосферне повітря, інженерно-технічним обґрунтуванням системи моніторингу атмосферних забруднень і метрологічного забезпечення, технічним виміром і обчисленням рекурентних діаграм в реальному часі. Інженерно-технічним впровадженням математичної моделі чисельних мір аналізу рекурентних діаграм динаміки станів забрудненого атмосферного повітря та ризику здоров'ю людей для виявлення рекурентності станів забрудненої атмосфери і на їх основі попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок наявності в атмосферному повітрі шкідливих речовин, понад гранично допустимі концентрації. Оцінкою ризиків негайних токсичних ефектів і хронічної інтоксикації для людей, що спричиняються забрудненою атмосферою. Обґрунтуванням адекватних управлінських рішень, направлених на зниження ризику здоров'ю людей внаслідок наявності в атмосферному повітрі шкідливих речовин, шляхом виключення інжекції шкідливих речовин, що викидаються в атмосферне повітря в моменти рекурентності станів забрудненої атмосфери.

У п'ятому розділі, з метою перевірки розроблених математичних моделей та інженерно-технічних методів виконані відповідні експериментальні дослідження. Результати експериментів, виконаних у лабораторній камері при загорянні тестових матеріалів та вимірюванні небезпечних факторів повітряного середовища, підтвердили працездатність запропонованих моделей та інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) у приміщеннях об'єктів критичної інфраструктури. Достовірність моделей та інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій внаслідок наявності шкідливих речовин в атмосферному повітрі перевірялась на основі реальних вимірів поточної концентрації забруднювачів атмосферного повітря на стаціонарних постах типової міської конфігурації з індексом забруднення повітря 6,8 од. та їх здатності щодо виявлення апріорі достовірної небезпечної події. Одержані результати засвідчують достовірність запропонованих моделей та методу виявляти небезпечні події, що обумовлені небезпечним впливом забрудненого атмосферного повітря на людину.

У шостому розділі, на основі розроблених інженерно-технічних методів попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) та внаслідок наявності шкідливих речовин в атмосферному повітрі запропоновано нову комплексну систему оперативного контролю та управління станом повітряного середовища. До складу розробленої комплексної системи включені три системи – систему поточного вимірювання стану повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури, систему підтримки прийняття оперативного управлінського рішення та систему виконання такого рішення.

**Ключові слова:** надзвичайна ситуацій, попередження надзвичайних ситуацій, об'єкт критичної інфраструктури, інженерно-технічний метод, повітряне середовище.

## Список публікацій здобувача

**Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

### *Монографії*

1. Пospelov Б. Б., Андронов В. А., Рыбка Е. А., Мелешенко Р. Г., Карпец К. М. Разработка конструктивных методов повышения эффективности автоматического обнаружения возгораний в компрессорных станциях газотранспортных систем Украины. Монография. Харьков: НУЦЗУ, 2018. 172 с.

### *Статті у закордонних фахових виданнях*

2. **Meleshchenko R. G.** System analysis of prevention of man-made emergency situations in consequence of fire in the premises of the object // ScienceRise. 2020. Issue 1 (66). P. 38–46. doi: 10.21303/2313-8416.2020.001150

### *Статті у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародної наукометричної бази Scopus*

3. Pospelov B., Rybka E., **Meleschenko R.**, Gornostal S., Shcherbak S. Results of experimental research into correlations between hazardous factors of ignition of materials in premises // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Volume 6. Issue 10 (90). P. 50–56. doi: 10.15587/2312-8372.2016.85866

4. Pospelov B., Petukhova O., **Meleschenko R.**, Gornostal S., Shcherbak S. Development of communication models of wireless environment in emergency situations // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Volume 2. Issue 9 (92). P. 40–47. doi: 10.15587/1729-4061.2018.127023

5. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., **Meleschenko R.**, Borodych P. Studying the recurrent diagrams of carbon monoxide concentration at early

ignitions in premises // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Volume 3. Issue 9 (93). P. 34–40. doi: 10.15587/1729-4061.2019.155027

6. Korytchenko K., Markov V., Polyakov I., **Meleshchenko R.** Validation of the numerical model of a spark channel expansion in a low-energy atmospheric pressure discharge // Problems of Atomic Science and Technology. Plasma Electronics and New Methods of Acceleration. 2018. Volume 10. Issue 4 (116). P. 144–149.

7. Ozerov A., Vinnikov D., Skob Yu., **Meleshchenko R.** Numerical simulation of influence of the non-equilibrium excitation of molecules on direct detonation initiation by spark discharge // Problems of Atomic Science and Technology. Plasma Electronics and New Methods of Acceleration. 2018. Volume 10. Issue 4 (116). P. 194–199.

8. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., **Meleschenko R.**, Gornostal S. Analysis of correlation dimensionality of the state of a gas medium at early ignition of materials // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Volume 5. Issue 10 (95). P. 25–30. doi: 10.15587/1729-4061.2018.142995

9. Korytchenko K., Kasimov A., Golota V., Ajmani S., Dubinin D., **Meleshchenko R.** Experimental investigation of arc column expansion generated by high-energy spark ignition system // Problems of Atomic Science and Technology. Plasma Physics. 2018. Volume 24. Issue 6 (118). P. 225–228.

10. Pospelov B., Rybka E., **Meleschenko R.**, Borodych P., Gornostal S. Development of the method for rapid detection of hazardous atmospheric pollution of cities with the help of recurrence measures // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Volume 1. Issue 10 (97). P. 29–35. doi: 10.15587/17294061.2019.155027

11. Pospelov B., **Meleshchenko R.**, Kosse A., Khmyrov I., Bosniuk V. Development of a method for predicting the recurrence of states of atmospheric air pollution concentration in industrial cities // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Volume 2 (98). Issue 10. P. 43–48. doi: 10.15587/1729-4061.2019.162652



12. Pospelov B., Andronov V., **Meleshchenko R.**, Danchenko Yu., Artemenko I., Romaniak M., Khmyrova A., Butenko T. Construction of methods for computing recurrence plots in space with a scalar product // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Volume 3. Issue 4 (99). P. 37–44. doi: 10.15587/1729-4061.2019.169887

13. Pospelov B., Rybka E., Togobytska V., **Meleshchenko R.**, Danchenko Yu., Butenko T., Volkov I., Hafurov O., Yevsieiev V. Construction of the method for semi-adaptive threshold scaling transformation when computing recurrent plots // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Volume 4. Issue 10 (100). P. 22–29. doi: 10.15587/1729-4061.2019.176579

14. Pospelov B., Rybka E., **Meleshchenko R.**, Asotskyi V., Petukhova O., Gornostal S., Harbuz S. Development of a self-adjusting method for calculating recurrent diagrams in a space with a scalar product // EUREKA: Physics and Engineering. 2019. Issue 5. P. 10–18. doi: 10.21303/2461-4262.2019.00981

15. Pospelov B., **Meleshchenko R.**, Krainiukov B., Karpets K., Petukhova O., Bezuhla Yu., Butenko T., Horinova V., Borodych P., Kochanov E. A method for preventing the emergency resulting from fires in the premises through operative control over a gas medium // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Volume 1. Issue 10 (103). P. 6–13. doi: 10.15587/1729-4061.2020.194009

16. Pospelov B., Rybka E., **Meleshchenko R.**, Krainiukov O., Harbuz S., Bezuhla Yu., Morozov I., Kuruch A., Saliyenko O., Vasylichenko R. Use of uncertainty function for identification of hazardous states of atmospheric pollution vector // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Volume 2. Issue 10 (104). P. 6–12. doi:10.15587/1729-4061.2020.200140

17. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Krainiukov O., Maksymenko N., **Meleshchenko R.**, Bezuhla Yu., Hrachova I., Nesterenko R., Shumilova A. Mathematical model of determining a risk to the human health along with the detection of hazardous states of urban atmosphere pollution based on measuring the current concentrations of pollutants // Eastern-European Journal of Enterprise. 2020. Volume 4. Issue 10 (106). P. 37–44. doi:10.15587/1729-4061.2020.210059

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

18. **Мелешенко Р. Г.**, Мунтян В. К., Коврегін В. В. Имитационная модель создания противопожарного барьера совместными усилиями авиационных и наземных сил // Проблемы пожарной безопасности: Сборник научных трудов. Харьков: НУГЗУ. Вып. 37. 2015. С. 142–149.

19. **Meleschenko R. G.**, Muntyan V. K., Tarasenko A. A. Justification of the approach for calculating the parameters of aviation emergency and rescue operations when using visual search // Проблеми надзвичайних ситуацій: Збірник наукових праць. Харків: НУЦЗУ. Вип. 25. 2017. С. 67–72.

20. Хилько Ю. В., **Мелешенко Р. Г.** Визначення параметрів вогнегасної ефективності викиду порошкових сумішей з контейнерів // Проблемы пожарной безопасности: Сборник научных трудов. Харьков: НУГЗУ. Вып. 41. 2017. С. 196–200.

21. **Meleschenko R.**, Dureev V. Mathematical model of thermal fire detector with the thermistor // Проблемы пожарной безопасности: Сборник научных трудов. Харьков: НУГЗУ. Вып. 44. 2018. С. 89–92.

22. **Мелешенко Р. Г.** Предотвращение чрезвычайных ситуаций на объектах критической инфраструктуры путем раннего выявления загрязнений воздуха // Проблеми надзвичайних ситуацій: зб. наук. праць. 2018. №28. С. 69–82.

23. Поспелов Б. Б., **Мелешенко Р. Г.**, Прокопенко О. В., Мельниченко А. С. Меры рекуррентности и методика их использования для изучения и прогнозирования динамики состояния экосистем // Проблеми надзвичайних ситуацій: зб. наук. праць. 2019. №29. С. 14–28.

24. **Мелешенко Р. Г.** Модель для выявления угроз возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера с помощью мониторинга температуры в помещениях объекта // Проблемы пожарной безопасности: Сборник научных трудов. Харьков: НУГЗУ. Вып. 45. 2019. С. 117–124.

25. **Мелешенко Р. Г.** Инженерно-технический метод предупреждения чрезвычайных ситуаций техногенного характера с помощью контроля загрязнения атмосферного воздуха // Проблемы надзвичайних ситуацій: зб. наук. праць. 2019. №30. С. 85–97.

26. Поспелов Б. Б., Рыбка Е. А., **Мелешенко Р. Г.**, Бородич П. Ю., Самойлов М. А. Метод раннего обнаружения опасной ситуации в помещениях на основе корреляционной размерности опасных факторов газовой среды // Проблемы пожарной безопасности: Сборник научных трудов. Харьков: НУГЗУ. Вып. 46. 2019. С. 143–154.

27. **Мелешенко Р. Г.** Раннее выявление пожара на основе контроля динамики состояния газовой среды в помещениях // Проблемы пожарной безопасности: Сборник научных трудов. Харьков: НУГЗУ. Вып. 47. 2020. С. 71–80.

28. Поспелов Б. Б., Рыбка Е. А., **Мелешенко Р. Г.**, Самойлов М. А., Карпец К.М., Безуглая Ю.С. Инженерно-технический метод предупреждения чрезвычайных ситуаций техногенного характера путем оперативного контроля состояния газовой среды в помещениях объекта // Проблемы надзвичайних ситуацій: зб. наук. праць. 2020. №31. С. 234–246.

29. Поспелов Б. Б., Рыбка Е. А., **Мелешенко Р. Г.**, Самойлов М. А., Безуглая Ю. С. Методы вычисления мер текущей рекуррентности флуктуаций состояния газовой среды для раннего выявления пожара в помещениях // Проблемы пожарной безопасности: Сборник научных трудов. Харьков: НУГЗУ. Вып. 48. 2020. С. 136–146.

30. Поспелов Б. Б., Рыбка Е. А., **Мелешенко Р. Г.**, Самойлов М. А., Бородич П. Ю., Мироненко А. А. Риск нарушение нормальных условий жизнедеятельности человека при техногенных чрезвычайных ситуациях // Проблемы надзвичайних ситуацій: зб. наук. праць. 2020. №32. С. 31–43.

***Патенти:***

31. Система раннього виявлення надзвичайних ситуацій / Поспелов Б. Б., Андронов В. А., Рибка Є. О., **Мелешенко Р. Г.**, Карпець К. М., Горінова В. В., Самойлов М. О. Пат. 139221 України, МПКG08B 19/00 (2019.01), заявник та патентовласник Національний університет цивільного захисту України. № и 2019 06486, заявка 10.06.2019, опуб. 26.12.2019, Бюл. №24.

32. Спосіб гасіння пожежі мобільним роботом / Андронов В. А., Карпець К. М., Семків О. М., **Мелешенко Р. Г.**, Мельниченко А. С. Бутенко Т. Ю., Рибка Є. О. Пат. 132449 України, МПК G01N 3/24 (2006.01), заявник та патентовласник Національний університет цивільного захисту України. № и 2019 09788, заявка 01.10.2019, опуб. 25.02.2019, Бюл. №4.

***Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:***

33. **Мелешенко Р. Г.**, Ленфіра А. В. Аналіз способів та шляхів проведення рятування людей // Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів (теорія та практика): збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції, 12 березня 2015 року, Харків: НУЦЗ України, 2015. С. 180–181.

34. **Мелешенко Р. Г.**, Іщук В. М. Статистичний аналіз та прогноз нещасних випадків // Безпека життєдіяльності людини як умова сталого розвитку сучасного суспільства: Збірник тез VI Міжнародної науково-практичної конференції. 8-9 червня 2017 р. Київ: Таврійський Національний університет імені В. І. Вернадського, 2017. С. 85–90.

35. **Мелешенко Р. Г.**, Мунтян В. К., Тарасенко О. А. Застосування авіації при проведенні пошуково-рятувальних робіт // Матеріали науково-практичного семінару «Запобігання надзвичайним ситуаціям і їх ліквідація». 7 лютого 2018 р. Харків: НУЦЗ України, 2018. С. 137–140.

36. **Meleschenko R. G.**, Gornostal S. A. Investigation of the characteristics of the internal firefighting water pipeline elements // Proceedings of the 2nd Annual Conference Technology transfer: fundamental principles and innovative technical solutions 23 November 2018. Tallinn, Estonia, 2018. P. 55–57.

37. Поспелов Б. Б., Андронов В. А., Рыбка Е. А., **Мелешенко Р. Г.**, Мельниченко А. С. Оперативный метод оценки влияния чрезвычайных ситуаций на окружающую атмосферу // Исторические аспекты, актуальные проблемы и перспективы развития гражданской обороны: сборник тезисов и докладов VII Международной научно-практической конференции адъюнктов, магистрантов, курсантов и студентов. 15 марта 2019. Кокшетау, РГУ «КТИ КЧС МВД Республики Казахстан». 2019. 188–192.

38. **Мелешенко Р. Г.**, Иванов Е. В. Запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури шляхом раннього виявлення загроз // Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. Харків: НУЦЗУ, 2019. С. 36.

39. Поспелов Б. Б., **Мелешенко Р. Г.**, Прокопенко О. В., Мельниченко А. С. Системный аспект предотвращения чрезвычайных ситуаций на объектах критической инфраструктуры // Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції. 11-12 квітня 2019 року. Черкаси. 2019. С. 62–64.

40. Поспелов Б. Б., Андронов В. А., Рыбка Е. А., **Мелешенко Р. Г.**, Самойлов М.А. Системный подход к обеспечению экологической безопасности развития энергетики // Фізико-технічні проблеми енергетики та шляхи їх вирішення 2019: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. 19 червня 2019. Харків. 2019. С. 57–58.

41. Поспелов Б. Б., Андронов В. А., Рыбка Е. О., **Мелешенко Р. Г.**, Самойлов М.О. Парадигма запобігання надзвичайним ситуаціям, пов'язаних із забрудненням атмосфери міст // Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах: матеріали 21 Всеукраїнської науково-практичної

конференції (за міжнародною участю). 8 жовтня 2019 року. Київ, ІДУЦЗ. 2019. С. 218–221.

42. **Мелешченко Р. Г.** Метод предотвращения чрезвычайных ситуаций // Проблемы та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. Харків: НУЦЗУ, 2020. С. 25.

43. Поспелов Б. Б., Андронов В. А., Рыбка Е. А., **Мелешченко Р. Г.**, Самойлов М. А. Метод предупреждения чрезвычайных ситуаций техногенного характера на основе текущей корреляционной размерности состояния газовой среды в помещениях объекта // Problems of Emergency Situations: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2020. С. 134–136.

44. Поспелов Б. Б., Рыбка Е. А., **Мелешченко Р. Г.**, Безуглая Ю. С., Самойлов М. А. Новая рецепторная модель атмосферных загрязнений для предупреждения и оперативного управления ликвидацией последствий чрезвычайных ситуаций // Надзвичайні ситуації: безпека та захист: матеріали X Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. 29-30 жовтня 2020 року. Черкаси: ЧПБ імені Г. Чорнобиля УЦЗ України, 2020. С. 282–284.

## ABSTRACT

*Meleshchenko R. G.* Engineering and technical methods of prevention of man-made emergencies at critical infrastructure facilities by means of operative control of the air environment. – Qualified scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for a Doctor of Science Degree in specialty 21.02.03 – Civil Defence (21 – National Security). National University of Civil Defence of Ukraine, SES of Ukraine, Kharkov, 2020.

The dissertation is devoted to solving an important scientific problem in the field of civil defence – the creation of new methods of preventing man-made emergencies at critical infrastructure through operational control of the air in the premises and (near) facilities.

The aim of the work is to develop engineering and technical methods of prevention of man-made emergencies at critical infrastructure facilities through operational control of the air environment in the premises and on the site.

Achieving this goal involves solving the following tasks:

1. Analyze global trends in response and prevention of man-made emergencies at hazardous facilities.

2. To consider the state and features of the process of prevention of man-made emergencies at critical infrastructure facilities.

3. To develop an engineering and technical method of prevention of man-made emergencies due to fires (explosions) by means of operational control of the air environment of the premises of critical infrastructure facilities.

4. To develop an engineering and technical method of prevention of man-made emergencies due to the presence of harmful substances in the air on the territory (near) critical infrastructure and communicative models of wireless environment for the implementation of the method based on the use of unmanned mobile platforms.

5. Check the reliability of the developed mathematical models and engineering methods.

6. Propose proposals for the implementation of developed mathematical models and engineering methods.

Methods were used to solve the tasks: mathematical and simulation modeling, methods of systems analysis, probability theory, mathematical statistics, theory of nonlinear dynamics, fractal and recurrent analysis, as well as measures of recurrent states.

The first section analyzes the current state of response and prevention of man-made emergencies at hazardous sites, established: first, the danger of man-

made emergencies is global and negative growth dynamics, the causes of the vast majority of emergencies are fires, with both normal and emergency operation of hazardous facilities is characterized by significant emissions of hazardous substances into the atmosphere; secondly, an effective principle of prevention of man-made emergencies is the use of active safety systems based on the use of sensitive elements (sensors) that monitor the condition of a dangerous object and identify the preconditions for emergencies.

In the second section, the state and features of the process of prevention of emergencies of man-made nature at critical infrastructure of Ukraine, it is shown that to ensure the resilience of critical infrastructure to emergencies need to develop new engineering methods to prevent emergencies of man-made nature. based on operational control of the air environment of the object; existing methods and means of emergency prevention consider the air environment as a linear system, while the air environment in danger is a complex nonlinear dynamic system, a modern constructive approach to the study of such systems are methods of recurrent diagrams (RP) and state recurrence estimation (RQA), which, with undeniable advantages in man-made emergency warning systems, have not been used before.

In the third section, on the basis of the developed mathematical model for current fractality indicators in the form of correlation dimension and recurrence of states of air fluctuations at ignition in premises of objects of critical infrastructure the corresponding engineering method of prevention of emergencies owing to fires (explosions) on objects is developed. . The method is designed for early detection of indoor fires. The implementation of the method involves the implementation of seven procedures related to the engineering justification of input data on objects and hazards of indoor air, types of measuring sensors, as well as means and methods of measuring the state of indoor air. Procedures for technical measurement of dangerous factors of indoor air conditions, as well as calculation of current fluctuations of conditions in real time. Procedures of engineering and technical use of the offered parametric



model for indicators of fractality of fluctuations of states of the gaseous environment. Procedures for engineering substantiation of thresholds for detection of dangerous conditions by the value of the correlation dimension and recurrence of states of air fluctuations in the premises. Procedures for detecting moments of exceeding the values of the correlation dimension and recurrence of the states of the respective thresholds to prevent emergencies due to fire at facilities. Procedures for substantiation and selection of adequate management decisions in order to prevent and prevent emergencies of man-made nature due to fire in the premises of critical infrastructure.

In the fourth section, on the basis of the developed mathematical model of numerical measures of analysis of recurrent diagrams of dynamics of states of polluted atmospheric air taking into account risk to human health the engineering method of prevention of emergencies of technogenic character caused by presence in atmospheric air of the territory is developed. critical infrastructure projects. The method is designed to timely prevent threats to human health above the permissible level of individual risk. The implementation of the method involves the implementation of eight procedures related to the determination of initial data on critical infrastructure and hazardous pollutants emitted into the air, engineering feasibility study of air pollution monitoring and metrological support, technical measurement and calculation of recurrent diagrams in real time. Engineering and technical implementation of the mathematical model of numerical measures of analysis of recurrent diagrams of the dynamics of polluted air and human health risk to identify recurrence of polluted atmospheres and on their basis to prevent man-made emergencies due to the presence of harmful substances in atmospheric air. Assessing the risks of immediate toxic effects and chronic intoxication for people caused by a polluted atmosphere. Substantiation of adequate management decisions aimed at reducing the risk to human health due to the presence of harmful substances in the air, by eliminating the injection of harmful substances that emit.

**Keywords:** emergency situations, emergency prevention, critical infrastructure facility, engineering method, air environment.

*List of applicant's publications*

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

*Monograph:*

1. Pospelov B. B., Andronov V. A., Rybka E. A., **Meleshchenko R. G.**, Karpets K. M. Razrobotka konstruktivnyh metodov povysheniya jeffektivnosti avtomaticheskogo obnaruzhenija vozgoranij v kompressornyh stancijah gazotransportnyh sistem Ukrainy. Monografija. Har'kov: NUCZU, 2018. 172 p.

*Articles in foreign professional publications*

2. **Meleshchenko R. G.** System analysis of prevention of man-made emergency situations in consequence of fire in the premises of the object // ScienceRise. 2020. Issue 1 (66). P. 38–46. doi: 10.21303/2313-8416.2020.001150

*Articles in scientific professional publications of Ukraine, part of the international scientometric database Scopus*

3. Pospelov B., Rybka E., **Meleshchenko R.**, Gornostal S., Shcherbak S. Results of experimental research into correlations between hazardous factors of ignition of materials in premises // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Volume 6. Issue 10 (90). P. 50–56.

4. Pospelov B., Petukhova O., **Meleshchenko R.**, Gornostal S., Shcherbak S. Development of communication models of wireless environment in emergency situations // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Volume 2. Issue 9 (92). P. 40–47.

5. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., **Meleshchenko R.**, Borodych P. Studying the recurrent diagrams of carbon monoxide concentration at early

ignitions in premises // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Volume 3. Issue 9 (93). P. 34–40.

6. Korytchenko K., Markov V., Polyakov I., **Meleshchenko R.** Validation of the numerical model of a spark channel expansion in a low-energy atmospheric pressure discharge // *Problems of Atomic Science and Technology. Plasma Electronics and New Methods of Acceleration*. 2018. Volume 10. Issue 4 (116). P. 144–149.

7. Ozerov A., Vinnikov D., Skob Yu., **Meleshchenko R.** Numerical simulation of influence of the non-equilibrium excitation of molecules on direct detonation initiation by spark discharge // *Problems of Atomic Science and Technology. Plasma Electronics and New Methods of Acceleration*. 2018. Volume 10. Issue 4 (116). P. 194–199.

8. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., **Meleshchenko R.**, Gornostal S. Analysis of correlation dimensionality of the state of a gas medium at early ignition of materials // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Volume 5. Issue 10 (95). P. 25–30.

9. Korytchenko K., Kasimov A., Golota V., Ajmani S., Dubinin D., **Meleshchenko R.** Experimental investigation of arc column expansion generated by high-energy spark ignition system // *Problems of Atomic Science and Technology. Plasma Physics*. 2018. Volume 24. Issue 6 (118). P. 225–228.

10. Pospelov B., Rybka E., **Meleshchenko R.**, Borodych P., Gornostal S. Development of the method for rapid detection of hazardous atmospheric pollution of cities with the help of recurrence measures // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Volume 1. Issue 10 (97). P. 29–35. doi: 10.15587/17294061.2019.155027

11. Pospelov B. B., **Meleshchenko R. G.**, Kosse A. G., Khmyrov I. M., Bosniuk V. F. Development of a method for predicting the recurrence of states of atmospheric air pollution concentration in industrial cities // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Volume 2. Issue 10 (98). P. 43–48. doi: 10.15587/1729-4061.2019.162652

12. Pospelov B., Andronov V., **Meleshchenko R.**, Danchenko Yu., Artemenko I., Romaniak M., Khmyrova A., Butenko T. Construction of methods for computing recurrence plots in space with a scalar product // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Volume 3. Issue 4 (99). P. 37–44. doi: 10.15587/1729-4061.2019.169887

13. Pospelov B., Rybka E., Togobytska V., **Meleshchenko R.**, Danchenko Yu., Butenko T., Volkov I., Hafurov O., Yevsieiev V. Construction of the method for semi-adaptive threshold scaling transformation when computing recurrent plots // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Volume 4. Issue 10 (100). P. 22–29. doi: 10.15587/1729-4061.2019.176579

14. Pospelov B., Rybka E., **Meleshchenko R.**, Asotskyi V., Petukhova O., Gornostal S., Harbuz S. Development of a self-adjusting method for calculating recurrent diagrams in a space with a scalar product // EUREKA: Physics and Engineering. 2019. Issue 5. P. 10–18.

15. Pospelov B., **Meleshchenko R.**, Krainiukov B., Karpets K., Petukhova O., Bezuhla Yu., Butenko T., Horinova V., Borodych P., Kochanov E. A method for preventing the emergency resulting from fires in the premises through operative control over a gas medium // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Volume 1. Issue 10 (103). P. 6–13. doi: 10.15587/1729-4061.2020.194009

16. Pospelov B., Rybka E., **Meleshchenko R.**, Krainiukov O., Harbuz S., Bezuhla Yu., Morozov I., Kuruch A., Saliyenko O., Vasylichenko R. Use of uncertainty function for identification of hazardous states of atmospheric pollution vector // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Volume 2. Issue 10 (104). P. 6–12. doi:10.15587/1729-4061.2020.200140

17. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Krainiukov O., Maksymenko N., **Meleshchenko R.**, Bezuhla Yu., Hrachova I., Nesterenko R., Shumilova A. Mathematical model of determining a risk to the human health along with the detection of hazardous states of urban atmosphere pollution based on measuring the current concentrations of pollutants // Eastern-European Journal of Enterprise. 2020. Volume 4. Issue 10 (106). P. 37–44. doi:10.15587/1729-4061.2020.210059

*Articles in scientific professional publications of Ukraine, included in other international scientometric databases:*

18. **Meleshchenko R. G.**, Muntyan V. K., Kovregin V. V. Imitatsionnaya model' sozdaniya protivopozharnogo bar'yera sovместnymi usiliyami aviatsionnykh i nazemnykh sil // Problemy pozharnoy bezopasnosti: Sbornik nauchnykh trudov. Khar'kov: NUGZU. Volume 37. 2015. P. 142–149.

19. **Meleshchenko R. G.**, Muntyan V. K., Tarasenko A. A. Justification of the approach for calculating the parameters of aviation emergency and rescue operations when using visual search // Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy: Zbirnyk naukovykh prats'. Kharkiv: NUGZU. Volume 25. 2017. P. 67–72.

20. Khyly'ko Yu. V., **Meleshchenko R. G.** Vyznachennya parametriv vohnehasnoyi efektyvnosti vykydu poroshkovykh sumishey z konteyneriv // Problemy pozharnoy bezopasnosti: Sbornyk nauchnykh trudov. Khar'kov: NUGZU. Volume 41. 2017. P. 196–200.

21. **Meleshchenko R. G.**, Dureev V. O. Mathematical model of thermal fire detector with the thermistor // Problemy pozharnoy bezopasnosti: Sbornik nauchnykh trudov. Harkov: NUGZU. Volume 44. 2018. P. 89–92.

22. **Meleshchenko R. G.** Predotvrashenie chrezvychajnykh situacij na obektah kriticheskoy infrastruktury putem rannego vyyavleniya zagryaznenij vozduha // Problemi nadzvichajnih situacij: zb. nauk. prac. 2018. №28. P. 69–82.

23. Pospelyov B. B., **Meleshchenko R. G.**, Prokopenko O. V., Melnichenko A. S. Mery rekurrentnosti i metodika ih ispolzovaniya dlya izucheniya i prognozirovaniya dinamiki sostoyaniya ekosistem // Problemi nadzvichajnih situacij: zb. nauk. prac. 2019. №29. P. 14–28.

24. **Meleshchenko R. G.** Model dlya vyyavleniya ugroz vzniknoveniya chrezvychajnykh situacij tehnogennoho harakteras pomoshyu monitoringa temperatury v pomesheniyah obekta // Problemy pozharnoy bezopasnosti: Sbornik nauchnykh trudov. Harkov: NUGZU. Volume 45. 2019. P. 117–124.

25. **Meleshchenko R. G.** Inzhenerno-tehnicheskij metod preduprezhdeniya chrezvychajnykh situacij tehnogennoho haraktera s pomoshyu kontrolya

zagryazneniya atmosfernogo vozduha // Problemi nadzvichajnih situacij: zb. nauk. prac. 2019. №30. P. 85–97.

26. Pospelov B. B., Rybka E. A., **Meleshchenko R. G.**, Borodich P. Yu., Samojlov M. A. Metod rannego obnaruzheniya opasnoj situacii v pomesheniyah na osnove korrelyacionnoj razmernosti opasnyh faktorov gazovoj sredy // Problemy pozharnoj bezopasnosti: Sbornik nauchnyh trudov. Harkov: NUGZU. Volume 46. 2019. P. 143–154.

27. **Meleshchenko R. G.** Rannee vyyavlenie pozhara na osnove kontrolya dinamiki sostoyaniya gazovoj sredy v pomesheniyah // Problemy pozharnoj bezopasnosti: Sbornik nauchnyh trudov. Harkov: NUGZU. Volume 47. 2020. P. 71–80.

28. Pospelyov B. B., Rybka E. O., **Meleshchenko R. G.**, Samojlov M. O., Karpec K. M., Bezuglaya Yu. S. Inzhenerno-tehnicheskij metod preduprezhdeniya chrezvyhajnyh situacij tehnogenogo haraktera putem operativnogo kontrolya sostoyaniya gazovoj sredy v pomesheniyah obekta // Problemi nadzvichajnih situacij: zb. nauk. prac. 2020. Volume 31. P. 234–246.

29. Pospelov B. B., Rybka Ye. A., **Meleshchenko R. G.**, Samoylov M. A., Bezuglaya YU. S. Metody vychisleniya mer tekushchey rekurrentnosti fluktuatsiy sostoyaniya gazovoy sredy dlya rannego vyyavleniya pozhara v pomeshcheniyakh // Problemy pozharnoy bezopasnosti: Sbornik nauchnykh trudov. Khar'kov: NUGZU. Vyp. 48. 2020. P. 136–146.

30. Pospelov B. B., Andronov V. A., Rybka Ye. A., **Meleshchenko R. G.**, Samoylov M. A., Borodich P. YU. Risk narusheniye normal'nykh usloviy zhiznedeyatel'nosti cheloveka pri tekhnogennykh chrezvychaynykh situatsiyakh // Problemi nadzvichaynykh situatsiy: zb. nauk. prats'. 2020. №32. P. 31–43.

***Patents:***

31. 1. Systema rann'oho vyyavleniya nadzvychaynykh sytuatsiy Pospelov B. B., Andronov V. A., Rybka E. O., **Meleshchenko R. G.**, Karpets K. M., Horinova V. V., Samoylov M. O. Pat. 139221 Ukrayiny, MPK G08V 19/00

(2019.01), zayavnyk ta patentovlasnyk Natsional'nyy universytet tsyvil'noho zakhystu Ukrayiny. № u 2019 06486, zayavka 10.06.2019, opub. 26.12.2019, Byul. №24.

32. 2. Sposib hasinnya pozhezhi mobil'nym robotom / Andronov V. A., Rybka E. O., Karpets K. M., Semkiv O. M., **Meleshchenko R. G.**, Melnychenko A. S., Butenko T. Yu., Pat. 132449 Ukrayiny, MPK G01N 3/24 (2006.01), zayavnyk ta patentovlasnyk Natsional'nyy universytet tsyvil'noho zakhystu Ukrayiny. № u 2019 09788, zayavka 01.10.2019, opub. 25.02.2019, Byul. №4.

***Scientific works that certify the approbation of the dissertation materials:***

33. **Meleshchenko R. G.**, Lenfira A. V. Analiz sposobiv ta shlyahiv provedennya ryatuvannya lyudej // Naukove zabezpechennya diyalnosti operativno-ryatuvalnih pidrozdiliv (teoriya ta praktika): zbirnik materialiv Vseukrayinskoyi naukovo-praktichnoyi konferenciyi, 12 bereznya 2015 roku, Harkiv: NUCZ Ukrayini, 2015. P. 180–181.

34. **Meleshchenko R. G.**, Ishuk V. M. Statistichnij analiz ta prognoz neshasnih vipadkiv // Bezpeka zhittyediyalnosti lyudini yak umova stalogo rozvitku suchasnogo suspilstva: Zbirnik tez VI Mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferenciyi. 8-9 chervnya 2017 r. Kiyiv: Tavrijskij Nacionalnij universitet imeni V. I. Vernadskogo, 2017. P. 85–90.

35. **Meleshchenko R. G.**, Muntyan V. K., Tarasenko O. A. Zastosuvannya aviacyi pri provedenni poshukovo-ryatuvalnih robit // Materiali naukovo-praktichnogo seminaru «Zapobigannya nadzvichajnim situaciyam i yih likvidaciya». 7 lyutogo 2018 r. Harkiv: NUCZ Ukrayini, 2018. P. 137–140.

36. Gornostal S. A., **Meleshchenko R. G.** Investigation of the characteristics of the internal firefighting water pipeline elements // Proceedings of the 2nd Annual Conference Technology transfer: fundamental principles and innovative technical solutions 23 November 2018. Tallinn, Estonia, 2018. P. 55–57.

37. Pospelov B. B., Andronov V. A., Rybka E. A., **Meleshchenko R. G.**, Mel'nichenko A. S. Operativnyy metod otsenki vliyaniya chrezvychnykh situatsiy na okruzhayushchuyu atmosferu // Istoricheskiye aspekty, aktual'nyye problemy i perspektivy razvitiya grazhdanskoy oborony: sbornik tezisov i dokladov VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii ad'yunktov, magistrantov, kursantov i studentov. 15 marta 2019. Kokshetau, RGU «KTI KCHS MVD Respubliki Kazakhstan». 2019. P. 188–192.

38. **Meleshchenko R. G.**, Ivanov Ye. V. Zapobihannya nadzvychnym sytuatsiyam tekhnolohicheskoho kharakteru na ob'ektakh krytychnoyi infrastruktury shlyakhom rann'oho vyyavlennya zahroz // Problemy ta perspektyvy zabezpechennya tsyvil'noho zakhystu: materialy mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi molodykh uchenykh. Kharkiv: NUTSZU, 2019. P. 36.

39. Pospelov B. B., **Meleshchenko R. G.**, Prokopenko O. V., Mel'nychenko A. S. Systemnyy aspekt predotvrashchenyya chrezvychnykh sytuatsiy na ob'ektakh krytycheskoy ynfrastruktury // Teoriya i praktyka hasinnya pozhezh ta likvidatsiyi nadzvychnykh sytuatsiy: materialy KH Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi. 11-12 kvitnya 2019 roku. Cherkasy. 2019. P. 62–64.

40. Pospelov B. B., Andronov V. A., Rybka E. A., **Meleshchenko R. G.**, Samoylov M. A. Systemnyy podkhod k obespechenyyu ékolohycheskoy bezopasnosti razvytyya énerhetyky // Fyzyko-tekhnichni problemy enerhetyky ta shlyakhy yikh vyrishennya 2019: materialy Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi. 19 chervnya 2019. Kharkiv. 2019. P. 57–58.

41. Pospelov B. B., Andronov V. A., Rybka E. O., **Meleshchenko R. G.**, Samoylov M. O. Paradigma zapobihannya nadzvychnym sytuatsiyam, pov'yazanykh iz zabrudnenniam atmosfery mist // Rozvytok tsyvil'noho zakhystu v suchasnykh bezpekovykh umovakh: materialy 21 Vseukrayins'koyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi (za mizhnarodnoyu uchastyu). 8 zhovtnya 2019 roku. Kyiv, IDUTSZ. 2019. P. 218–221.

42. **Meleshchenko R. G.** Metod predotvrashchenyya chrezvychnykh sytuatsiy // Problemy ta perspektyvy zabezpechennya tsyvil'noho zakhystu:



materialy mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi molodykh uchenykh. Kharkiv: NUTSZU, 2020. P. 25.

43. Pospelov B. B., Andronov V. A., Rybka E. A., **Meleshchenko R. G.**, Samoylov M. A. Metod preduprezhdenyya chrezvychaynykh sytuatsyy tekhnohennoho kharaktera na osnove tekushchey korrelyatsyonnoy razmernosti sostoyannya hazovoy sredy v pomeschenyyakh ob"ekta // Problems of Emergency Situations: Materialy Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi. Kharkiv: Natsional'nyy universytet tsyvil'noho zakhystu Ukrayiny, 2020. C. 134–136.

44. Pospelov B. B., Rybka E. A., **Meleshchenko R. G.**, Bezuglaya Yu. S., Samojlov M. A. Novaya receptornaya model atmosferyh zagryaznenij dlya preduprezhdeniya i operativnogo upravleniya likvidaciej posledstvij chrezvychajnykh situacij // Nadzvichajni situaciyi: bezpeka ta zahist: materialy H Vseukrayinskoyi naukovo-praktichnoyi konferenciyi z mizhnarodnoyu uchastyu. 29-30 zhovtnya 2020 roku. Cherkasi: ChIPB imeni G. Chornobilya UCZ Ukrayini, 2020. C. 282–284.

## ЗМІСТ

<b>АНОТАЦІЯ</b> .....	2
<b>ЗМІСТ</b> .....	26
<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ</b> .....	33
<b>ВСТУП</b> .....	34
<b>РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН РЕАГУВАННЯ ТА ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ НА НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТАХ</b> .....	44
1.1 Національна та міжнародні класифікації надзвичайних ситуацій..	44
1.2 Надзвичайні ситуації (аварії) на небезпечних об'єктах.....	46
1.2.1 Характер можливих надзвичайних ситуацій (аварій).....	47
1.2.2 Надзвичайні ситуації (аварії) на електростанціях.....	47
1.2.3 Надзвичайні ситуації (аварії) на хімічно-небезпечних об'єктах.....	54
1.2.4 Надзвичайні ситуації (аварії) на нафтохімічних виробництвах та об'єктах нафто- та газотранспортної системи.....	57
1.3 Аналіз причин виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру на небезпечних об'єктах.....	60
1.4 Стан питання щодо попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на небезпечних об'єктах.....	67
Висновки розділу 1.....	77
<b>РОЗДІЛ 2 СТАН ТА ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ НА ОБ'ЄКТАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ</b> .....	79
2.1 Характеристика об'єктів критичної інфраструктури України.....	79

2.2	Уразливість і стійкість об'єктів критичної інфраструктури в надзвичайних ситуаціях.....	82
2.2.1	Вибухопожежна безпека.....	84
2.2.2	Токсична безпека.....	95
2.3	Методи та засоби, які забезпечують попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури.....	106
2.4	Системний аналіз виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури...	121
	Висновки розділу 2.....	124
<b>РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНОГО МЕТОДУ ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ ВНАСЛІДОК ПОЖЕЖ (ВИБУХІВ) ЗА ДОПОМОГОЮ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ СТАНУ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИМІЩЕНЬ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ.....</b>		
3.1	Розробка математичної моделі поточних показників фрактальності для флуктуацій станів повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях об'єктів.....	127
3.1.1	Експериментальні дослідження сумісної динаміки небезпечних факторів повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях об'єктів.....	128
3.1.2	Розробка математичної моделі міри автокореляцій і взаємних кореляцій небезпечних факторів повітряного середовища при ранніх загоряннях у приміщеннях об'єктів.....	133
3.1.3	Розробка математичної моделі для поточних показників фрактальності прирощень станів повітряного середовища при загорянні в приміщеннях об'єктів.....	135

3.1.3.1	Розробка поточної міри кореляційної розмірності прирощення станів повітряного середовища при загорянні в приміщеннях об'єктів.....	136
3.1.3.2	Розробка поточної міри рекурентності прирощень станів газового середовища при загорянні в приміщеннях об'єктів....	139
3.1.3.3	Опис математичної моделі для поточних показників фрактальності флуктуацій станів повітряного середовища при загорянні в приміщеннях об'єктів.....	141
3.2	Розробка управляючого алгоритму інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища приміщень об'єктів критичної інфраструктури.....	142
3.3	Опис процедури застосування для управляючого алгоритму інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища приміщень об'єктів критичної інфраструктури.....	144
	Висновки розділу 3.....	147
	<b>РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНОГО МЕТОДУ ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ ОБУМОВЛЕНИХ НАЯВНІСТЮ В АТМОСФЕРНОМУ ПОВІТРІ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН НА ТЕРИТОРІЇ (ПОБЛИЗУ) ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ...</b>	<b>151</b>
4.1	Розробка математичної моделі чисельних мір аналізу рекурентних діаграм динаміки станів забрудненого атмосферного повітря та ризику здоров'ю людей.....	151

4.1.1	Загальне вирішення завдання визначення рекурентних діаграм динаміки станів забрудненого атмосферного повітря за поточними вимірами концентрації атмосферних забруднень.....	152
4.1.2	Розробка чисельних мір рекурентних станів забрудненого атмосферного повітря на основі рекурентних діаграм.....	163
4.1.3	Розробка чисельних мір рекурентних станів забрудненого атмосферного повітря на основі функції невизначеності.....	167
4.1.4	Вирішення завдання оцінки ризику здоров'ю людей внаслідок забруднення атмосферного повітря.....	172
4.1.5	Критерії оцінки ризиків здоров'ю людей внаслідок забруднення атмосферного повітря.....	181
4.1.6	Опис розробленої математичної моделі чисельних мір аналізу рекурентних діаграм динаміки станів забрудненого атмосферного повітря та ризику здоров'ю людей.....	189
4.2	Розробка управляючого алгоритму інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури.....	192
4.3	Опис процедури реалізації інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури.....	197
4.4	Розробка променевих комунікативних моделей бездротового середовища в надзвичайних ситуаціях техногенного характеру унаслідок наявності в атмосферному повітрі шкідливих речовин.....	199

4.4.1	Двох точкова променева комунікативна модель бездротового середовища.....	200
4.4.2	Багато точкова променева комунікативна модель бездротового середовища.....	203
	Висновки розділу 4.....	206
	<b>РОЗДІЛ 5 ПЕРЕВІРКА РОЗРОБЛЕНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИХ МЕТОДІВ.....</b>	<b>210</b>
5.1	Експериментальна перевірка розробленої математичної моделі та інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища приміщень об'єктів критичної інфраструктури.....	211
5.1.1	Опис лабораторного комплексу для експериментального дослідження особливостей динаміки стану небезпечних факторів повітряного середовища в негерметичному приміщенні при ранніх загоряннях.....	212
5.1.2	Експериментальна перевірка міри автокореляцій і взаємних кореляцій небезпечних факторів повітряного середовища при ранніх загоряннях у приміщеннях об'єктів.....	216
5.1.3	Експериментальна перевірка розробленої математичної моделі для поточних показників фрактальності станів повітряного середовища при загорянні в приміщеннях об'єктів.....	220
5.1.3.1	Експериментальна перевірка поточної міри кореляційної розмірності для прирощення станів повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях об'єктів.....	221
5.1.3.2	Експериментальна перевірка поточної міри рекурентності прирощень станів повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях об'єктів.....	226

5.1.4	Показники достовірності інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища приміщень об'єктів критичної інфраструктури.....	229
5.2	Експериментальна перевірка розробленої математичної моделі та інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури.....	240
5.2.1	Опис особливостей експериментальних досліджень концентрацій шкідливих речовин в атмосферному повітрі на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури.....	241
5.2.2	Експериментальна перевірка розробленої математичної моделі чисельних мір аналізу рекурентних діаграм динаміки станів забруднення атмосферного повітря та ризику здоров'ю людей	243
5.2.2.1	Експериментальна перевірка запропонованих методів визначення рекурентних діаграм динаміки станів забруднення атмосферного повітря за поточними вимірами концентрації забруднень.....	244
5.2.2.2	Експериментальна перевірка запропонованих чисельних мір рекурентних станів забруднення атмосферного повітря на основі рекурентних діаграм.....	252
5.2.2.3	Експериментальна перевірка запропонованих чисельних мір рекурентних станів забруднення атмосферного повітря на основі функції невизначеності.....	259
5.2.2.4	Експериментальна перевірка ризику негайних ефектів і хронічної інтоксикації від концентрацій шкідливих речовин, що забруднюють атмосферне повітря на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури.....	265

5.2.3	Перевірка достовірності інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури.....	269
5.3	Валідація двох точкової та багато точкової променевих комунікативних моделей бездротового середовища для тестових умов надзвичайних ситуацій .....	280
	Висновки розділу 5.....	287
	<b>РОЗДІЛ 6 ВАРІАНТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИХ МЕТОДІВ.....</b>	<b>292</b>
6.1	Комплексна система оперативного контролю та управління станом повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури.....	292
6.2	Система поточного вимірювання стану повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури.....	296
6.3	Система підтримки прийняття оперативного рішення щодо стану повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури.....	303
6.4	Особливості структури комплексної системи оперативного контролю та управління станом повітряного середовища на великих територіях.....	308
	Висновки розділу 6.....	309
	<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>312</b>
	<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>317</b>
	<b>ДОДАТОК А.....</b>	<b>363</b>
	<b>ДОДАТОК Б.....</b>	<b>372</b>



**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

RP	– рекурентні діаграми;
RQA	– оцінка рекурентності станів;
AEC	– атомна електростанція;
BC	– бездротове середовище;
БПЛА	– безпілотний літальний апарат;
БПП	– безпілотна рухома платформа;
ВООЗ	– Всесвітня організація охорони здоров'я;
ГДК	– граничнодопустима концентрація;
ГДК <sub>м.р.</sub>	– максимальна разова граничнодопустима концентрація;
ГДК <sub>р.з.</sub>	– граничнодопустима концентрація для повітря робочої зони;
ГДК <sub>с.д.</sub>	– середньодобова граничнодопустима концентрація;
ДСНС	– Державна служба України з надзвичайних ситуацій;
KP	– кореляційна розмірність;
НС	– надзвичайна ситуація;
НХР	– небезпечна хімічна речовина;
ОКІ	– об'єкт критичної інфраструктури;
РС	– рекурентність станів;
СДОР	– сильнодіюча отруйна речовина;
ТЕС	– теплова електростанція;
ТЕЦ	– теплоелектроцентрально;
ФН	– функція невизначеності.

## Вступ

**Обґрунтованість теми.** Будь-яка надзвичайна ситуація (НС) передбачає одночасну наявність об'єкта небезпеки (джерела небезпеки) та відповідного об'єкта її впливу. Щорічно кількість НС техногенного характеру більш ніж втричі перевищує число НС природного, соціального та воєнного характеру. При цьому спостерігається стійка тенденція щодо зростання загальної кількості НС, в першу чергу за рахунок розширення числа та типів об'єктів небезпек. У разі НС об'єкт небезпеки, діючи на об'єкт впливу, призводить до великої кількості постраждалих, загрози життю та здоров'ю людей, їх загибелі, значним матеріальним утратам, руйнування або знищення об'єктів промисловості, а також завдає серйозної шкоди навколишньому середовищу. Особливо гостро це питання стоїть по відношенню до критичної інфраструктури, яка представляє сукупність стратегічно важливих об'єктів для економіки і національної безпеки, порушення функціонування яких може завдати значної шкоди життєво важливим національним інтересам.

Слід зауважити, що в багатьох випадках передумови для появи об'єктів небезпек в техногенній сфері, що приводять до НС, створює сама людина. Тому в процесі виробничої діяльності людини необхідно мінімізувати можливість появи вказаних об'єктів небезпеки. Одним із дієвих напрямків недопущення виникнення НС техногенного характеру є попередження НС, заснованого на зниженні можливості або недопущенню появи об'єктів небезпеки. Світова практика свідчить про те, що реалізація методів та засобів попередження НС дозволяє уникнути їх виникнення або скоротити в 2–3 рази витрати на ліквідацію наслідків. При цьому попередження НС дозволяє значно зменшити або повністю уникнути небезпечного впливу на населення територій.

Ефективною парадигмою протидії існуючій тенденції зростання кількості НС техногенного характеру є застосування систем раннього виявлення об'єктів небезпеки. При цьому усі об'єкти можливої небезпеки діють на об'єкти впливу через повітряне середовище. Тому стан повітряного середовища першим реагує

на появу об'єктів небезпек. Це означає, що важливою інформацією щодо попередження НС техногенного характеру є стан повітряного середовища в приміщеннях, на території об'єктів критичної інфраструктури (ОКІ) та за межами таких об'єктів. Завдяки цьому оперативний контроль стану повітряного середовища дозволяє виявляти дієві передвісники НС, пов'язані із об'єктами небезпеки щодо загорянь, вибухів та токсичною небезпекою внаслідок забруднення атмосферного повітря понад граничнодопустимих концентрацій (ГДК). Складність використання стану повітряного середовища у якості передвісника появи об'єктів небезпеки обумовлюється тим, що повітряне середовище в умовах появи об'єктів небезпеки являє собою складну нелінійну динамічну систему, яка характеризується властивостями дисипації та самоорганізації. У такій системі класичні методи не дозволяють виявляти динаміку станів, оскільки ґрунтуються на лінійних принципах, які зазвичай порушуються. Це призводить до помилкових уявлень про реальну динаміку стану повітряного середовища при появі об'єктів небезпеки. Однак характер динаміки стану повітряного середовища при появі об'єкту небезпеки має першорядне значення для попередження НС, які пов'язані з ураженням і загибеллю людей, руйнуванням технологічного обладнання та агрегатів, викидів небезпечних речовин в атмосферне повітря.

При цьому, динаміка станів повітряного середовища не є довільною і підпорядковується фундаментальному принципу дисипативних динамічних систем, який полягає в тому, що окремі стани відповідають рекурентним властивостям. Відомим дієвим інструментом для виявлення рекурентних станів складних динамічних систем є методи рекурентних діаграм (RP). Дані методи відносяться до класу візуальних та не дозволяють використовувати їх щодо попередження НС. Крім того вони є основою більшості сучасних методів щодо кількісної оцінки рекурентних станів (RQA). Однак, можливості відомих методів RP та RQA відповідно до оперативного контролю стану повітряного середовища є досить обмеженими. Застосування цих методів щодо попередження НС техногенного характеру на теперішній час не використовується.

У зв'язку з цим, створення нових методів попередження НС техногенного характеру на ОКІ за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) об'єктів є актуальною та важливою науковою проблемою у сфері цивільного захисту.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалася в рамках Стратегії національної безпеки України, затвердженої Указом Президента України від 26.05.2015 року № 287/2015, Державної програми «Енергетична стратегія України на період до 2030 року», затвердженої постановою Кабінету Міністрів України № 145-р від 15.03.2006 року, 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. Наукові дослідження за темою дисертації виконувалися у відповідності до Тематичних планів на 2015–2020 рр. прикладних науково-дослідних робіт Національного університету цивільного захисту України, зокрема «Запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури шляхом раннього виявлення загроз» (№ ДР 0119U001008). Здобувач був відповідальним виконавцем даної науково-дослідної роботи.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є розробка нових інженерно-технічних методів попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) об'єктів в інтересах їх недопущення.

Для досягнення поставленої мети потребували вирішення наступні наукові завдання:

1. Проаналізувати світові тенденції реагування та попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на небезпечних об'єктах.

2. Розглянути стан та особливості процесу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури.

3. Розробити інженерно-технічний метод попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища приміщень об'єктів критичної інфраструктури.

4. Розробити інженерно-технічний метод попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури та комунікативні моделі бездротового середовища щодо реалізації метода на основі використання безпілотних рухомих платформ.

5. Перевірити достовірність розроблених математичних моделей та інженерно-технічних методів.

6. Запропонувати пропозиції щодо впровадження розроблених математичних моделей та інженерно-технічних методів.

**Об'єкт дослідження:** процес попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища.

**Предмет дослідження:** параметри стану повітряного середовища щодо раннього виявлення об'єктів небезпеки та попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури.

**Методи дослідження:** математичне та імітаційне моделювання, методи системного аналізу, теорії ймовірностей, математичної статистики, теорії нелінійної динаміки, фрактального та рекурентного аналізу, а також мір рекурентних станів.

**Наукова новизна отриманих результатів.** В роботі вирішена важлива наукова проблема у сфері цивільного захисту – створення нових методів попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах

критичної інфраструктури за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища у приміщеннях та на території (поблизу) об'єктів.

В результаті вперше отримані наступні наукові результати:

1. Розроблено математичну модель попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища приміщень об'єктів критичної інфраструктури, яка базується на поточних показниках фрактальності прирощень стану повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях та складається з двох аналітичних залежностей: залежності поточної міри кореляційної розмірності від прирощень станів повітряного середовища, функціоналу норми, ширини вікна усереднення та розміру околиці, що визначає рекурентні стани; залежності поточної міри щодо рекурентних станів від прирощень станів повітряного середовища приміщень, функціоналу норми та розміру околиці, який визначає рекурентні стани.

2. Розроблено математичну модель попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури з урахуванням ризику здоров'ю людини, яка складається з восьми аналітичних залежностей: залежності обчислення рекурентних діаграм від поточних вимірюваних станів забрудненої атмосфери, функціоналу норми і порогу рекурентних станів; залежності обчислення рекурентних діаграм, що самоналаштовуються за поточними вимірами станів забрудненої атмосфери при заданій величині кута рекурентних станів між вимірюваними векторами; залежності рекурентних станів забрудненої атмосфери від поточного усереднення для першої та другої залежності; залежності рекурентних станів забрудненої атмосфери від значення функції невизначеності для відповідних векторів вимірюваних станів щодо заданого інтервалу спостереження та поточного усереднення у вікні без обчислення рекурентних діаграм; залежності ризику негайних токсичних ефектів та

хронічної інтоксикації від концентрацій для довільних небезпечних речовин, що забруднюють атмосферне повітря.

3. Розроблено інженерно-технічний метод попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища приміщень об'єктів критичної інфраструктури, який дозволяє на ранньому етапі виявляти загоряння та не допускати їх подальше переростання в надзвичайні ситуації.

4. Розроблено інженерно-технічний метод попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру унаслідок наявності в атмосферному повітрі шкідливих речовин, який дозволяє попередити появу ризику здоров'ю населення понад величину прийнятого допустимого індивідуального ризику та не допустити виникнення надзвичайних ситуацій, пов'язаних з наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин, небезпечних для людини.

5. Розроблено комплексну систему оперативного контролю та управління станом повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури (у складі діючого зразка безпілотної рухомої платформи з елементами живлення, системи навігації, бездротового керування та телеметрії, набору сенсорів, системи реєстрації, передачі та приймання інформації), яка реалізує розроблені математичні моделі та інженерно-технічні методи.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в розробці нового підходу до попередження НС техногенного характеру внаслідок пожеж в приміщеннях ОКІ та наявності в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території та поблизу таких об'єктів, де визначальним є використання результатів реальних вимірювань тільки концентрації небезпечних факторів пожежі у повітряному середовищі приміщень та шкідливих речовин в атмосферному повітрі. На відміну від відомих підходів, підхід що пропонується, є універсальним і може бути використаний на практиці щодо різних типів об'єктів та конфігурації оточуючої об'єкти інфраструктури і метеорологічних умов. Розроблено практичні алгоритми

щодо реалізації запропонованих інженерно-технічних методів попередження НС техногенного характеру на основі використання широкого кола сучасних програмованих мікропроцесорів. За умови використання запропонованих алгоритмів на базі мікропроцесорів класу Arduino розроблено мобільний комплекс для оперативного контролю стану повітряного середовища приміщень та атмосферного повітря на території (поблизу) ОКІ. Використання мобільного комплексу дозволяє на практиці здійснювати попередження виникнення НС внаслідок пожеж в приміщеннях ОКІ та наявності в атмосферному повітрі шкідливих речовин понад ГДК на території та поблизу таких об'єктів з метою недопущення або зменшення числа постраждалих та загиблих людей, зниження матеріальних втрат, а також забезпечення безпечного та безперебійного функціонування стратегічних об'єктів держави.

Результати дисертаційного дослідження використані в практичній діяльності Єдиної державної системи цивільного захисту України в ході пілотного впровадження на об'єкті критичної інфраструктури Шебелинський газопереробний завод АТ «Укргазвидобування» (Акт впровадження від 12.10.2020 року), ТОВ «Хладпром» (Акт впровадження від 16.10.2020 року), які знаходяться в зоні відповідальності ГУ ДСНС України в Харківській області та в навчальний процес Львівського державного університету безпеки життєдіяльності (Акт впровадження від 20.10.2020 року).

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором особисто. Особисто здобувачем виконано збір даних літературних та інформаційних джерел, систематизацію матеріалу щодо сучасного стану реагування та методів попередження НС техногенного характеру на небезпечних об'єктах. Особливу увагу приділено аналізу національній та міжнародній класифікації НС на небезпечних об'єктах хімічної, нафтохімічної та газотранспортної сфер. Розглянуто детальніше стан питання щодо попередження НС техногенного характеру на ОКІ. Проаналізовано уразливість і стійкість ОКІ в НС, а саме вибухова небезпека,



небезпека загорянь та токсична небезпека. Розглянуті засоби і системи, що забезпечують попередження НС техногенного характеру на ОКІ України.

Особисто здобувачем розроблені математична модель попередження НС техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища приміщень ОКІ, яка дозволяє на основі вимірювання поточних показників фрактальності флуктуацій стану повітряного середовища на ранньому етапі виявляти загоряння у приміщеннях в залежності від параметрів, що визначають їх якість; математична модель попередження НС техногенного характеру внаслідок наявності в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) ОКІ з урахуванням ризику здоров'ю людини, яка дозволяє у реальному часі за поточними вимірюваннями станів забрудненої атмосфери виявляти небезпечний вплив на людину в залежності від параметрів якості визначення рекурентних станів атмосферного повітря, ризику негайних токсичних ефектів та хронічної інтоксикації від концентрацій довільних небезпечних речовин, що забруднюють атмосферне повітря.

Особисто здобувачем розроблено інженерно-технічний метод попередження НС техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) на основі здійснення оперативного контролю стану повітряного середовища приміщень ОКІ, який дозволяє виявляти загоряння на ранньому етапі і не допустити їх подальше переростання в некеровані пожежі та НС та інженерно-технічний метод попередження НС техногенного характеру унаслідок наявності в атмосферному повітрі шкідливих речовин, який дозволяє за рахунок появи небезпечного ризику здоров'ю населення понад величини прийнятого допустимого індивідуального ризику попередити про небезпечний стан об'єктів без втручання на їх територію, та не допустити виникнення НС, пов'язаних з наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин, понад ГДК. Особисто здобувачем розроблено мобільний комплекс, який реалізує розроблені математичні моделі та інженерно-технічні методи, який дозволяє оперативно в керованому або автономному режимі функціонування

контролювати стан повітряного середовища як у приміщеннях об'єктів, так і зовні на території ОКІ (у складі самохідного шасі з автономними елементами живлення, системи навігації, керування та телеметрії, набору датчиків, системи реєстрації,бору, передачі та приймання інформації) та виявляти передвісники появи можливих небезпечних станів, що можуть перерости у відповідні НС. Особисто здобувачем запропоновані пропозиції щодо впровадження розроблених математичних моделей та інженерно-технічних методів, які можуть застосовуватись на ОКІ всіх форм підпорядкування та власності при штатному і аварійному режимах їх функціонування.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати роботи доповідались та обговорювались на наукових конференціях: Всеукраїнській науково-практичній конференції «Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів (теорія та практика)» (Харків, 2015), VI Міжнародній науково-практичній конференції «Безпека життєдіяльності людини як умова сталого розвитку сучасного суспільства» (Київ, 2017), Науково-практичному семінарі «Запобігання надзвичайним ситуаціям і їх ліквідація» (Харків, 2018), 2nd Annual Conference «Technology transfer: fundamental principles and innovative technical solutions» (Tallinn, Estonia, 2018), VII Международной научно-практической конференции адъюнктов, магистрантов, курсантов и студентов «Исторические аспекты, актуальные проблемы и перспективы развития гражданской обороны» (Республики Казахстан, 2019), Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту» (Харків, 2019), X Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (Черкаси, 2019), Міжнародній науково-технічній конференції «Фізико-технічні проблеми енергетики та шляхи їх вирішення» (Харків, 2019), 21 Всеукраїнській науково-практичній конференції «Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах» (Київ, 2019), Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених «Проблеми та перспективи

забезпечення цивільного захисту» (Харків, 2020), Міжнародній науково-практичній конференції «Problems of Emergency Situations» (Харків, 2020), X Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (Черкаси, 2020).

**Публікації.** За результатами дисертаційного дослідження опубліковано в Україні та закордоном 44 наукові роботи, з яких: 1 монографія; 15 наукових статей у виданнях, які входять до науково-метричної бази Scopus; 13 статей у фахових наукових виданнях України, які включені до міжнародних науково-метричних баз Index Copernicus та Ulrich's Periodicals; 1 стаття у закордонному виданні; 2 патенти; 12 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

**Структура дисертаційної роботи.** Дисертація складається з анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Загальний об'єм дисертації 378 сторінок, містить 4 таблиці, 76 ілюстрацій, список використаних джерел з 480 найменувань.

## РОЗДІЛ 1

### **СУЧАСНИЙ СТАН РЕАГУВАННЯ ТА МЕТОДІВ ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ НА НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТАХ**

В рамках вирішення першого наукового завдання розглянемо національну та міжнародні класифікації надзвичайних ситуацій, проаналізуємо характер та причини виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру на небезпечних об'єктах, а також стан питання щодо їх попередження.

#### **1.1 Національна та міжнародні класифікації надзвичайних ситуацій**

У загальному випадку під надзвичайною ситуацією (НС) розуміється подія, що відбувається на певній території або на конкретному об'єкті (підприємстві) або в акваторії (водоймі або його частини), що порушує повсякденний уклад життєдіяльності людей [1–4], яке може виникати в результаті аварій або катастроф.

Аналіз літературних даних показав, що на сьогоднішній день напрацьовано різні методи, механізми, принципи і методики цивільного захисту, оцінки обстановки у НС, захисту населення і територій від НС, техногенної та природної небезпеки, безпеки життєдіяльності. Це підтверджується проведеними дослідженнями та працями в галузі цивільного захисту таких вчених, як Азаров С. І., Бабенко О. І., Бегун В. В., Бегун С. В., Бикова О. В., Білякович М. О., Болієв О. В., Васійчук В. О., Вендичанський В. Н., Гончарук В. Є., Депутат О. П., Деревинський Д. М., Дивизинюк М. М., Джиргей В. С., Дурдинець В. В., Євдін О. М., Єлісеєв В. Н., Жидецький В. Ц.,

Заплатинський В. М., Запорожець О. І., Землянська О. В., Зеркалов Д. В., Іванов А. В., Казачков І. В., Качан С. І., Коваленко І. В., Кулаков М. А., Литвинов В. В., Ляпун В. О., Мартинюк І. М., Марущенко В. В., Матейчик В. П., Меньшов С. М., Миронець С. М., Михайлюк В. О., Міговіч Г. Г., Міхеєв Ю. В., Могильниченко В. В., Могильченко А. А. Мосов С. П., Мужик І. В., М'який В. О., Орел С. М., Осипенко С. І., Пилипчук О. Я., Письменний Е. Н., Півень Ю. О., Поспелов Б. Б., Праховнік Н. А., Пугач В. І., Пуцило В. І., Русаловський А. В., Стеблюк М. І., Сусло С. Т., Халмурадов Б. Д., Харамда Г. М., Черевко Р. І., Широков С. В., Шоботов В. М. та ін.

В Україні прийнято класифікувати НС за масштабами або рівнем наслідків на НС глобального, державного, регіонального, місцевого та об'єктового рівня [5–12], а за характером походження природного, техногенного, соціального і військового характеру.

НС природного характеру викликаються дією сил природи. Їх прийнято ототожнювати зі стихійними лихами (повені, землетруси, виверження вулканів, зсуви, селеві потоки тощо).

НС техногенного характеру виникають в результаті техногенних аварій і катастроф на виробництві, транспорті, в сфері обслуговування і т. п.

НС соціального характеру є наслідком дії окремих осіб або груп людей, або організацій, що здійснюють терористичні акти чи інші антиконституційні дії.

До НС військового характеру відносяться наслідки воєнних загроз і збройного вторгнення [13–20].

У Сполучених Штатах Америки для класифікації НС визначають характер їх виникнення, так званий генезис НС [21–23]. При такому підході вся сукупність розглянутих НС розділяється на навмисні і ненавмисні НС. До першої групи входять соціально-політичні конфлікти, а в другу – стихійні лиха, техногенні катастрофи і комбіновані НС.

У США також прийнято характеризувати НС за темпами їх розвитку [24–27]. Залежно від безпосередньої причини виникнення НС і протікання до

її кульмінації всі ситуації розділяються на вибухові та плавні. Тривалість перших – від декількох секунд до декількох годин. До них відносять екстремальні ситуації, викликані стихійними лихами, техногенними катастрофами на атомних і теплових електростанціях, аваріями на газо- і нафтопроводах, хімічних і нафтохімічних підприємствах. Тривалість плавних НС може тривати роками і десятиліттями, наприклад, ситуація в Ніагара-Фолі в місці поховання токсичних речовин, яка розвивалася протягом двадцяти років і завершилася повною евакуацією населення міста.

При цьому кількість НС техногенного характеру більш ніж втричі перевищує число таких ситуацій природного, соціального та воєнного характеру. Слід зауважити, що переважною причиною виникнення НС техногенного характеру є безпосередньо діяльність людини. Тому першочерговим завданням людства є попередження саме НС техногенного характеру.

Таким чином, НС техногенного характеру на небезпечних об'єктах – об'єктах, виробництвах, на яких використовують, виробляють, переробляють, зберігають або транспортують пожежовибухонебезпечні, радіаційно-небезпечні та хімічно-небезпечні речовини, створюють реальні загрози виникнення аварій та катастроф. Тому для ефективного реагування та попередження НС їх необхідно класифікувати.

## **1.2 Надзвичайні ситуації (аварії) на небезпечних об'єктах**

Атомні, теплові та гідроелектричні станції традиційно відносять до потенційно-небезпечних об'єктів. У ряді випадків їх також називають об'єктами критичної інфраструктури (ОКІ) [28–31], тому що вони визначають економіку і розвиток окремих галузей або регіонів держави. Аварії на таких об'єктах призводять до виникнення умов надзвичайного стану на прилеглих до них територіях протягом тривалого часу [32–35].

### **1.2.1 Характер можливих надзвичайних ситуацій (аварій)**

НС техногенного характеру на небезпечних об'єктах – порушення нормальних умов життя та діяльності людей на окремій території, об'єкті або на водному об'єкті унаслідок транспортної аварії (катастрофи), пожежі, вибуху, аварії з викиданням (загрозою викидання) небезпечних хімічних, радіоактивних і біологічно небезпечних речовин, раптового руйнування споруд; аварії в електроенергетичних системах, системах життєзабезпечення, системах телекомунікації, на очисних спорудах, у системах нафтогазового промислового комплексу, гідродинамічних аварій тощо [1].

НС техногенного походження виникають, як правило, на небезпечних об'єктах: електростанціях, хімічно-небезпечних об'єктах, нафтохімічних виробництвах та об'єктах нафто- та газотранспортної системи, радіаційно-небезпечних об'єктах, а також гідродинамічно-небезпечних об'єктах.

### **1.2.2 Надзвичайні ситуації (аварії) на електростанціях**

Щодо аварій на атомних електростанціях (АЕС), то перша серйозна аварія сталася 12 грудня 1952 року на Канадській АЕС в Чолк-Рівері, штат Онтаріо [36, 37]. В результаті технічної помилки персоналу стався перегрів і часткове розплавлення активної зони реактора. Продукти поділу потрапили в зовнішнє середовище, внаслідок чого близько 3800 м<sup>3</sup> радіоактивної (забрудненої) води було скинуто в траншеї недалеко від річки Оттава.

На АЕС «Святий Лаврентій» в 1969 році у Франції вибухнув запусканий реактор [38, 39], потужність якого становила 500 МВт. Причиною вибуху стала помилка оператора нічної зміни, який через неухважність неправильно завантажив паливний канал, що викликало перегрів і розплавлення ряду паливних елементів. З реактору витекло близько 50 кг рідкого ядерного палива.

22 березня 1975 року на реакторі АЕС «Браунз-Феррі», штат Алабама, США, через порушення заходів технічної безпеки сталася семигодинна пожежа [40–42]. Працівник з відкритим вогнем (запаленою свічкою) в руках проліз в отвір у бетонній стіні реактору для усунення протікання повітря. Вогонь свічки, підхоплений потоком повітря, поширився через кабельний канал і викликав об'ємну пожежу, яка на рік вивела АЕС з ладу.

Аварія на АЕС «Три-Майл-Айленд» у штаті Пенсільванія вважається найсерйознішим інцидентом в атомній енергетиці США [43–49]. 28 березня 1979 року в результаті серії збоїв в роботі обладнання і грубих помилок оперативного персоналу на другому енергоблоці станції сталося розплавлення активної зони реактору і викид в атмосферу радіоактивних газів – ксенону і йоду, а також скидання більш 180 м<sup>3</sup> радіоактивної води в річку Саськуеханна. З району, яка зазнала радіоактивного забруднення, було евакуйовано понад 200 тисяч людей.

В ніч з 25 на 26 квітня 1986 року сталась аварія на четвертому енергоблоці Чорнобильської АЕС [50–57]. На сьогоднішній день, ця аварія вважається найбільшою аварією в історії. Вона сталася в результаті експерименту по зняттю додаткової енергії під час роботи основного атомного реактору. Пожежа на четвертому енергоблоці тривала два тижні. В атмосферу було викинуто 190 тон радіоактивних речовин, в тому числі ядерне паливо. Забруднена територія площею понад 160 км<sup>2</sup>. До сих пір заборонений в'їзд в 30-кілометрову зону навколо Чорнобильської станції, що зазнала радіоактивного зараження.

На японській АЕС «Міхама», що знаходиться на острові Хонсю в 320 км від Токіо, 9 серпня 2004 року сталась аварія на третьому енергоблоці [58–60]. Внаслідок помилки персоналу стався вибух турбіни і викид високотемпературного пару. У момент аварії в приміщенні енергоблоку перебувало понад 200 осіб. Витоку радіоактивних матеріалів в результаті аварії не було виявлено. Чотири людини загинули і 18 сильно постраждали, отримавши каліцтва.



11 березня 2011 року в Японії в результаті землетрусу сталася аварія на АЕС «Фокусіма-1» [61–69]. В результаті аварійного відключення систем охолодження першого енергоблоку розплавилася ядерне паливо. Зовні АЕС було зафіксовано витоки радіації. У десятикілометровій зоні від АЕС була проведена евакуація. Про помилки персоналу японська сторона не заявляла, але це відзначали міжнародні експерти.

3 грудня 2014 року на Запорізькій АЕС відключився один з шести енергоблоків: 3-й енергоблок АЕС був відключений від мережі внаслідок захисту, який спрацював через несправність в вимірювальному трансформаторі [70]. Трохи пізніше в Кабінеті Міністрів України було зроблено заяву про «аварію на АЕС» [71]. Раніше, 24 листопада 2014 року, на Запорізькій АЕС під дією захисту 3-й енергоблок вже відключався. За заявами представників НАЕК «ЕНЕРГОАТОМ», інцидент вичерпано, і станція працює в штатному режимі [72].

У 2016 році, 11 квітня, на Запорізькій АЕС стався радіоактивний викид і аварійне відключення 6-го енергоблоку. 2 травня 4-й енергоблок Запорізької АЕС був відключений через несправність турбогенератора, а 6 травня він був переведений в резерв до ранку 10 травня по балансовому обмеженню потужності «Енергоатому» [73].

28 жовтня 2008 року у час проведення випробувань американського ядерного палива на Південно-Українській АЕС стався серйозний збій – відмовив контроль активної зони [74].

14 квітня на Південно-Українській АЕС сталася аварія, пов'язана з деформацією збірок тепловідділяючих елементів в активній зоні реактора 3-го енергоблоку [75].

13 липня 2012 року на Південно-Українській АЕС ледь уникли аварії. Інцидент стався на 2-му енергоблоці. При завантаженні в активну зону було пошкоджено паливо, поставлене американською компанією «Westinghouse» [76].

23 березня 2016 року о 9:40 на Південно-Українській АЕС 1-й енергоблок був відключений від енергосистеми України для проведення поточного ремонту [77].

24 червня 2016 року громадськість забила на сполох. На Південно-Українській АЕС 3-й енергоблок після закінчення ремонту намагалися неодноразово підключати до мережі, і все невдало. При цьому з 2 по 5 червня були зафіксовані перші перевищення викидів радіоактивних речовин в навколишнє середовище. 18 і 19 червня високонапірним струменем оброблялися будівлі станції, а на деяких з них були замінені пористі елементи конструкцій. Ліквідація джерел радіоактивного забруднення поки обмежена територією об'єкта [78].

27 листопада 2016 року о 13:45 на 3-му енергоблоці Південно-Української АЕС спрацював аварійний захист реактору, і він був відключений від енергомережі [79].

19 січня 2017 року о 12:29 за аварійною заявкою 3-й енергоблок Південно-Української АЕС відключено від енергомережі для визначення причин погіршення вакууму в конденсаторі турбоагрегату [80].

16 липня 2016 року 1-й енергоблок Хмельницької АЕС, розташований в Нетішині, відключений від мережі у зв'язку з наявністю протікання по парогенератору. Сталася розгерметизація першого контуру блоку і потрапляння радіоактивного теплоносія в парогенератор [81].

11 вересня 2016 року о 16:06 на 2-му енергоблоці Хмельницької АЕС були пошкоджені поручні перевантажувальної машини, що здійснювала операції по установці відпрацьованої тепловиділяючої збірки у транспортний контейнер [82].

25 вересня 2009 року на 3-му енергоблоці Рівненської АЕС під час випробувань імпульсно-запобіжних пристроїв компенсатора тиску стався інцидент, пов'язаний з відмовою апаратури, що призвело до короткочасної зупинки енергоблоку [83].

28 листопада 2014 року о 16:49 на 4-му енергоблоці Рівненської АЕС сталася аварія. Блок відключений від енергомережі для усунення несправності. Реакторна установка знаходилася в режимі «холодна зупинка» [84].

29 березня 2016 року на Рівненській АЕС стався нещасний випадок. О 9:30 ранку в турбінному відділенні 3-го енергоблоку під час обходу працюючого обладнання один із співробітників зайшов в зону обслуговування напірних засувок насосів УМ на позначці 5,6 м, став на залізну знімну кришку перекриття технологічного отвору, але та впала разом з ним. Через падіння працівник отримав численні травми [85].

29 лютого 2016 року о 12:48 на Рівненській АЕС внаслідок спрацювання автоматичного захисту 3-й енергоблок був відключений від мережі [86].

Під ядерними об'єктами прийнято розуміти підприємства і організації, на території яких використовується або зберігається ядерний матеріал, в тому числі ядерна зброя; розміщуються або експлуатуються ядерні енергетичні установки або їх стенди-прототипи дослідного, військового чи іншого призначення [87–89].

До ядерних установок відносяться будь-які установки, на яких виробляються, обробляються або знаходяться в обігу радіоактивні матеріали [90–92]. Виходячи з цього, до ядерних установок відносяться атомні електростанції, споруди з промисловими, експериментальними, дослідними та іншими енергетичними реакторами, критичними і підкритичними ядерними стендами, сховища радіоактивних відходів, заводи і компанії для збагачення урану і виробництва ядерного палива, судна та інші транспортні засоби з ядерними установками.

Конвенція ядерної безпеки 1994 [93] виділяє як потенційно-небезпечні не тільки цивільні атомні електростанції, але і ядерні збройні і радіаційні об'єкти.

Під ядерним збройним об'єктом розуміють організацію, в якій здійснюється розробка ядерних зарядів, проводяться ядерні випробування по проходженню життєвого циклу ядерної зброї, які вимагають дотримання особливого режиму безпечного функціонування, зберігання і використання ядерної зброї [94–96].

Радіаційно-небезпечний об'єкт – територіально відокремлений або незалежний об'єкт використання атомної енергії, на якому проводяться роботи з радіонуклідними джерелами, радіоактивними речовинами і радіоактивними відходами, що включає в себе персонал і обладнання для проведення такого роду робіт [97–99]. Це може бути лабораторія, цех, установка, виробнича лінія, пункт зберігання радіоактивних речовин, сховище радіоактивних відходів.

Катастрофи на ядерних об'єктах не менш небезпечні, ніж на атомних станціях. Про це свідчать такі події.

Першою катастрофою на ядерному об'єкті прийнято вважати вибух в Окриджській національній лабораторії 1 вересня 1944 року в штаті Теннессі, США [100, 101]. При спробах прочистити трубу в лабораторному пристрої зі збагачення урану стався вибух гексафториду урану, який привів до утворення гідрофтористої кислоти – токсичної речовини. П'ятеро людей, що знаходилися в лабораторії, постраждали від кислотних опіків і вдихання радіоактивних речовин. Двоє з них загинули.

19 червня 1948 року в Челябінській області РФ на комбінаті «Маяк» сталася радіаційна катастрофа [102–104]. На об'єкті «А» атомного реактору по напрацюванню рушничного плутонію після виведення його на проектну потужність відбулася сплавка декількох уранових блоків з оточуючим графітом. Це сталося внаслідок недостатнього охолодження цих блоків і пропуску оперативним персоналом нестабільних показів приладів. Локальне сплавлення уранових блоків з графітом призвело до утворення так званого «козла». В ході ліквідації наслідків (реакторний канал очищався шляхом

ручної розсверловки протягом 9 діб) опроміненню піддався весь обслуговуючий персонал реактору і військовослужбовці, які залучалися.

3 березня 1949 року на комбінаті «Маяк» в результаті аварійної ситуації в накопичувальних водоймах було здійснено масове скидання високоактивних рідких радіоактивних відходів у річку Теча. Опроміненню піддалося близько 125 тисяч чоловік в більш, ніж 40 населених пунктах. Найбільшу дозу опромінення отримало 28 тисяч осіб – середня індивідуальна доза 210 мЗв. Через вісім років на комбінаті «Маяк» сталася радіаційна катастрофа, яка отримала назву «Киштимська» [105–107]. 29 вересня 1957 року в сховище радіоактивних відходів вибухнула ємність, що містить 20 млн. кюрі радіоактивності. Потужність вибуху оцінювалася фахівцями в 70–100 тонн тротилового еквіваленту. Утворена в результаті вибуху радіоактивна хмара пройшла над Челябінською, Свердловською і Томською областями РФ, залишивши «східно-уральський» радіоактивний слід площею понад 20 тис. км<sup>2</sup>. Протягом перших годин після аварії опромінення дозою більше 100 рентген отримало близько 5 тисяч осіб. У ліквідації наслідків аварії з 1957 по 1959 рік брали участь понад 30 тисяч військовослужбовців.

Наступна радіаційна катастрофа на «Маяку», так званий «радіаційний інцидент на озері Карачай», стався через десять років, в квітні 1967 року [108–110]. Озеро Карачай використовувалося на комбінаті «Маяк» для скидання рідких радіоактивних відходів. Водоймище сильно обміліло, при цьому оголилося 2–3 гектара прибережної смуги і стільки ж дна озера. Шквальний вітер, викликав вітровий підйом донних відкладень, в результаті чого з дна водойми було винесено пил радіоактивністю 600 кюрі. Радіоактивному зараженню була піддана територія в 1,8 тис. км<sup>2</sup> і близько 40 тис. осіб, які на ній проживають.

28 листопада 1955 року сталась аварія на американському експериментальному реакторі EBR-1 в штаті Айдахо, США [111, 112]. Вона отримала назву «класичної аварії людського фактору». Під час експерименту з плутонієм через помилки операторів відбулося саморуйнування реактору –

вигоріло близько половини його активної зони. Дані про радіоактивне зараження відсутні.

З екологічних причин 10 жовтня 1957 року в Великобританії в Віндскейлі сталася аварія на одному з двох реакторів, які напрацьовували рушничний плутоній [113, 114]. Внаслідок невірних дій операторів температура палива в реакторі різко зросла. В активній зоні виникла пожежа, яка тривала 4 доби. З пошкоджених технологічних каналів стався викид радіонуклідів. В результаті вигоріло 11 тонн урану, який перебував в активній зоні. Радіоактивне забруднення вразило великі території Англії та Ірландії. Радіоактивна хмара досягла Бельгії, Данії, Німеччини та Норвегії.

У 1969 році в Люценсі, Швейцарія, сталася аварія підземного ядерного реактору [115, 116], що викликало радіоактивне забруднення підземних споруд, де знаходився реактор. Через високу радіоактивність вхід до печери, де знаходилося підземне обладнання, і сам реактор забетонували.

30 вересня 1999 року в науковому японському містечку Токаймура префектури Іборакі сталася радіаційна катастрофа, яку японські енергетики вважають найбільшою [117, 118]. На заводі з виготовлення ядерного палива через помилку персоналу почалася некерована ланцюгова реакція. Вона тривала 17 годин. Опромінено 439 особи, 113 з яких отримали дозу, що перевищує щорічно допустимий рівень. Двоє з них відразу померли.

### **1.2.3 Надзвичайні ситуації на хімічно-небезпечних об'єктах**

Хімічно небезпечний об'єкт – це виробничий об'єкт, на якому розробляють, зберігають, переробляють і транспортують небезпечні хімічні речовини. До них відносяться підприємства хімічної та нафтохімічної промисловості і подібні їм виробництва, пов'язані зі шкідливими хімічними речовинами або з хімічними енергоносіями. Перелік продукції, що випускається хімічними підприємствами з передовою технологією, може містити сотні матеріалів, які володіють різним ступенем токсичності. В

результаті аварії на такому підприємстві може статися загибель або хімічне ураження людей, тварин і рослин, а також хімічне зараження навколишнього середовища [119, 120].

Крім цього, в технологіях підприємства можуть застосовуватися небезпечні (отруйні) речовини. До таких підприємств належать целюлозно-паперові, текстильні, металургійні, а також аміачні холодильні установки, заводи з утилізації боєприпасів і інші [121, 122]. НС на таких об'єктах можливі в процесі виробництва і супроводжуються викидом небезпечних хімічних речовин, як під час виробничого процесу, так і під час зберігання і транспортування небезпечних інгредієнтів. Їх небезпека значно зростає при руйнуванні хімічно-небезпечного об'єкта [123, 124]. Про це свідчать наступні НС, що відбулися на хімічних виробництвах.

Аварія на хімічному заводі міста Севезо в Італії сталася в 1976 році. 10 червня в результаті техногенних збоїв відбувся викид в атмосферу діоксину, кількість якого, за оцінками експертів, могло вбити 100 мільйонів чоловік. Вона повисла над містом, а потім стала осідати [125]. В результаті заражена площа понад 18 км<sup>2</sup>, відзначалася масова загибель людей і тварин. Ліквідація наслідків тривала більше року. Багато років після катастрофи Севезо було безлюдним містом-примарою. До катастрофи в ньому проживало понад 17 тисяч жителів.

У місті Фліксборо (графство Ліндсі, Великобританія) на хімічному заводі компанії «НипрКемікалПлант» 1 червня 1974 року через технологічні неполадки в атмосферу була викинута вибухонебезпечна маса розігрітих парів полімерів, які використовувались для виробництва синтетичного волокна [126]. Через 45 хвилин після аварії, коли пари циклогексана заповнили простір діаметром близько 200 метрів, стався вибух з подальшою масштабною пожежею. В результаті аварії загинуло за різними даними від 30 до 64 чоловік і 75 отримали поранення. Завод в Фліксборо практично перестав існувати. Крім цього було пошкоджено

1821 будинок, 167 магазинів та установ, розташованих за територією хімічного заводу.

В індійському місті Бхопал (столиця штату Мадхья-Прадеш) на заводі американської хімічної компанії «Юніонкарбайд» в ніч з 2 на 3 грудня 1984 року, внаслідок вибуху аварійного клапана, в атмосферу було викинуто близько 42 тонн отруйних парів метилізоціаната, токсичність якого в 2-3 рази перевищує токсичність фосгену (бойової отруйної речовини задущливої дії) [127]. Хмара токсичного газу накрила територію довжиною 5 і шириною 2 кілометри. Число постраждалих в катастрофі оцінюється в 200-600 тисяч чоловік, з яких понад 3 тисячі загинуло під час катастрофи, а ще 15 тисяч померло в наступні роки в результаті впливу хімікатів на організм.

1 лютого 1988 року в 0 годин 25 хвилин в Ярославлі РФ на перегоні Приволжя – Філіно сталася аварія вантажного поїзда М 2502. З рейок зійшли 7 вагонів, в тому числі 3 цистерни з гептилом – токсичною речовиною, компонентом ракетного палива [128]. Одна з цистерн розгерметизувалася – виник осередок хімічного ураження. Городян терміново евакуювали із зон можливого зараження. З розлитих на полотно дороги 740 літрів отруйної рідини, в ємності було зібрано 450 літрів. Решта гептилу було знято з верхніми шарами ґрунту і вивезено для утилізації. У рятувальній операції взяли участь близько 1200 осіб.

20 березня 1988 року на Іонавському заводі азотних добрив в Литві в 11:15 вибухнула ємність з рідким аміаком, температура якого була мінус 340°C [129]. Близько 7000 тонн рідкого аміаку розлилося по території заводу, утворивши озеро отруйної рідини площею близько 10 тис. м<sup>2</sup> і глибиною до півметра. Рідкий аміак загорівся. У зону пожежі потрапив склад готової продукції, де знаходилося 24 тис. тонн добрив. Утворена хмара токсичних газів і аерозолів піднялася на висоту 80 метрів. Глибина поширення зараженого повітря досягла 30 кілометрів. Тільки сприятливі умови не призвели до поразки людей – хмара пройшла крізь незаселені райони. У



ліквідації аварії брали участь близько тисячі осіб і понад двохсот одиниць техніки.

У серпні 1991 року в Мексиці під час залізничної катастрофи з рейок зійшли 32 цистерни з рідким хлором [130]. В атмосферу було викинуто близько 300 тонн хлору. У зоні поширення зараженого повітря отримали ушкодження різного ступеня тяжкості близько 500 осіб, з них 17 загинули на місці. З найближчих населених пунктів було евакуйовано більше тисячі жителів.

#### **1.2.4 Надзвичайні ситуації (аварії) на нафтохімічних виробництвах та об'єктах нафто- та газотранспортної системи**

У місті Калуш з 1968 року діяло хімічне підприємство, що виробляло мінеральні добрива, магній та інші продукти хімічної промисловості [131]. Через порушення правил розташування і експлуатації відвалів, сховищ, емностей, що акумулюють, відходи хімічного виробництва почали просочуватися в ґрунтові води, а через порушення правил ведення шахтних робіт виникла загроза прориву дамби. У Дністер могло потрапити 2 млн. куб. м токсичних відходів, що призвело б до екологічної катастрофи. 10 лютого 2010 року Калуш був визнаний зоною надзвичайної екологічної ситуації [132]. Зараз проблема залишається, так як зберігається загроза прориву сховищ, триває просочування токсичних відходів в ґрунтові води [133].

6 серпня 2013 року на хімічному підприємстві «Стирол» у Горлівці Донецької області стався викид аміаку внаслідок розриву аміакопроводу. В результаті 5 осіб загинуло, ще 5 постраждали [134]. Через дві доби один потерпілий помер. У першу добу було госпіталізовано з опіками і отруєнням 24 людини, потім за лікарською допомогою звернулося ще кілька працівників «Стиролу», які постраждали під час аварії. Мала хмара аміаку шириною 30-40 м, висотою 15-20 м розсіялася в захисній санітарній зоні

навколо заводу [135]. Причиною аварії став незадовільний стан трубопроводу рідкого аміаку через тривалий корозійний вплив навколишнього середовища і ерозійний вплив робочого середовища. Крім цього, свою роль зіграла відсутність технічних рішень з експлуатації трубопроводу рідкого аміаку, виведеного з технологічного процесу для проведення капітального ремонту [136].

У березні 2013 року сталася пожежа на Вуглегірській теплоелектростанції (ТЕС) в Світлодарську Донецької області, на одному з найбільших енергетичних об'єктів України. В результаті події загинув 44-річний працівник підприємства і ще 13 осіб отримали травми різного ступеня тяжкості [137-140]. Пожежа сталася через самозаймання вугільного пилу при розгерметизації пилосистеми. Збиток від пожежі на Вуглегірській ТЕС склав 173,5 млн. грн. [141-143].

22 листопада 2002 року на території підприємства з виробництва мінеральних добрив ЗАТ «Северодонецьке об'єднання «Азот» сталася аварія в результаті розриву трубопроводу азото-водневої суміші діаметром 80 мм. Потерпілих не було. Витік було ліквідовано [144].

У Луганській області в ніч на 27 серпня 2010 року на території підприємства «Азот» стався прорив зовнішнього газопроводу діаметром 250 мм і тиском 35 атм. з наступним горінням. Пожежа була ліквідована. Жертв і постраждалих немає [145, 146]. 5 лютого 2011 року на цьому ж підприємстві в цеху з виробництва аміачної селітри сталося обвалення секції транспортерної галереї довжиною близько 40 м. Галерея впала на естакаду з комунікаціями і повністю її зруйнувала. В результаті інциденту ніхто не постраждав. На підприємстві проведено масштабні відновлювальні роботи [147].

8 січня 2015 року внаслідок аварійного відключення турбіни на Северодонецькій теплоелектростанції (ТЕЦ) – однієї з найбільших в Україні теплоелектроцентралей, призначеної для тепло- і електропостачання міста Северодонецька і гіганта хімічної промисловості «Азот», було припинено

подачу тепла. подача електроенергії в місто була переключена на Щастівську ТЕЦ [148].

17 червня 2014 року в районі міста Лохвиця Полтавської області вибухнув газопровід Уренгой-Помари-Ужгород. За словами очевидців, полум'я піднялося на висоту близько 200 метрів. Причиною вибуху на газопроводі стала розгерметизація. Жертв та постраждалих не було [149].

25 лютого 2016 року на газосховищі «Червонопартизанське» (Чернігівська обл.), на технологічній свердловині №70 під час проведення планових ремонтних робіт сталася розгерметизація, яка призвела до неконтрольованого витоку природного газу. До ліквідації аварії було залучено понад 100 осіб та 30 одиниць техніки. Ця НС не вплинула на стабільність газопостачання для споживачів України та Європи. Постраждалих та жертв не було [150].

12 грудня 2017 року в Австрії вибухнув один з найбільших газопроводів Європи. Вибух стався в комуні Баумгартен на одній з найбільших газових станцій Австрії. В результаті вибуху загинула одна людина, 18 отримали поранення. На місці події працювало 150 пожежників з 14 пожежних бригад. Баумгартен є однією з найбільш важливих газових станцій у регіоні та входить до трійки найбільших в Європі. Щорічно станція транспортує газопроводом 40 млрд. кубів природного газу з Російської Федерації (РФ) та Норвегії до та країн ЄС [151].

Газотранспортна система – це складний комплекс технічних засобів, призначений для транспортування природного газу магістральними газопроводами. У складі газотранспортної системи багато небезпечних об'єктів: лінійна частина магістральних газопроводів, якою транспортують природний газ під тиском понад 1,2 МПа, компресорні станції, газорозподільні станції, підземні сховища газу та газовимірювальні станції.

Згідно з [28] на небезпечних об'єктах: є реальна загроза виникнення НС техногенного характеру, які можуть супроводжуватися вибухами, пожежами

та за своїми наслідками становлять загрозу життю й здоров'ю персоналу, населення чи призводять до завдання значних матеріальних збитків.

Таким чином, електростанції, хімічні та нафтохімічні виробництва, об'єкти нафто- та газотранспортної системи – це об'єкти критичної інфраструктури, вихід з ладу яких має суттєвий вплив на економіку держави і особливо регіону, в якому вони розташовані.

### **1.3 Аналіз причин виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру на небезпечних об'єктах**

НС техногенного характеру на небезпечних об'єктах в країнах Європи, Азії, Америки та Близького Сходу відбуваються з достатньою регулярністю.

Аналіз, найбільш гучних НС техногенного характеру за останні 20 років, свідчить про стійку тенденцію до їх виникнення у всіх країнах світу не зважаючи на стан економічного розвитку країни та розвитку сучасних безпекових технологій з попередження НС.

Як важливий елемент готовності до НС техногенного характеру на небезпечних об'єктах Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) відносить раннє попередження та необхідність достатніх технологічних ресурсів [152].

В Південній Кореї як складову попередження НС техногенного характеру, пов'язаних з витоком небезпечних хімічних речовин і забрудненням повітря, вказують на необхідність аналізу ризиків виникнення НС у реальному часі для встановлення плану реагування на НС для ефективної допомоги персоналу за допомогою географічної інформаційної системи та методів моделювання [153].

Прикладами незадовільного безпекового стану різних регіонів світу є наступні випадки НС, що мали місце. Так у Нігерії у січні 2002 року у місті Лагос, через випадкову детонацію вибухових речовин на небезпечному

об'єкті військового призначення сталася пожежа, внаслідок чого було зруйновано значну частину північного Лагоса [154].

У Демократичній Республіці Конго у березні 2012 року в м. Браззавіль сталася НС на небезпечному об'єкті, який містив боєприпаси. Причиною виникнення НС унаслідок пожежі названо коротке замикання [155]. Через 2 роки там же, у січні 2014 року – НС унаслідок пожежі на складі зі зброєю. Причиною став зовнішній фактор – удар блискавки, в результаті якого на території небезпечного об'єкта у місті Мбужі-Майї виникла пожежа і стався вибух [156].

НС унаслідок пожежі, що трапилася в Індонезії у березні 2014 року, а саме вибух на небезпечному об'єкті з вибухоматеріалами [152]. Об'єкт, який розташовувався в порту столиці Індонезії Джакарті Танджунг-Пріок, довгий час відновлювався.

З чисельними жертвами сталося НС на небезпечному об'єкті у місті Хен'ян в провінції Хунань в Китаї у червні 2014 року [157].

У Ємені м. Аден у березні 2015 року вибух на небезпечному об'єкті під час НС унаслідок пожежі привів до загибелі 9 осіб [153].

В Китаї з 2016 р., враховуючи динамічну індустріалізацію та зростання рівня смертності внаслідок НС техногенного характеру на небезпечних об'єктах [157], прийнято «Керівні принципи всебічного та надійного стримування великих аварій та особливо серйозних аварій» для їх скорочення.

Вибухи на військовому небезпечному об'єкті у Шрі-Ланці у червні 2016 року м. Салава мали причини внутрішнього походження, а саме порушення правил безпеки [158].

Вибух в штаті Махараштра Індії у травні 2016 року на небезпечному об'єкті під час НС унаслідок пожежі, привів до розвитку пожежі у подальшому [159].

Аналогічна НС мала місце у жовтні 2015 року на території небезпечного об'єкта в Алжирі в провінції Айн-Дефла [160].

В результаті НС унаслідок пожежі у серпні 2015 року, яка виникла на базі США в м. Сагамихара (Японія), повністю зруйнований багатоповерховий небезпечний об'єкт площею 900 м<sup>2</sup> [161].

У роботі [162] авторами повідомляється про зростання кількості НС унаслідок пожежі на небезпечних об'єктах (Unplanned Explosions at Munitions Sites) по всьому світі.

Негативна статистика стосується і країн з високим рівнем технологічної безпеки, так у результаті НС унаслідок пожежі на небезпечному об'єкті, яке використовує хімічну технологію, біля Барселони у липні 2003 року токсична хмара хлору поширилася на сусідні області [163].

У північному портовому місті Руан (Франція) у вересні 2019 року на хімічному небезпечному об'єкті виникла НС унаслідок пожежі, яка була спровокована порушенням правил безпеки [164].

У США також не рідкісні випадки вибухів на небезпечних об'єктах, у тому числі військової інфраструктури. НС, в штаті Пенсільванія м. Чесберсберг у результаті пожежі з наступним вибухом на складі боєприпасів (ракети і амуніція) [165].

Пожежа у жовтні 2019 в США на нафтопереробному заводі в сховищі нафти і нафтопродуктів «Нустар» в Крокетта. Пожежа поширилася на третій резервуар і спровокувала каскадне поширення НС на територію сусідніх районів [166].

НС на хімічному заводі в Сяньшуге компанії TianjiauyiChemical сталася у березні 2019 року в провінції Цзянсу, Китай. За даними причиною НС стала пожежа через порушення технологічних правил [167].

НС унаслідок пожежі найбільшому в світі нафтопереробному заводі в Саудівській Аравії у жовтні 2019 року. Пожежа була викликана зовнішнім фактором, а саме атакою за допомогою безпілотних літальних апаратів [168].

У провінції Діярбакир в Туреччині у вересні 2015 року НС на небезпечному об'єкті, що належить спецназу управління безпеки. Там же в

провінції Хатай (Туреччина) у серпні 2019 року НС на складі боєприпасів. Пожежа виникла за зовнішніх обставин [169].

На півночі Австрії, у лютому 2018 року, сталася НС унаслідок пожежі на небезпечному об'єкті за невиявлених обставин [170].

На півночі Кіпру у вересні 2019 року в районі Кирінія сталися вибухи під час пожежі на складі боєприпасів. Спочатку пожежа почалася за межами складу в гаю, що знаходиться на території військової зони в місті Кіренія. Дуже швидко вогонь поширився на склад боєприпасів і переріс в масштабну НС [171].

У порту, розташованому в новому районі Бінхай міста Тяньцзін, на півночі Китаю на складах фірми «Жуйхай», що займається транспортуванням небезпечних хімічних речовин у серпні 2015 року сталася НС унаслідок пожежі. Причиною став зовнішній фактор – самозаймання контейнера з сухою нітроцелюлозою, після чого вибухнули сусідні контейнери з нітратом амонію і іншими хімікатами, що призвело до істотних наслідків [72].

В Азербайджані у липні 2016 року на заводі «Араз» міністерства оборонної промисловості в місті Ширван з причини, що виникла усередині об'єкту під час утилізації виробів, сталася масштабна НС унаслідок пожежі [173].

У Болгарії у серпні 2014 року та у квітні 2015 року, протягом року, виникло 2 потужні НС унаслідок пожежі на території військового заводу ВМЗ-Сопот та у населеному пункті Іганово. В обох випадках причиною загоряння було порушення правил утилізації вибухонебезпечних речовин [174].

Під час ремонтних робіт у приміщень заводу Arsenal з виробництва зброї в Болгарії у квітні 2016 року сталася чергова НС. Незважаючи на вжиті заходи на об'єктах даної інфраструктури у травні 2016 року виникла НС унаслідок пожежі на іншому військовому заводі компанії Arsenal в місті Миглиж [175].

Аналіз територіального розподілу випадків виникнення НС унаслідок пожежі доводить, що Україна знаходиться досить в небезпечному сусідстві, по всьому державному кордону, небезпека, якого підсилюються воєнними діями на Сході країни.

У Казахстані, м. Арісь у червні 2019 року сталася НС унаслідок пожежі, що стрімко переросла в НС регіонального рівня [176].

У Туркменському м. Абадані у липні 2011 року сталася НС з наступними вибухами на складі піротехніки, які спричинили значні жертви [177].

У Челябінській області РФ м. Карабаш у вересні 2009 року виникла НС, під час якої загорівся і вибухнув склад боєприпасів [178].

На 31-му арсеналі військово-морського флоту в м. Ульяновську РФ у листопаді 2009 року сталася пожежа в одному з цехів, де відбувалася утилізація боєприпасів. Потім вогонь перекинувся на сусідню будівлю військової частини [179].

В Амурській області РФ на складі боєприпасів Далекосхідного військового округу у жовтні 2010 року відбулася небезпечна НС унаслідок пожежі [180].

У Липецькій області РФ на одній з центральних баз зберігання і утилізації боєприпасів у квітні 2011 року стався вибух унаслідок НС, що виникла за причин порушення умов зберігання вибухових речовин [181].

На військовому арсеналі у травні 2011 року в Башкирії сталася НС через пожежу за зовнішніх причин [182].

В Удмуртії на арсеналі Міноборони у червні 2011 року виникла НС унаслідок пожежі, в результаті якої сталися вибухи боєприпасів [183].

У серпні 2017 року під час НС унаслідок пожежі вибухнули боєприпаси на складах Абхазії в селі Приморське [184].

Досить складна НС унаслідок пожежі виникла на небезпечному об'єкті, на якому зберігалися артилерійські снаряди в Примор'ї у травні 2012 року [185]. Причина НС залишилася невідома.



В Оренбурзькій області РФ на небезпечному об'єкті військової частини у червні 2012 року виникла пожежа, яка спричинила за собою вибухи боєприпасів [186].

У Самарській області РФ на небезпечному об'єкті ФКП «Приволзький державний випробувальний полігон» у червні 2013 року сталася серія вибухів снарядів, складованих відкритим способом, що стало результатом НС унаслідок зовнішніх причин [187].

У Володарському районі Нижегородської області РФ у серпні 2016 року загорівся небезпечний об'єкт ракетно-артилерійського озброєння. НС виникла за межами сховища на відкритому майданчику складу в селищі Юганец [188].

На складі самарського небезпечного об'єкту "Прогрес" у жовтні 2016 року виникло НС унаслідок пожежі. Площа поширення НС склала понад 1000 квадратних метрів [189].

Резонансними були низка НС унаслідок пожежі на небезпечних об'єктах, що містять технології поводження з вибухонебезпечними речовинами.

Так в Архангельській області РФ м. Нанокса у серпні 2019 року НС унаслідок пожежі виникла на небезпечному об'єкті зберігання боєприпасів [190].

НС в у Ачинськ (Красноярський край РФ) у серпні 2019 року на небезпечному об'єкті військового призначення [191].

НС на фосфорному заводі на території РФ у квітні 2019 року відбулася за зовнішніх причин виникнення [192].

Займання даху одного з цехів оборонного заводу "Красмаш" Красноярську РФ сталося унаслідок пожежі під час НС на виробництві ракетно-космічної техніки [193].

В Україні протягом останніх 20 років, також мали місце, масштабні за своїми наслідками, НС унаслідок пожежі на небезпечному об'єкті.

Так з 2003 року було зафіксовано шість випадків НС унаслідок пожежі на небезпечному об'єкті військової інфраструктури зі збереження боєприпасів, з них чотири за роки війни України з РФ на Сході країни.

Так у с. Калинівка (Вінницька область) на складах Міністерства оборони України у вересні 2003 року, виникла НС унаслідок пожежі [194].

У Донецькій області в м. Бахмут у жовтні 2003 року виникло НС унаслідок пожежі на небезпечному об'єкті зберігання боєприпасів Сухопутних військ ЗС України [195]. Осередок пожежі виник унаслідок грубих порушень ТБ.

У Запорізькій області у с. Новобогданівка у різні роки відбулися НС унаслідок пожежі різної складності на небезпечних об'єкта, що належать Збройних сил України [196].

Так у травні 2004 року причиною загоряння на небезпечному об'єкті визнано грубе порушення правил пожежної безпеки [197], в результаті якого на небезпечному об'єкті почали вибухати артснаряди й інші боєприпаси. [198]. Знову у липні 2005 року на небезпечному об'єкті в с. Новобогданівка виникла НС за тих самих причин, але з менш масштабними наслідками [199].

НС на небезпечному об'єкті у с. Новобогданівка у серпні 2006 року – постраждало близько 3 гектарів території об'єкту [200].

НС унаслідок пожежі на цьому небезпечному об'єкті під час знищення боєприпасів у травні 2007 року. Спрацювали снаряди, що були пошкоджені у попередніх НС [201].

У серпні 2008 року в м. Лозова НС на небезпечному об'єкті Південного оперативного командування сухопутних військ [202]. Причиною виникнення осередку НС став зовнішній фактор – спалах сміття на території об'єкту.

У березні 2014 року у Кривому Розі виникла масштабна НС унаслідок пожежі на небезпечному об'єкті військового призначення [203].

У лютому 2015 року в районі н.п. Червоний Чабан Херсонської області сталося НС унаслідок пожежі на небезпечному об'єкті [204] Збройних сил України.

У жовтні 2015 року мало великі наслідки НС унаслідок пожежі на небезпечному об'єкті у м. Сватове, що була спровокована зовнішнім фактором, а саме запуском сигнальної ракети [205].

В результаті зовнішнього впливу у березні 2017 року в м. Балаклії Харківської області, НС унаслідок пожежі виникла одночасно на декількох майданчиках небезпечного об'єкта зі зберігання ракетно-артилерійського озброєння [206].

НС унаслідок пожежі у вересні 2017 року в районі с. Новоянисоль на Донеччині [207]. Причиною НС стала пожежа, що виникла за територією небезпечного об'єкта на сільськогосподарських угіддях.

Таким чином, небезпека НС техногенного характеру на небезпечних об'єктах має всесвітній характер та негативну динаміку щодо зростання, як за кількістю НС так і за їх наслідками. Аналіз особливостей та причин виникнення НС техногенного характеру на небезпечних об'єктах показав, що їх переважна більшість пов'язана із пожежами (вибухами) в приміщеннях об'єктів. Крім того як нормальна так і аварійна робота таких об'єктів пов'язана зі значними викидами в атмосферне повітря небезпечних речовин.

#### **1.4 Стан питання щодо попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на небезпечних об'єктах**

Одним з напрямків забезпечення цивільного захисту населення і територій від НС техногенного характеру є підготовка та реалізація заходів, спрямованих на попередження таких ситуацій (запобігання та зменшення їх масштабів). Руйнівний потенціал НС техногенного характеру можна порівняти із загрозою військово-політичних катаклізмів. Тільки у галузі енергетики у світі щорічно добувається, зберігається і переробляється

близько 10 млрд. т палива, маса порівнянна з арсеналом ядерної зброї [208]. Небезпечні хімічні речовини використовуються в кількостях, що вимірюються від сотень мільярдів до трильйонів летальних доз, що на один два порядки вище накопичених радіоактивних речовин в тих же одиницях виміру [209]. Найбільші НС, що викликали значні жертви, супроводжувалися евакуацією людей та призвели до значного забруднення довкілля, сталися впродовж останніх трьох десятиліть.

Основні причини переважної більшості НС техногенного характеру обумовлені незадовільним технічним станом обладнання на небезпечних об'єктах, порушенням технологічної та виробничої дисципліни, незадовільною організацією та проведенням небезпечних видів робіт, непрацездатністю засобів автоматики, зниженням кваліфікації обслуговуючого персоналу [210-212].

Пошук шляхів щодо вирішення проблеми попередження НС техногенного характеру на небезпечних об'єктах, вимагає проведення комплексного аналізу існуючих світових і вітчизняних наукових розробок у цій галузі. Завжди вважалося, що набагато важливіше запобігти лиху, ніж потім боротися з ним. Зарубіжний досвід і вітчизняна практика показують, що витрати на проекти з попередження НС значно нижче можливого збитку від них.

Попередження НС забезпечується завчасним та оперативним проведенням комплексу заходів (превентивних заходів), спрямованих на максимально можливе зменшення ризику виникнення НС, а також на збереження здоров'я людей, зниження розмірів шкоди, завданої довкіллю та матеріальних втрат у разі їх виникнення[213].

Тому попередження НС полягає у проведенні завчасних організаційних, інженерно-технічних та інших заходів направлених, по-перше, на запобігання виникненню НС (зниження ризику їх виникнення), по-друге, на зменшення можливих масштабів НС (зниження можливих обсягів втрат і збитків).

Попередження НС засновується на моніторингу навколишнього природного середовища, небезпечних об'єктів, діагностиці стану будівель і споруд з точки зору їх стійкості до впливу вражаючих факторів небезпечних техногенних явищ; а також прогнозуванні небезпек та загроз виникнення НС техногенного характеру та наслідків впливу їх вражаючих факторів на населення, об'єкти економіки та навколишнє природне середовище.

Превентивні заходи щодо запобігання (зниження ймовірності виникнення) НС передбачаються шляхом виключення (зниження частоти) подій, ініціюючих НС, а також зниження ймовірності переростання небезпечного явища в НС (ініціюючої події в аварію).

Зниження частоти подій, ініціюючих НС (небезпечних техногенних явищ) досягається шляхом проведення наступних заходів:

- інженерно-геологічного районування території та згідно з його результатами раціонального розміщення об'єктів територіального економічного комплексу, зокрема, раціонального вибору майданчиків для небезпечних об'єктів;

- профілактики виникнення аварій (діагностика обладнання, планово-попереджувальні ремонти, технічне обслуговування);

- боротьби з тероризмом і злочинністю.

До заходів щодо зниження ймовірності переростання небезпечного явища в НС належать [214]:

- інженерний захист від небезпечних техногенних явищ;

- фізичний захист небезпечних об'єктів від небезпечних соціальних явищ, проведення заходів по підвищенню надійності персоналу;

- забезпечення захищеності об'єктів (зниження рівнів навантажень, що виникають від небезпечних явищ);

- зниження уразливості об'єктів до впливу негативних (шкідливих) факторів небезпечних природних і техногенних явищ;

- забезпечення фізичної стійкості будівель і споруд;

- забезпечення надійності (зокрема, надійності систем безпеки, які перешкоджають переростанню позаштатних ситуацій в аварії).

Розглянемо комплекси заходів, що виключають події, що ініціюють НС.

Інженерно-геологічне районування території проводиться за сукупністю геологічних факторів (рельєф, будова та властивості гірських порід, гідрогеологічні умови, розвиток сучасних геодинамічних процесів тощо). На картах інженерно-геологічного районування виділяються ділянки за ступенем їх придатності для господарського освоєння, по стійкості до впливу небезпечних природних явищ. Таке ранжування територій дозволяє забезпечити високу якість і надійність створюваних об'єктів, а також їх оптимальне інвестування. Для сейсмонебезпечних районів складаються карти детального сейсмічного районування та мікрорайонування. На них території поділяються за ступенем сейсмічної небезпеки з урахуванням конкретних геологічних, структурно-тектонічних, гідрогеологічних, геоморфологічних умов і сейсmodинамічних властивостей порід.

З використанням результатів інженерно-геологічного районування проводиться раціональне розміщення територіальних комплексів розселення та господарства. Безпечні ділянки рекомендуються для розміщення важливих об'єктів, наприклад, житлових зон з високою щільністю населення або великих об'єктів життєзабезпечення (електростанції, транспортні комунікації тощо), небезпечні залишають вільними від забудов, створюють там зони відпочинку, парки тощо.

На основі спеціальних досліджень ряду майданчиків здійснюється вибір майданчиків з умови забезпечення безпеки людей для розміщення небезпечних об'єктів, наприклад АЕС [214]. Визначальними факторами є населення, геологічні та сейсмічні характеристики передбачуваного майданчика, а також характеристики навколишнього середовища.

Серед заходів щодо попередження НС особливе місце займають заходи, спрямовані на зниження інтенсивності (сили) можливих небезпечних

природних явищ або навіть на їх запобігання. Зокрема, для зниження сили землетрусів може проводитися провокування (передчасний скидання напруги) землетрусів меншої сили за допомогою ядерного вибуху, потужних генераторів коливань.

Профілактика виникнення НС техногенного характеру заснована на проведенні діагностики обладнання, планово-попереджувальних ремонтів, підвищенні якості технічного обслуговування. Для України характерною причиною високої аварійності у промисловості є знос основних фондів у всіх галузях економіки і низькі темпи їх оновлення через незадовільну фінансово-економічну ситуацію більшості підприємств. Профілактики аварій сприяють також процедури державного регулювання промислової безпеки.

У комплексі заходів щодо попередження НС важливе місце займають зусилля по зниженню ймовірності переростання небезпечних явищ у НС. Серед них особливе місце відводиться інженерному захисту населення і територій. Основними об'єктами інженерного захисту є населення, ОКІ і території. Для захисту населення від НС використовуються захисні споруди цивільного захисту. Ці споруди призначені для укриття людей від вражаючих факторів НС природного і техногенного характеру. Раціонально сплановані і послідовно реалізовані заходи інженерного захисту забезпечують зниження можливих людських і матеріальних втрат від 30 до 80%. Проте проведення інженерно-технічних заходів потребує значних капітальних вкладень.

Важливу роль в управлінні техногенними ризиками відіграють відповідні системи безпеки. Забезпечення ефективного функціонування організаційних та технологічних систем безпеки, якими повинні оснащуватися небезпечні об'єкти, є важливим напрямком діяльності по попередженню НС. Завдання таких систем безпеки можуть бути зведені до двох груп:

- на об'єктах одноразового застосування, не функціонують у процесі експлуатації – запобігання задіяння (передчасного спрацювання) від зовнішніх факторів (аварійних і вражаючих впливів, несанкціонованих дій)

або переведення об'єктів в безпечний стан з точки зору можливого впливу на навколишнє середовище в разі значної ймовірності такого спрацьовування;

- у функціонуючих об'єктах – запобігання розвитку передумов аварії або обмеження наслідків аварії.

Основними видами систем безпеки за принципом дії є системи, в яких застосовуються пасивні або активні методи захисту [215].

Пасивна система (жорсткий захист) заснована на створення фізичних бар'єрів на шляху поширення небезпечних факторів до критично важливих з точки зору безпеки вузлів небезпечного об'єкта, а також на шляхи евакуації з об'єкта і поширення вражаючих факторів. Подолання цих бар'єрів вимагає витрати великої кількості енергії.

Активна (функціональний захист) – включає чутливі елементи (датчики), що стежать за станом небезпечного об'єкта і фіксують виникнення аварійних ситуацій, а також системи, що перешкоджають розвитку передумов виникнення аварії або знижують її наслідки.

Системи безпеки небезпечних об'єктів частіше за все засновані на принципі переривання (придушення) аварійного процесу або формування небезпечного фактора, а також відключають з функціональної схеми об'єкта аварійні блоки. Системи запобігання виникнення аварій включають блокувальні і запобіжні пристрої (клапани, фільтри, плавкі вставки тощо), системи пожежогасіння, системи безаварійної зупинки технологічних процесів (наприклад, ядерних реакторів), локалізації джерел аварії та аварійного енергопостачання.

Розвиток теорії і практики управління безпекою складних технічних систем йде головним чином шляхом пред'явлення підвищених вимог до якості обладнання, систем управління та персоналу [216], що обмежують можливі негативні техногенні впливи на навколишнє середовище і людину. Перспектива ж управління безпекою цих систем пов'язана з проектуванням з урахуванням критеріїв безпеки, можливості виникнення у таких системах в процесі експлуатації ланцюжків подій, які в звичайній ситуації не приводять



до небезпечних станів, але при певному збігу обставин можуть стати причиною аварій.

Послідовне освоєння системних методів проектування складних технічних систем дозволить в майбутньому вирішити завдання попередження виникнення великих аварій і катастроф. Ці методи проектування засновані на наступних принципах:

- принцип багаторівневого захисту (створення послідовних рівнів захисту, які зменшують імовірність аварій та обмежують їх наслідки). Цей принцип застосовується для компенсації потенційних помилок людини або відмов технічних пристроїв. Принцип реалізується в першу чергу шляхом створення серії бар'єрів для утримання енергії або небезпечних речовин, які повинні бути порушені, перш ніж може бути завдано шкоди людині та навколишньому середовищу;

- принцип комбінованого захисту (об'єднання систем жорсткого та функціонального захисту об'єкта від аварій);

- принцип одиначної відмови (об'єкт повинен залишатися безпечним при відмові будь-якого елемента);

- принцип безпечної відмови (відмова системи аварійного захисту повинна сприяти помилковому спрацюванню, але не допускати переростання аварійної ситуації в аварію);

- принцип незалежності та різноманітності, коли системи забезпечення безпеки проектуються так, щоб вплив дефектів, помилок, відмов на працездатність системи були мінімальними. При цьому незалежність досягається фізичним, функціональним і просторовим рознесенням, а різноманітність – різнотипністю фізичних, методичних і апаратних принципів реалізації;

- принцип надійності і живучості, коли забезпечується високий рівень надійності функціонування найважливіших елементів у нормальних умовах експлуатації та при проектних зовнішніх впливах;

- принцип природної технічної безпеки, що реалізується шляхом застосування автономних спеціальних засобів захисту, з максимально спрощеною і надійною конструкцією технічної системи, мінімізації рівня запасу енергії та шкідливих речовин, а також виключенням впливу помилок оператора на розвиток аварійних процесів. В якості перспективної стратегії забезпечення безпеки розглядається застосування біонічних принципів, тобто проектування складних технічних систем з внутрішньо властивою їм безпекою;

- принцип самозахисності систем (створення систем з пасивними і внутрішньо притаманними характеристиками безпеки). Пасивні засоби захисту діють автономно, засновані на знанні законів природи і тому свідомо володіють високою надійністю.

При реалізації останнього принципу необхідно дотримання наступних правил:

- максимальне спрощення робочих процесів, конструкції і систем управління небезпечним об'єктом з метою підвищення надійності;

- мінімізація запасу енергії та шкідливих речовин, небезпечних при реалізації аварійної ситуації;

- мінімізація ролі помилок людини при виникненні та розвитку аварійних процесів і підвищення тривалості періоду, коли втручання людини не обов'язкове.

Важливою складовою попередження НС (поряд з їх запобіганням) є пом'якшення наслідків НС, або зниження розмірів можливих втрат і збитків, зменшення масштабів наслідків.

Відомо, що в основі виникнення НС лежать процеси і явища, енергетична потужність яких незрівнянна з можливостями людини щодо протидії їм. Не може бути припинено, наприклад, розвиток аварії з автомобілем при великій швидкості його руху і запасу значної кінетичної енергії, розвиток вибуху – виділення енергії протягом малого проміжку часу, тобто великої потужності.

У зв'язку з цим профілактична робота по відношенню до таких небезпечних техногенних явищ зводиться не тільки до їх запобігання (поки ще не пізно), але в основному до прийняття заходів щодо зниження збитку, по відношенню до людей і навколишнього природного середовища.

Комплекс завчасних заходів щодо пом'якшення можливих наслідків НС включає [215]:

- превентивну локалізацію зон можливого впливу вражаючих факторів НС;
- підготовку до ліквідації НС (підтримання в готовності системи управління, сил і засобів ДСНС до ліквідації наслідків НС; створення запасів матеріальних засобів; підготовку до проведення аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт, підтримання в готовності аварійно-рятувальних формувань, вдосконалення аварійно-рятувальних засобів тощо);
- підготовку об'єктів економіки і систем життєзабезпечення населення до сталого функціонування в умовах НС;
- захист населення (забезпечення засобами захисту, підготовку евакуаційних заходів тощо);
- здійснення першочергового життєзабезпечення в умовах НС.

Заходи щодо підготовки до захисту населення проводяться завчасно і забезпечують при виникненні НС пом'якшення її наслідків. Ці заходи плануються і здійснюються диференційовано з урахуванням особливостей конкретних районів, міст і об'єктів економіки, ступеня реальної природної та техногенної небезпеки, природно-кліматичних та інших умов. Обсяги, зміст та строки проведення таких заходів визначаються виходячи з принципу розумної достатності, економічних можливостей держави або окремих адміністративно-територіальних одиниць щодо їх реалізації.

Складовою частиною комплексу заходів захисту в НС, крім інженерного захисту, є радіаційний, хімічний, медичний, протипожежний захист населення, а також його евакуація.

Одним з напрямів діяльності в галузі зниження ризиків та пом'якшення наслідків НС є підготовка органів та підрозділів, сил та засобів до ліквідації НС, оперативного проведення аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт. Від того, наскільки швидко буде надано допомогу потерпілим, прийняті заходи з локалізації та ліквідації осередків ураження, значною мірою залежать масштаби наслідків НС. Досвід показує, що скорочення часу початку аварійно-рятувальних робіт у завалах будівель з 6 годин до 1 години зменшує людські втрати на 30-40%, а підвищення темпів робіт у два рази збільшує кількість врятованих на 35%.

Завчасна підготовка в країні до ліквідації можливих НС організовується і проводиться органами влади відповідно до їх повноважень, на основі відповідних програм і планів. У процесі цієї підготовки здійснюється також підготовка до здійснення першочергового життєзабезпечення населення в умовах НС, що при успішному його проведенні дозволяє знизити втрати серед населення і таким чином пом'якшити наслідки НС.

Успіх попередження та ліквідації НС у вирішальній мірі залежить від організації дій органів і підрозділів ДСНС, ефективності управління проведенням аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт.

Таким чином, одним із напрямків забезпечення цивільного захисту населення і територій від НС техногенного характеру є підготовка та реалізація заходів, спрямованих на попередження таких ситуацій (запобігання та зменшення їх масштабів). Попередження НС забезпечується завчасним, а іноді і оперативним проведенням комплексу заходів (превентивних заходів), спрямованих на максимально можливе зменшення ризику виникнення НС, а також на збереження здоров'я людей, зниження розмірів шкоди, завданої довкіллю і матеріальних втрат у разі їх виникнення. Ефективним принципом попередження НС техногенного характеру є застосування активних систем безпеки, заснованих на використанні чутливих елементів (датчиків), які відстежують стан небезпечного об'єкта і на основі

обробки цієї інформації дозволяють завчасно виявляти можливість виникнення небезпечних станів, що призводять до виникнення аварійних ситуацій.

## Висновки розділу 1

1. Надзвичайні ситуації техногенного характеру на небезпечних об'єктах створюють реальну загрозу національній безпеці держави, тому для оперативного реагування та їх попередження необхідно класифікувати надзвичайних ситуацій.

2. Електростанції, хімічні та нафтохімічні виробництва, об'єкти нафто- та газотранспортної системи – це класичні небезпечні об'єкти, вихід з ладу яких має суттєвий вплив на умови життєдіяльності людини, економіку держави і особливо регіону, в якому вони розташовані.

3. Небезпека надзвичайних ситуацій техногенного характеру на небезпечних об'єктах має всесвітній характер та негативну динаміку щодо зростання, як за кількістю надзвичайних ситуацій так і за їх наслідками. Аналіз особливостей та причин виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру на небезпечних об'єктах показав, що їх переважна більшість пов'язана із пожежами (вибухами) в приміщеннях об'єктів. При цьому як нормальна так і аварійна робота таких об'єктів характеризується значними викидами в атмосферне повітря небезпечних речовин.

4. Одним із напрямків забезпечення цивільного захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного характеру є підготовка та реалізація заходів, спрямованих на попередження таких ситуацій (запобігання та зменшення їх масштабів). Попередження надзвичайних ситуацій забезпечується завчасним або оперативним проведенням комплексу заходів (превентивних заходів), спрямованих на максимально можливе зменшення ризику виникнення надзвичайних ситуацій, а також на збереження здоров'я людей, зниження розмірів шкоди, завданої довкіллю і

матеріальних втрат у разі їх виникнення. Ефективним принципом попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру є застосування активних систем безпеки, заснованих на використанні чутливих елементів (датчиків), які відстежують поточний стан небезпечного об'єкта.

## РОЗДІЛ 2

### **СТАН ТА ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ НА ОБ'ЄКТАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ**

Вирішуючи друге завдання наукового дослідження, розглянемо стан та особливості процесу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури держави, а саме: характеристику і склад критичної інфраструктури держави, уразливі місця її об'єктів, а також засоби і системи, які забезпечують попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на таких об'єктах.

#### **2.1 Характеристика об'єктів критичної інфраструктури України**

Термін «інфраструктура» походить від двох латинських слів «infa» – «нижче, під», і «struktura» – «структура, розташування» [217, 218], і означає комплекс взаємно пов'язаних обслуговуючих структур або об'єктів, що становлять і забезпечують основу функціонування системи.

Прийнято розділяти: соціальну інфраструктуру як сукупність галузей і підприємств, що забезпечують нормальну життєдіяльність населення; транспортну – як сукупність галузей і підприємств транспорту [219]; інженерну – як сукупність систем інженерно-технічного забезпечення будівель і споруд [220-227] та інші.

Серед інфраструктур є такі, які включають в себе ряд інших інфраструктур. Наприклад, інфраструктура економіки [228-231] – це сукупність галузей і видів діяльності, які обслуговують виробництво і господарство в цілому, включає в себе інфраструктури важкої і легкої промисловості, енергетики, транспорту та інші.

У свою чергу, транспортна інфраструктура включає в себе інфраструктури авіаційного і залізничного транспорту, морського і річкового флотів, регіональних і міських транспортних інфраструктур [232-235].

У державних інфраструктурах є специфічні інфраструктури, які, як правило, повноцінно функціонують при наявності зовнішніх, закордонних зв'язків – інноваційна [236], яка обслуговує інноваційну діяльність, ринкова [237], що забезпечує вільний рух товарів і послуг, інформаційна [238]. Є і інші специфічні інфраструктури, наприклад, військова [239], діяльність яких носить закритий характер.

Під державною або національною інфраструктурою прийнято розуміти сукупність споруд, установ, всіх галузей промисловості і сільського господарства, транспорту і комунікаційних мереж, необхідних для належного забезпечення діяльності організацій і виробництв даної країни. Наприклад, залізничні й автомобільні дороги, трубопроводи і лінії електропередач, стаціонарні і розвідні мости, аеродроми і порти, житлові будинки і виробничі споруди, електростанції і сховища різного призначення, телефон і телеграф, радіо і телебачення, інтернет та інші засоби інформації. У кожній суверенній державі почали виділяти мережі, системи і сектора (сукупність елементів різних інфраструктур), від яких залежить життя громадян і існування суспільства, вихід з ладу або порушення функціонування яких могло б викликати колапс, параліч або хаос на загальнодержавному, регіональному або місцевому рівні. Комплекс цих секторів, систем або мереж називають критичною інфраструктурою [240].

В кінці 90-х років у зв'язку зі зростанням терористичної загрози в розвинених країнах почалися дискусії про уразливість національних інфраструктур. Увага експертів була спрямована не тільки на інформаційні (кібернетичні) інфраструктури, але і на всі інші галузі забезпечення життя суспільства [241].

У 1998 році директивою 63-ї президента США була визначена критична інфраструктура як сукупність основних систем, які мають



матеріальну або віртуальну платформу і впливають на фундаментальність економіки держави [242]. До них відносять телекомунікації, енергосистеми, банківський і фінансовий сектори, транспортну систему, систему водопостачання і рятувальні служби [243].

Слідом за цим європейські держави також стали приділяти пильну увагу національним критичним інфраструктурам, які визначалися як сукупність систем, порушення функціонування однієї з яких могло б завдати серйозної шкоди економіці держави або привести до негативних соціальних наслідків для суспільства.

У лютому 2003 року (після подій 11 вересня 2001 року) в США була прийнята Національна стратегія фізичної охорони об'єктів критичної інфраструктури (ОКІ). До її складу, в порівнянні з доктриною 1998 року, були включені такі об'єкти, як: ядерні електростанції, греблі, хімічна промисловість, сховища небезпечних речовин, бази оборонної промисловості.

В Україні тривалий час велася дискусія про те, що відноситься до ОКІ, і чим потенційно-небезпечний об'єкт відрізняється від критично важливого об'єкта. На законодавчому рівні поняття критичної інфраструктури в державі не було визначено.

Указом президента України № 8 від 16 січня 2017 року [244] введено в дію рішення Ради національної безпеки і оборони «Про вдосконалення заходів забезпечення захисту об'єктів критичної інфраструктури». Даним указом доручено Кабінету Міністрів розробити і прийняти концепцію створення державної системи захисту критичної інфраструктури і план заходів щодо її реалізації [245].

Протягом двох місяців після прийняття концепції була розроблена державна система захисту критичної інфраструктури, а на розгляд Парламенту винесено законопроект про критичну інфраструктуру і її захисту, в якому передбачені:

- створення державної системи захисту ОКІ;

- визначення органу, відповідального за координацію діяльності по захисту ОКІ;
- основи державно-приватного партнерства і ресурсного забезпечення в сфері захисту ОКІ;
- міжнародне співробітництво в сфері захисту ОКІ.

Службі безпеки України доручено вжити заходи щодо вдосконалення контррозвідувального забезпечення і захисту критичної інфраструктури.

Таким чином, до ОКІ відноситься сукупність стратегічно важливих об'єктів для економіки і національної безпеки (електростанції, хімічні і нафтохімічні комбінати, об'єкти нафтогазової промисловості, металургійні заводи і безліч інших державних підприємств і приватних установ), порушення функціонування яких може завдати шкоди життєво важливим національним інтересам і тому повинні відповідним чином захищатися від відповідних загроз.

## **2.2 Уразливість і стійкість об'єктів критичної інфраструктури в надзвичайних ситуаціях**

Стойкість ОКІ – стан ОКІ, за якого забезпечується її спроможність функціонувати у штатному режимі, адаптуватися до умов, що постійно змінюються, протистояти та швидко відновлюватися після впливу загроз будь-якого виду. Державна політика у сфері захисту критичної інфраструктури спрямовується на формування комплексу організаційних, нормативно-правових, інженерно-технічних, експлуатаційних, наукових та інших заходів, спрямованих на забезпечення безпеки та стійкості критичної інфраструктури [213].

Під системою захисту ОКІ, прийнято розуміти сукупність організаційних, інженерно-технічних заходів і засобів, а також дій адміністрації, обслуговуючого персоналу, органів і підрозділів цивільного захисту, направлених на забезпечення внутрішньо-об'єктового режиму по

ряду напрямків: оперативному, радіаційному, хімічному, пожежному, біологічному і екологічному [214].

Оперативний напрямок визначається системною роботою, яка забезпечує підтримання необхідного режиму на об'єкті. Радіаційний напрямок враховує науково-обґрунтовані допустимі рівні радіоактивного випромінювання. Хімічний напрямок враховує гранично допустимі концентрації шкідливих речовин і утримує їх на розумно низькому рівні. Екологічний напрям забезпечує допустимий рівень ризику шкідливого антропогенного і біологічного впливу на навколишнє середовище і мінімізацію загроз здоров'ю населення.

Системи цивільного захисту, в загальному, повинні забезпечувати зональність, одноміцність і адаптивність складових частин ОКІ за рахунок безперебійного і надійного функціонування його головної технічної складової – комплексу інженерно-технічних засобів цивільного захисту на базі автоматизованої інтегрованої системи безпеки.

Створення системи захисту ОКІ виконання певного переліку заходів [215]. До них відносять аналіз уразливості об'єкта, моделювання потенційних загроз, оцінку ефективності існуючої системи захисту; розробку концепції безпеки об'єкту, що забезпечує підвищену стійкість до небезпек, захист від «зовнішніх» і «внутрішніх» порушників, контроль і облік доступу, комплексне забезпечення інформаційної безпеки системи захисту; організацію системи зв'язку; розробку, виготовлення і поставку технічних засобів і систем захисту, програмно-математичного забезпечення [216].

Для перевірки ефективності функціонування системи цивільного захисту ОКІ регулярно повинні проводитися навчання, в ході яких оцінюється рівень її організації і стану, надійність технічних засобів і підсистем, злагодженість та професіоналізм дій керівництва об'єкту і служб, відповідальних за забезпечення безпеки об'єкта, в тому числі і підрозділів цивільного захисту.

Таким чином, стійкість ОКІ являє собою сукупність організаційних

заходів, інженерно-технічних засобів і дій адміністрації і служби безпеки об'єкта, підрозділів цивільного захисту, направлених на забезпечення внутрішньо об'єктового режиму з оперативного, радіаційного, хімічного і екологічного напрямів, і спрямована на попередження НС на ОКІ. Для ефективності визначення уразливості і стійкості ОКІ в НС повинно регулярно проводитися навчання, за підсумками яких оцінюється рівень її організації і стану, надійність технічних засобів, злагодженість і професіоналізм дій адміністрації ОКІ та підрозділів цивільного захисту.

### **2.2.1 Вибухопожежна небезпека**

ОКІ повинні підтримувати працездатність без перебоїв. Безперервність роботи для даних об'єктів гарантують резервні системи живлення, системи захисту, а також активні системи моніторингу та прогнозування обстановки на об'єкті. Такі об'єкти характеризуються високою вірогідністю НС техногенного характеру, які несуть у собі загрози пожеж та вибухів [245].

Щорічно в Україні виникає близько 70 тис. пожеж. Унаслідок пожеж гине понад 2 тис. осіб, близько 1,5 тис осіб отримують травми. Економічні втрати від пожеж щорічно зростають і перевищують 10 млрд. грн. на рік. Кожного року в Україні виникає близько 50 НС техногенного характеру, пов'язаних із пожежами та вибухами. Найбільша частка НС техногенного характеру, пов'язаних із пожежами та вибухами, припадає на техногенно-навантажені регіони, з високою концентрацією вибухопожежонебезпечних об'єктів [246].

До вибухопожежонебезпечних об'єктів належить значна кількість хімічних, нафто- і газопереробних, коксохімічних, металургійних, машинобудівних та інших підприємств. На цих підприємствах зберігається високий ризик виникнення пожеж. В Україні функціонує близько 1,5 тис. вибухо- та пожежонебезпечних об'єктів, на яких зосереджено близько 13 млн. тонн твердих і рідких вибухо- та пожежонебезпечних речовин [247].

Найвищий рівень пожежовибухонебезпеки мають підприємства та об'єкти нафтогазового, нафтохімічного та нафтогазопереробного комплексу, до якого належить значна кількість пожежовибухонебезпечних об'єктів:

- 200 об'єктів комплексної підготовки нафти й газу;
- 43 тис. км магістральних трубопроводів;
- 13 підземних сховищ газу;
- 1300 газорозподільних станцій;
- 230 тис. км газопроводів систем газопостачання населених пунктів;
- 70000 систем газопостачання промислових підприємств;
- 6 виробництв вибухових речовин та утилізації непридатних боєприпасів;
- 12 нафтопереробних заводів;
- 5 газопереробних заводів.

Вибухопожежна небезпека – це наявність газоподібних, рідких та твердих речовин, матеріалів або їх сумішей, а також окислювачів, які здатні вибухати і горіти за певних умов [248].

Вибухи та пожежі на ОКІ можуть загрожувати працездатності підприємству, спричиняти загрозу життю та здоров'ю персоналу і прилеглому до об'єкту населенню, а також викликати екологічні катастрофи.

Вибух – це надзвичайно швидке перетворення речовини, яке супроводжується миттєвим виділенням великої енергії в невеликому об'ємі. Суттєвою ознакою вибуху є різке збільшення тиску, яке викликає у навколишньому середовищі ударну хвилю.

Основними уражаючими факторами вибухів є:

повітряна ударна хвиля, що виникає при вибухах детонуючих та ініціюючих речовин, при вибухових перетвореннях хмар паливно-повітряних сумішей, вибухів резервуарів з перегрітою рідиною та резервуарів під тиском;

осколкові поля, які утворюються уламками різного роду об'єктів, що летять.

Вибухи класифікують за походженням виділеної енергії на хімічні, фізичні (електромагнітні, кінетичні) та ядерні.

Вибухонебезпечне середовище – це хімічно активне середовище, що знаходиться за таких умов, коли може виникнути вибух.

Вибухонебезпечне середовище на виробничих підприємствах можуть утворити суміші парів палив, бензинів, ацетону, розчинників, спиртів, ефіру та інших речовин з повітрям або іншими окислювачами (киснем, озоном, оксидами азоту; речовини, схильні до вибухового перетворення – ацетилен (при зварювальних роботах), озон та інші.

Вибухонебезпека середовища (горючі суміші, гази, пари) характеризується [249]:

- температурою спалаху; концентраційними і температурними межами запалення;

- температурою самозаймання; нормальною швидкістю поширення полум'я;

- мінімальним вибухонебезпечним вмістом кисню (окислювача);

- мінімальною енергією запалювання;

- чутливістю до механічного впливу удару і тертя.

Вибух ініціюється наступними джерелами:

- відкритим полум'ям;

- розжареними частками, що горять, або вилітають з вихлопних труб двигунів внутрішнього згорання, незахищених іскрогасячим пристроєм;

- розрядами статичної та атмосферної електрики;

- іскрою, що виникає при замиканні електричних ланцюгів насосних станцій і освітлювального обладнання;

- електричною дугою при включенні та вимкненні електродвигунів і освітлення;

- тепловими виявами хімічних реакцій і механічних впливів;

- іскрами від ударів і тертя;

- ударною хвилею.

Небезпека вибуху характеризується такими основними факторами:

- максимальним тиском і температурою вибуху;
- швидкістю наростання тиску при вибуху;
- тиском у фронті ударної хвилі;
- дробними і фугасними властивостями вибухо-небезпечного середовища.

До небезпечних і шкідливих чинників, які можуть впливати на персонал внаслідок вибуху, належать:

- ударна хвиля, у фронті якої тиск перевищує допустиме значення; полум'я;
- конструкції, що обвалюються, щогл блискавко-приймальників, прокладених на висоті трубопроводів, будівель та їх частин.

Вибухобезпека виробничих процесів, забезпечується вибухопередженням і вибухозахистом, організаційними і організаційно-технічними заходами.

Пожежа – це неконтрольоване поширення горіння, внаслідок якого знищуються або пошкоджуються матеріальні цінності, створюються небезпека для життя і здоров'я людей[250].

Горіння – це ланцюгова хімічна реакція окислення, що відбувається з виділенням тепла та втратою маси речовини.

Горіння є фізико-хімічним процесом тому, що при ньому спостерігається два основних явища [251]:

- речовина міняє свій вид або форму;
- змінюються властивості речовин.

Перше явище називається фізичним, друге – хімічним. Для горіння характерні такі ознаки: фізико-хімічне перетворення речовини, виділення тепла, випромінювання світла.

Процес горіння протікає за наявності горючої речовини, окисника (кисню) та джерела запалювання [251]. У випадку відсутності одного з перерахованих факторів горіння неможливе.

В процесі розвитку пожежі розрізняють три стадії: початкову, основну та кінцеву[250].

Початковій стадії відповідає розвиток пожежі від початку горіння до моменту, коли приміщення буде повністю охоплене полум'ям. На цій стадії відбувається підвищення температури, повітря та продукти горіння в приміщенні збільшуються в об'ємі, створюється надлишковий тиск, в результаті чого газова суміш виходить з нього через нещільності, двері і вікна. Горіння підтримується киснем, що знаходиться у повітрі приміщення, концентрація якого поступово зменшується.

В разі, коли двері та вікна в приміщенні щільно закриті, розвиток процесу горіння в ньому може уповільнитись або майже призупинитись. У протилежному випадку на початковій стадії пожежі горіння розповсюджується на значну площу приміщення, температура піднімається до 200–300 °С, відбувається інтенсивне димоутворення і зменшується видимість.

В залежності від об'єму приміщення, його герметизації і розподілення пожежного навантаження початкова стадія пожежі продовжується 5–50хв., але небезпечні для людини умови виникають вже через 1–6 хв.

Основній стадії розвитку пожежі в приміщенні відповідає підвищення температури до найбільших значень. На цій стадії згоряє 80–90 % маси горючих речовин і матеріалів, температура і щільність газів у приміщенні з часом майже не змінюється.

На кінцевій стадії пожежі закінчується процес горіння і поступово зменшується температура.

Простір, в якому розвивається пожежа, умовно поділяється на три зони: горіння, теплової дії та задимлення[251].

Зоною горіння називається частина простору, в якому протікають процеси термічного розкладання або випаровування горючих речовин і матеріалів в об'ємі факелу полум'я.



Зона теплової дії примикає до межі зони горіння. В цій частині простору протікають процеси теплообміну між поверхнею полум'я, навколишніми оточуючими конструкціями і горючими матеріалами. Передавання теплоти в навколишнє середовище здійснюється такими способами: конвекцією, випромінюванням, теплопровідністю, що обумовлює основні причини розвитку пожежі.

Під зоною задимлення розуміють частину простору, заповнену димом, в якому неможливе знаходження людей без апаратів захисту органів дихання та дії підрозділів ускладнюються через недостатню видимість.

Дим, який утворюється при горінні, складається з продуктів повного згоряння (вуглекислий газ, водяна пара, окисли металів і неметалів і.т.і.) або з продуктів неповного згоряння (частинок вугілля, окису вуглецю, смолистих продуктів тощо).

При нормальному співвідношенні кисню та горючої речовини відбувається повне згоряння з виділенням вуглекислого газу та водяної пари. Якщо кисню недостатньо, згоряння буде неповним, внаслідок чого в якості продуктів згоряння утворюються щільний дим і окиси вуглецю. Вказані продукти горіння мають наступні властивості [250].

Вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ) важчий за повітря, не має кольору і запаху, не горить і не підтримує горіння. Вуглекислий газ є складовою частиною повітря, в якому його вміст близько 0,04 %. При збільшенні його в повітрі до 2 % у людини з'являється нудота, а при наявності більше 5 % людина може втратити свідомість, 8 – 10 % викликає швидку втрату свідомості і смерть.

Окис вуглецю (CO, чадний газ) – не має кольору і запаху, в воді практично не розчиняється. Здатний горіти і утворювати з повітрям вибухонебезпечні суміші. Колір полум'я синій. Є отруйним газом, вдихання повітря із вмістом 0,4 % окису вуглецю – смертельно.

При пожежах до розглянутих продуктів згоряння додаються продукти розкладу різних горючих речовин, тому склад диму може бути різний.

Кількість диму, що утворився, його щільність і токсичність залежать від умов протікання процесу горіння та властивостей матеріалу, що горить.

У людей, які не мають засобів захисту, дим викликає кашель, печіння у верхніх дихальних шляхах, подразнення слизової оболонки очей та носоглотки, задишку, блювоту, при довготривалій дії – втрату свідомості та смерть.

При пожежах горіння протягом значного проміжку часу не контролюється людиною. Внаслідок чого при пожежах можуть виникати такі явища: вибухи; деформація та обвалення технологічних апаратів, установок, будівельних конструкцій; скипання та викид нафтопродуктів з резервуарів; загибель, травматизм і отруєння людей; виникнення паніки. Ці явища можуть значно ускладнювати обстановку, яка утворюється на пожежі, а також ускладнювати умови проведення гасіння пожежі.

Пожежі поділяються за масштабами [252]:

– окрема пожежа – це та, що охопила одну споруду або групу споруд. Кілька окремих пожеж на площі 1га можуть перетворюватись у масові або суцільні пожежі.

– масова пожежа – це сукупність окремих пожеж, які охопили більше 25% споруд на даному об'єкті, районі, населеному пункті.

– суцільна пожежа – це масова пожежа, яка охопила більше 90% споруд.

– вогняний шторм – особливий вид суцільної пожежі, який охопив всю територію об'єкту або площу більше 100га і супроводжується потужним рухом повітря до центру на зміну того, що вигорає або підіймається вгору. Боротьба з вогняним штормом неможлива. Найбільш вірогідне виникнення вогняного шторму – застосування ядерної зброї, масові бомбардування, великі лісові пожежі.

Згідно з умовами теплообміну з навколишнім середовищем всі пожежі поділяються на дві групи – відкриті та закриті.

В залежності від виду горючих матеріалів і речовин пожежі поділяють на класи А, В, С, Д, Е[250].

Клас А – пожежі твердих речовин, горіння яких переважно супроводжується тлінням (деревина, тканини, папір тощо).

Клас В – пожежі горючих рідин або твердих речовин, які розтоплюються (бензин, дизпаливо, бітум, каучук тощо).

Клас С – пожежі газів (водень, пропан тощо).

Клас Д – пожежі металів та їх сплавів (алюміній, магній, натрій тощо).

Клас Е – пожежі, пов'язані з горінням електроустановок.

Наведена класифікація пожеж є умовною, оскільки пожежі в ході свого розвитку можуть переходити з одного класу або групи в інші. Однак для практики гасіння пожеж розглянута класифікація необхідна, тому що дозволяє визначити способи та прийоми припинення горіння, вид вогнегасної речовини, дії підрозділів при гасінні пожежі в даний момент її розвитку.

Найбільш частими причинами виникнення пожеж є необережне поводження з вогнем, несправність виробничого обладнання та порушення технологічного процесу, порушення правил експлуатації та несправність електрообладнання, недотримання заходів пожежної безпеки при проведенні електро-газозварювальних робіт, неправильне користування та несправність опалювальної апаратури, іскроутворення при роботі двигунів внутрішнього згорання тощо [253].

Прогнозування пожежної обстановки здійснюється за загальними принципами оцінки стану елементів стійкості вибухопожежонебезпечних об'єктів. Також при цьому з'ясовується динаміка можливого розвитку подій [250, 252]:

- що і де може горіти, орієнтовані розміри пожежі і шляхи її поширення;
- загроза людям, с/г тваринам, їх можливі місця знаходження і шляхи евакуації;
- наявність загрози вибухів, отруєнь, обвалів, ураження струмом;

- необхідність евакуації техніки, майна та її шляхи або захисту їх від полум'я і диму;

- можливі напрямки і введення сил і засобів боротьби з пожежею.

За графічним зображенням повторюваності вітрів для даної місцевості (рози вітрів) визначається найбільш ймовірний напрям розповсюдження пожеж.

Основним принципом запобігання виникнення пожеж є виключення можливості утворення горючого середовища та відсутність джерел запалювання [254].

Запобігання утворення горючого середовища забезпечується наступними способами:

- максимально можливим застосуванням негорючих і важкогорючих речовин і матеріалів;

- максимально можливим за умовами технології і будівництва обмеженням маси і (чи) обсягу горючих речовин, матеріалів і найбільш безпечним способом їхнього розміщення;

- ізоляцією горючого середовища (застосуванням ізольованих відсіків, камер, кабін і т.п.);

- установкою пожежонебезпечного устаткування по можливості в ізольованих приміщеннях чи на відкритих площадках;

- застосуванням пристроїв захисту виробничого устаткування з горючими речовинами від ушкоджень і аварій.

Запобігання утворення в горючому середовищі джерел запалювання забезпечується наступними способами:

- застосуванням машин, механізмів, устаткування, пристроїв, при експлуатації яких не утворюються джерела запалювання;

- застосуванням у конструкції швидкодіючих засобів захисного відключення можливих джерел запалювання;

- пристроями блискавкозахисту будинків, спорудь і устаткування;

- підтримкою температури нагрівання поверхні машин, механізмів, устаткування, пристроїв, речовин і матеріалів, що можуть ввійти в контакт із горючим середовищем, нижче гранично припустимої, що складає 80 %найменшої температури самозаймання палива;

- виключення можливості появи іскрового розряду в горючому середовищі з енергією, рівною і вище мінімальної енергії запалювання;

- застосуванням інструмента, що не іскрить, при роботі з легкозаймистими рідинами і горючими газами;

- недопущення умов для теплового, хімічного і (чи) мікробіологічного самозаймання речовин, матеріалів, виробів і конструкцій.

Аналіз характеру причин аварій у хімічній і нафтохімічній промисловості показує, що більшість їх (95 %) пов'язано з вибухами різних хімічних речовин: 54 % в апаратурі, 46 % у виробничих будівлях і на відкритих технологічних установках. Однак це співвідношення не однакове в різних галузях і змінюється в залежності від характеру виробництва.

Пожежі та вибухи на енергетичних підприємствах наносять значний матеріальний збиток, тому що у вогні знищуються будівлі, підприємства, складне дороге устаткування, сировину, матеріали. Вибухова небезпека електростанцій обумовлюється наявністю складного паливного господарства, системи для спалювання палива, розгалуженої кабельної мережі, застосуванням маслонаповненого устаткування та апаратури. У великій мірі пожежовибухонебезпека залежить від виду палива, що використовується. Велику небезпеку становить виробництво електроенергії із застосуванням твердого палива, серед якого найбільш пожежонебезпечним є буре вугілля та торф [248].

Особливу небезпеку на ТЕС становлять бункери пилу великих розмірів, в яких виникають вибухи пило-повітряної суміші, причому великої руйнівної сили. Основна причина вибухів – обвалення тліючих накопичень малорухливих відкладень пилу при спорожненні бункера. Дія захисних факторів, що перешкоджають розвитку вибуху в бункері незначна – вміст

кисню в газовому середовищі над рівнем пилу вищий, ніж, наприклад, в циклоні, оскільки простір над вугільним пилом вентиляється припливним повітрям через нещільності. Вибухонебезпечне середовище усередині системи пилоприготування може утворюватися при порушенні режиму її пуску та під час зупинки. При непрацюючій системі приготування вугільного пилу повітря надходить до апаратів, що може призвести до окислення можливих залишків осілого пилу. Пил осідає в апаратах через недостатню продувку системи перед зупинкою обладнання, а також в результаті наявності на внутрішніх стінках обладнання нерівностей та шорсткості.

Розглядаючи пожежну безпеку об'єктів енергетики, необхідно звернути увагу на безпеку кабельного господарства. Використання турбо- і гідрогенераторів потужністю 30 МВт і більше з більш жорсткими умовами їх експлуатації (висока температура, високий тиск, підвищена напруга) призвело до збільшення кількості горючих силових та контрольних кабелів. Майже всі кабелі, що використовуються, мають горючу ізоляцію (кабельний папір, полівінілхлорид, гума, мінеральні масла, поліетилен, джут тощо). Під час аварій, що супроводжуються розлітанням часток розплавленого металу, іскор та тепла при короткому замкненні, може статися загоряння горючої ізоляції, як пошкодженого, так і сусіднього кабелів. Пожежі в кабельних приміщеннях та спорудах характеризуються складністю обстановки при їх гасінні і мають тяжкі наслідки, бо призводять до припинення подачі електроенергії споживачам та промисловим об'єктам. Джерелами запалювання на ОКІ можуть бути: високо нагріті поверхні паропроводів турбін; самозаймання промасленої ізоляції паропроводів; теплові прояви електричної енергії (електрична дуга, електричний пробій ізоляції, тощо); іскри під час роботи двигунів та при виконанні вогневих робіт; розжарені частки, іскри металів при виконанні ремонтних робіт тощо. Швидкому поширенню пожежі на ОКІ сприяє велика протяжність та складність системи трубопроводів, наявність кабельного господарства, горючих будівельних конструкцій, пластикових полімерних покриттів підлоги, стін, обладнання

тощо. За умов розгерметизації технологічного обладнання пожежа буде швидко поширюватися по дзеркалу розлитих рідин (наприклад, масла) та в газоповітряних хмарах викидів технологічного обладнання. Небезпечним є поширення полум'я по вибухонебезпечній воднево-повітряній суміші. При цьому вогонь швидко поширюється на інші установки та споруди по уламках, що розлітаються внаслідок вибуху [255].

Таким чином, приміщення ОКІ характеризуються надзвичайно високим рівнем вибухопожежної та пожежної безпеки. Системи вибухопередження, вибухо- та протипожежного захисту ОКІ мають об'єднувати заходи і засоби як активного, так і пасивного захисту. Активний захист визначається застосуванням речовин, техніки, засобів, що придатні в будь-який час бути мобілізованими для ліквідації НС (події), а пасивний захист визначається застосуванням заходів вибухо- та вогнезахисту, що виконані заздалегідь і не потребують додаткової мобілізації під час позаштатної ситуації[256].

### **2.2.2 Токсична безпека**

Особливу небезпеку з можливими тяжкими наслідками та кількістю жертв становлять собою аварії на ОКІз викидом в атмосферне повітря небезпечних хімічних речовин (НХР).

На сьогодні у світі зареєстровано близько 7 млн. найменувань хімічних речовин. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, близько 70 тис. хімічних речовин різних найменувань знаходяться в обігу щодобово, з яких 20-30 тис. найбільш поширені. Аварійні та інші позаштатні ситуації під час виробництва, транспортування, зберігання та використання хімічних продуктів призводять до появи НХР з небезпечними концентраціями у навколишньому середовищі[257]. Під час пожеж і аварій з наявністю НХР можливе утворення зон хімічного забруднення, зон локальних вибухонебезпечних концентрацій як самих НХР, так і продуктів їх взаємодії з іншими речовинами та матеріалами, займання та вибухи органічних сполук,

отруєння та хімічні опіки населення, яке опинилося в зоні хімічного забруднення, та особового складу підрозділів цивільного захисту, який бере участь у гасінні пожежі або ліквідації наслідків аварії.

В Україні функціонує понад 1800 ОКІ, на яких зберігається або використовується у виробничій діяльності більше 283 тис. тонн НХР [246]:

Аміак ( $\text{NH}_3$ ) – 178,4 тис. т;

Сірчана кислота ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) – 43,7 тис. т;

Азотна кислота ( $\text{HNO}_3$ ) – 16,3 тис. т;

Фосфор (білий, жовтий, червоний, чорний) – 12,4 тис. т;

Хлор ( $\text{Cl}_2$ ) – 9,8 тис. т;

Хлористий водень ( $\text{HCl}$ ) – 5,3 тис. т;

Ацетон – 3,5 тис. т;

Дигідросульфід ( $\text{H}_2\text{S}$ ) – 2,2 тис. т.

Ці об'єкти розподілені за ступенями хімічної небезпеки:

1 ступеню хімічної небезпеки (у зонах можливого хімічного зараження від кожного з них мешкає більше 75 тис. осіб) – 76 об'єктів;

2 ступеню хімічної небезпеки (у зонах можливого хімічного зараження від кожного з них мешкає від 40 до 75 тис. осіб) - 60 одиниць;

3 ступеню хімічної небезпеки (у зонах можливого хімічного зараження від кожного з них мешкає менше 40 тис. осіб) – 1134 одиниць;

4 ступеню хімічної небезпеки (зони можливого хімічного зараження від кожного з них не виходять за межі об'єкту) – 540 одиниць.

Всього у зонах можливого хімічного зараження від цих об'єктів мешкає близько 17 млн. осіб (40,5% від всього населення країни) [246].

Особливу небезпеку для населення та навколишнього середовища становлять такі ОКІ як аміакопроводи, хімічне виробництво, відстійники, сховища небезпечних речовин тощо. Більшість підприємств хімічної промисловості працює на технічно застарілому обладнанні, споживаючи велику кількість природних ресурсів, у тому числі мінеральної сировини. Виробництво супроводжується утворенням великої кількості відходів і



побічних продуктів, які не утилізуються, складуються у відвалах та хвостосховищах. У середньому із 100% хімічної сировини, яка переробляється, у готову продукцію перетворюється лише близько 40%. Найбільш поширеними небезпечними хімічними речовинами на підприємствах хімічної промисловості є аміак, хлор двоокис азоту, акрилонітрил, сірковий ангідрид концентрована азотна та сірчана кислоти, метанол, бензол, їдкий натрій, формалін тощо.

До НХР (надзвичайно і високо токсичних) відносяться[258, 259]:

- деякі сполуки металів (органічні і неорганічні похідні миш'яку, ртуті, кадмію, свинцю, талію, цинку та інших);
- карбоніли металів (тетракарбоніл нікелю, пентакарбоніл заліза та інші);
- речовини, що мають ціанисту групу (синильна кислота та її солі, бензальдегідціангідрон, нітрили, органічні ізоціанати);
- сполуки фосфору (фосфорорганічні сполуки, хлорид фосфору, фосфін, фосфідин);
- фторорганічні сполуки (фтороцтова кислота і її ефіри, фторетанол та інші);
- хлоргідрони (етиленхлоргідрон, епіхлоргідрон);
- галогени (хлор, бром);
- інші сполуки (етиленоксид, аліловий спирт, метил бромід, фосген, інші).

До сильно токсичних НХР відносяться:

- мінеральні і органічні кислоти (сірчана, азотна, фосфорна, оцтова, інші);
- луги (аміак, натронне вапно, їдкий калій та інші);
- сполуки сірки (діметилсульфат, розчинні сульфідни, сірковуглець, розчинні тіоціанати, хлорид і фторид сірки);
- хлор і бромзаміщені похідні вуглеводню (хлористий і бромистий метил);

- деякі спирти і альдегіди кислот;
- органічні і неорганічні нітро і аміносполуки (гідроксиламін, гідрозин, анілін, толуїдин, нітробензол, динітрофенол);
- феноли, крезолі та їх похідні; гетероциклічні сполуки.

До помірно токсичних, мало токсичних і практично не токсичних хімічних речовин, які не представляють собою хімічної небезпеки, відноситься вся основна маса хімічних сполук.

Варто відмітити, що особливу групу НХР складають пестициди – препарати, які призначені для боротьби з шкідниками сільськогосподарського виробництва, бур'янами і т. д. Більшість з них дуже токсична для людини.

Більшість із НХР, у тому числі і слабо токсичні (помірно, слабо токсичні і практично не токсичні), можуть стати причиною тяжкого ураження людини та привести до масових втрат в наслідок НС, що супроводжуються викидами НХР.

Тільки частина хімічних сполук при поєднанні визначених токсичних і фізико-хімічних властивостей, таких, як висока токсичність при дії через органи дихання, шкіряні покрови, велика тоннажність виробництва, використання, зберігання і перевезення, а також можливість легко переходити при НС в головний фактор ураження (пар або тонко дисперсний аерозоль), який може стати причиною ураження людей. Ці хімічні сполуки відносяться до групи сильнодіючих отруйних речовин (СДОР)[260].

СДОР, які можуть викликати масові ураження населення, при аваріях з викидом в повітря, можна розділити на групи:

1. Речовини з переважною дією удушення:

з вираженою дією припікання (хлор, трьох хлористий фосфор, оксихлорид фосфору);

з слабкою дією припікання (фосген, хлорпікрин, хлорид сірки).

2. Речовини переважно загальної отруйної дії (окисел вуглецю, синильна кислота, динітрофенол, динітроортокрезол, етиленхлоргідрин, етиленфторгідрин).

3. Речовини, які мають дією удушення та загальну отруйну дію:

з вираженою дією припікання (акрилонітрил);

з слабкою дією припікання (сірчаний ангідрид, сірководень, окисли азоту).

4. Нейротропні отрути, речовини, що діють на генерацію, проведення і передачу нервового імпульсу (сірковуглець, фосфорорганічні сполуки).

5. Речовини, що мають дію удушення і нейротропну дію (аміак).

6. Метаболічні отрути (етиленоксид, метилбромид, метилхлорид, діметилсульфат).

7. Речовини, що порушують обмін речовин (діоксан).

Фактором ураження НС внаслідок викиду в атмосферне повітря НХР є токсична дія, що визначається концентрацією НХР в атмосферному повітрі та ступенем хімічного зараження місцевості і ОКІ в порівнянні з відповідними гранично допустимими концентрація (ГДК)[261, 262].

Гранично допустима концентрація: норматив – кількість шкідливої речовини в навколишньому середовищі, яка при постійному контакті або при дії за певний час практично не впливає на здоров'я людини та її нащадків (установлюється в законодавчому порядку, при цьому враховується ступінь впливу забруднювачів не лише на здоров'я людини, але й на тварин, рослини, мікроорганізми, а також на природні угруповання в цілому); максимальна концентрація домішок у природному об'єкті, яка при періодичному впливі або протягом усього життя людини не завдає шкоди їй (у т.ч. не спричиняє віддалених наслідків) та навколишньому середовищу в цілому[261].

Використовується декілька видів ГДК у повітрі: максимальна разова (ГДК<sub>м.р.</sub>), середньодобова (ГДК<sub>с.д.</sub>), для населених місць і концентрація для повітря робочої зони (ГДК<sub>р.з.</sub>). ГДК<sub>м.р.</sub> – максимальна концентрація

забруднювача у повітрі, що не викликає рефлекторних реакцій в організмі людини, визначається з проб, які відбираються за 20–30-хвилинний інтервал часу.  $ГДК_{с.д.}$  – концентрація забруднювача у повітрі, яка не чинить прямого чи непрямого впливу на людину при цілодобовому диханні.  $ГДК_{р.з.}$  – така концентрація речовини у повітрі робочої зони, яка при щоденній роботі протягом усієї трудової діяльності не може викликати захворювань або відхилень у стані здоров'я, що виявляються сучасними методами досліджень, у процесі роботи або у віддалені періоди життя сучасного та наступних поколінь [262].

Безпека функціонування ОКІ, де обертаються НХР, залежить від багатьох факторів: фізико-хімічних властивостей сировини, напівпродуктів і продуктів, від характеру технологічного процесу і надійності обладнання, умов зберігання і транспортування хімічних речовин, стану контрольно-вимірювальних приладів і засобів автоматизації, ефективності засобів протиаварійного захисту і т. д.

Аналіз структури підприємств, що виробляють або використовують НХР, показує, що в їх технологічних лініях обертається, як правило, незначна кількість токсичних хімічних продуктів. Значно більша кількість НХР за об'ємом знаходиться на складах підприємств. Це приводить до того, що при аваріях у цехах підприємств в більшості випадків мають місце локальне зараження повітря, обладнання цехів, території підприємств. При цьому ураження в таких випадках може отримати в основному обслуговуючий персонал [263].

При аваріях на складах підприємств, коли руйнуються ємності, НХР розповсюджується за межі підприємства, що приводить до масового ураження не тільки персоналу підприємства, але і населення, що розташовано в зоні ураження ОКІ.

На виробничих площадках або на транспорті НХР, як правило, знаходиться в стандартних ємностях. Це можуть бути оболонки з алюмінію, заліза або залізобетону, в яких підтримуються умови, що відповідають

заданим режимам зберігання. Форма і тип ємностей вибираються виходячи із масштабів виробництва або використання, умов їх транспортування. Найбільш широке розповсюдження сьогодні отримали ємності циліндричної форми та шарові резервуари.

При організації робіт з ліквідації хімічної небезпечної аварії на об'єкті господарської діяльності і її наслідків необхідно враховувати не тільки фізико-хімічні властивості НХР, але і їх вибухову і пожежну безпеку, можливість виникнення протягом пожежі нових сильнодіючих отруйних речовин і на цій основі приймати необхідні заходи щодо захисту персоналу, який бере участь в роботах.

Для будь-якої аварії характерні стадії виникнення, розвитку і спаду небезпеки. На хімічному небезпечному об'єкті в розпалі аварії можуть діяти, як правило, декілька факторів ураження: пожежа, вибухи, хімічне зараження повітря і місцевості та інші, а за межами об'єктів – зараження довкілля[264, 265].

Дія НХР через органи дихання частіше, ніж через інші шляхи дії, приводить до ураження людей, реалізується на великих відстанях і площах з швидкістю вітрового переносу. Масштаби ураження при НС внаслідок викиду НХРв значній мірі залежать від метеорологічних обставин і умов зберігання НХР. Так, іноді сильний викид може не спричинити значної шкоди або він буде мінімальним, в той же час менший викид в інших умовах може привести до значно більшої шкоди.

Із цих особливостей НС внаслідок викиду НХР слідує: захисні заходи і, понад все, прогнозування, виявлення і періодичний контроль за зміною хімічної обстановки, оповіщення персоналу підприємства, населення і підрозділів ДСНС, повинні проводитися з надзвичайно високою оперативністю; серед населення і підрозділів ДСНС, що знаходяться в зонах поширення НХР, можуть бути уражені, для обстеження яких і надання їм медичної допомоги знадобляться значні сили і засоби.

Локалізація джерела витоків НХР має визначну роль в попередженні масового ураження людей. Швидке здійснення цього завдання може направити аварійну ситуацію в контролюєме русло, зменшити викид НХР і значно знизити шкоду.

Комплекс заходів із захисту населення і співробітників ДСНС від наслідків хімічної НС включає:

- організаційні і оперативні заходи з організації, планування і проведення заходів з захисту населення і співробітників ДСНС на підлеглий території;
- інженерно-технічні заходи щодо дотримання умов безпеки при використанні, зберіганні, транспортуванні НХР;
- підготовка сил і засобів для ліквідації наслідків хімічних НС;
- навчання населення порядку і правилам поведінки в умовах хімічних НС;
- забезпечення безпеки населення і використання засобів індивідуального і колективного захисту;
- повсякденний хімічний контроль;
- проведення попереджувальних і профілактичних заходів на ОКІ;
- прогнозування можливих наслідків хімічної НС;
- попередження (оповіщення) про безпосередню небезпеку ураження НХР;
- тимчасова евакуація (відселення) населення із небезпечних районів;
- хімічна розвідка району аварії;
- знаходження і надання медичної допомоги потерпілим;
- локалізація і ліквідацію наслідків хімічної НС.

Попри високу небезпеку НС викликаних викидами НХР, їх кількість та питомий вклад в загальне забруднення атмосферного повітря є незначним. Так, протягом останніх 10 років в Україні не зареєстровано жодної аварії з викидом кислот вище об'єктового рівня; при цьому за цей же період – сталося 7 аварій місцевого рівня з викидом аміаку, хлору або сірководню [246].

Основними джерелами забруднення атмосферного повітря, в тому числі понад ГДК, є повсякденна робота ОКІ та транспорту. При цьому якщо для атмосферних аерозолів є характерним гравітаційне осадження, 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 [266–268].

На основі хімічного аналізу нижньої частини атмосфери [269, 270] визначимо найнебезпечніші речовини, що містяться в повітрі (табл. 2.1).

Таблиця 2.1. Основні забруднюючі газоподібні речовини, що містяться в атмосферному повітрі України за нормальних умов

Небезпечна речовина	Максимальне значення, мг/м <sup>3</sup>	Середньодобова ГДК [48], мг/м <sup>3</sup>
Гази		
Діоксид азоту (NO <sub>2</sub> )	0,172	0,04
Формальдегід (HCHO)	0,0138	0,003
Діоксид сірки (SO <sub>2</sub> )	0,18	0,05
Оксид азоту (NO)	0,12	0,06
Оксид вуглецю (CO)	3,6	3
Дигідросульфід (H <sub>2</sub> S)	0,0224	0,008
Рідкі аерозолі		
Сірчана кислота (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	0,18	0,1
Анілін (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NH <sub>2</sub> )	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

Як видно з табл. 2.1, навіть у нормальних умовах нас оточує досить великий спектр НХР із небезпечними для здоров'я концентраціями. До таблиці включено такі речовини як сірчана кислота та анілін, які в

атмосферному повітрі можуть зустрічатися як у газоподібному, так і рідкому стані. Найчастіше в атмосферне повітря вони потрапляють у газовій фазі у вигляді парів, тому на початковому етапі їх можна розглядати як газоподібні, однак в умовах атмосфери такі речовини швидко конденсуються та гідролізуються і тому в основному в атмосферному повітрі перебувають у вигляді рідких аерозолів водних розчинів. Найбільше перевищення ГДК у повітрі відноситься до сажі, однак дані значення взяті поблизу точкових джерел – викиди ТЕС та ТЕЦ, 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 атмосферному повітрі значно нижче максимальних значень, однак їхній найбільший вміст реєструється саме в густонаселеній міській місцевості [271], що призводить до підвищення небезпеки для населення України.

Всі розглянуті небезпечні речовини є нестійкими в атмосферному повітрі та з різною інтенсивністю змінюють свій агрегатний стан, взаємодіють між собою та з іншими компонентами повітря.

Крім того, при виникненні аварій чи позаштатної ситуації на ОКІ зі значним вмістом НХР у зоні викиду відбувається різкий сплеск концентрації тієї або іншої речовини.

Захист від НХР організовується і здійснюється безпосередньо на ОКІ, де головна увага приділяється заходам попередження виникнення можливих НС. Вони носять як організаційний, так і інженерно-технічний характер і спрямовані на виявлення і усунення причин аварій (катастроф), максимальне пониження можливих руйнувань і втрат, а також створення умов для своєчасного проведення робіт з локалізації і ліквідації можливих наслідків хімічної небезпечної ситуації.



Для попередження та мінімізації наслідків НС, пов'язаних з витоком (викидом) НХР, необхідно:

- створювати на всіх об'єктах, які містять НХР, системи раннього виявлення виливу (викиду) НХР та оповіщення персоналу об'єктів і населення, що працює та проживає у зоні можливого ураження;

- застосовувати найбільш прогресивні хімічні технології з метою запобігання промисловим аваріям, захисту людей та навколишнього середовища;

- створювати ефективні системи технологічного контролю і діагностики безаварійної зупинки виробництва та уникнення аварійної ситуації;

- завчасно прогнозувати зони ймовірного ураження відповідно до реальних метеоумов;

- завчасно накопичити необхідну кількість засобів індивідуального та колективного захисту персоналу та населення.

Розглянуті фактори підтверджують необхідність розробки методів та засобів попередження НС викликаних наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) ОКІ. Однак для розробки ефективних методів та засобів попередження НС необхідно чітко визначитись з об'єктом негативного впливу на атмосферне повітря. Попри високу небезпеку НС викликаних аварійними викидами НХР, їх кількість та питомий вклад в загальне забруднення атмосферного повітря є незначним. Тому подальші дослідження будуть направлені на оперативний контроль стану забруднення атмосферного повітря ОКІ при їх довготривалій роботі в штатному режимі з урахуванням ризику здоров'ю людини. Потребують виявлені приховані небезпечні стани, викликані повсякденними викидами підвищеної інтенсивності понад ГДК, а також випадки накопичення небезпечних речовин в атмосферному повітрі внаслідок особливостей метеорологічних умов. Оперативний контроль за наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) ОКІ також дозволить

забезпечити раннє виявлення загроз виникнення аварійних ситуацій (НС) та своєчасність реагування на них.

### **2.3 Методи та засоби, які забезпечують попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури**

Об'єктами критичної інфраструктури називають такі об'єкти, засоби, обладнання, мережі та служби, які, у разі їх пошкодження чи руйнування, будуть значно впливати на здоров'я, безпеку, економічний стан чи ефективне функціонування нашої держави. Така інфраструктура, у разі її незахищеності, може бути вразливою до дій НС техногенного характеру. Захист ОКІ базується на збереженні їх функціональності, стійкості та надійності. Це комплексний захід, що виходить за межі національних кордонів, зважаючи на інтегрованість та взаємозалежність суспільства нашої держави та європейського суспільства (енергетичне постачання, засоби зв'язку, транспортні мережі тощо).

На основі ґрунтовного аналізу уразливості і стійкості ОКІ України та світу в НС, а також особливостей і причин виникнення НС техногенного характеру на ОКІ пришли до висновку, що основною переважна більшість НС на ОКІ пов'язана із пожежами (вибухами) в приміщеннях таких об'єктів. При цьому як нормальна так і аварійна робота ОКІ характеризується значними викидами в атмосферне повітря небезпечних речовин.

Тому, аналіз методів та засобів, які забезпечують попередження НС техногенного характеру на ОКІ будемо проводити за двома напрямками: методи та засоби, які забезпечують попередження НС техногенного характеру внаслідок пожеж в приміщеннях ОКІ, та методи і засоби, які забезпечують попередження НС техногенного характеру внаслідок небезпечного забруднення атмосферного повітря на території (поблизу) ОКІ.

Спочатку розглянемо методи та засоби, які забезпечують попередження НС техногенного характеру внаслідок пожеж в приміщеннях ОКІ.

Протипожежна система ОКІ може бути складною і розгалуженою. Конструкція системи повинна бути заснована на загальному підході до протипожежної системи, а саме на трьох умовах: виявлення наявності вогню, оповіщення людей і відповідних служб при виявленні вогню, а також повинна мати механізм стримування або ліквідації загоряння, якщо це можливо [255].

Існує багато варіантів по виявленню і запобіганню пожеж, але тільки декілька слід використовувати на ОКІ. Наприклад, основним завданням протипожежної системи в інформаційних центрах є контроль осередку загоряння без порушення роботи підприємства і загрози життю людей. Розглянемо дві основні категорії: виявлення вогнища загоряння і аспіраційне виявлення диму.

Виявлення осередка загоряння – для успішного захисту ОКІ необхідно завчасне попередження за допомогою датчиків диму або індикаторів тепла. Оскільки повітряні потоки швидкі в закритих зонах, дуже важливо зрозуміти різницю між типами датчиків.

Іонізаційний індикатор диму найлегше визначить займання, яке зазвичай відбувається на хімічних складах, але повільніше виявляє тліючий вогонь, який в основному з'являється в інформаційних центрах або в зонах телекомунікаційного обладнання. Іонізаційний індикатор майже миттєво розпізнає полум'я по типу загоряння частинок від 0,01 до 0,3 мікрон. Однак, іонізаційний індикатор має більш обмежені можливості і працює повільніше, якщо він встановлений в зонах з високими повітряними потоками, які часто зустрічаються на ОКІ. Фотодетектор диму швидко реагує на тліючий вогонь по типу загоряння частинок від 0,3 до 10,0 мікрон, що робить його більш доцільним для більшості ОКІ [255].

Одним з рішень для швидкого виявлення різних за типом осередків загоряння може бути багатокритерійний детектор, який використовує фотоелектричне виявлення частинок спільно з індикаторами, які виявляють інші продукти загоряння, такі як окис вуглецю або інфрачервоне випромінювання. Мікропроцесор таких датчиків обробляє різні сигнали, використовує алгоритми для запобігання помилкового сигналу тривоги і одночасно збільшує час відгуку на реальні пожежі. Інше рішення – це використання інтелектуального високочутливого детектора, який дуже схожий на стандартні детектори, за винятком того, що він використовує більш сучасні методи виявлення.

При високочутливому виявленні зазвичай застосовується сфокусоване лазерне джерело для досягнення чутливості в 100 разів і більше, ніж у стандартних інфрачервоних фотодетекторах диму. Такі детектори розроблені для реагування на початкові стадії пожежі з щільністю в 0,02% на фут затемнення і забезпечують персоналу цінний час для обстеження небезпечної зони, і вжиття відповідних заходів зменшення ризику. Це адресні детектори і вони здатні відправляти інформацію до центрального пункту управління, таким чином визначаючи точне місцезнаходження диму. Деякі з них можуть автоматично компенсувати зміни навколишнього середовища, такі як вологість і підвищене забруднення. Їх також можна запрограмувати на певну чутливість в залежності від часу доби. Наприклад, коли працівники будуть залишати територію, чутливість буде автоматично підвищуватися. Високочутливі детектори зазвичай розміщують під фальшполом, на стелі, а також у вентиляційних каналах для виявлення можливих пожеж всередині системи вентиляції та кондиціонування повітря.

Аспіраційне виявлення диму – більшість детекторів диму з відбором проби повітря можуть виявити джерело загоряння. Деякі системи можуть бути в 1000 разів чутливіші, ніж стандартні фотодетектори або іонізаційні детектори і вони здатні виявляти побічні продукти загоряння зі щільністю в 0,00046% на фут затемнення. Цей тип виявлення передбачає досконалу

систему повідомлення для керівництва ОКІ або відповідного персоналу, які можуть втрутитися і вжити будь-які дії до того, як загоряння обернеться загибеллю людей [255].

В роботі [272] розроблено концепцію та структурно-функціональну схему автоматизованої краудсорсингової системи моніторингу НС на ОКІ міст, що дозволяє підвищити оперативність виявлення та реагування на НС. Проаналізовано склад, основні елементи системи та принцип її функціонування. Наведено типову комплектацію інтелектуального сенсорного пристрою. Розроблено низку постановок математичних задач синтезу раціональної топології бездротових сенсорних мереж.

У дослідженні [273] запропонована оцінка ймовірності виникнення НС на ОКІ унаслідок пожежі шляхом аналізу марковської моделі.

У статті [274] зазначено, що з погляду на статистику втрат реєстрованих інцидентів, обґрунтовано доводить, що НС, унаслідок пожежі є найбільш важливою причиною великих втрат на ОКІ. Тому передові заходи техногенної безпеки можуть допомогти звести до мінімуму ризик таких збитків. Це тема робочої групи ProcessNet «Протипожежний захист в хімічній промисловості» [275]. А також запропонованої методології управління ризиками для запобігання пожежам, що базується на заходах захисту в залежності від горючих компонентів техногенного навантаження [276].

У США введено стандарт [277] спрямований на забезпечення безпеки ОКІ із застосуванням сучасних засобів виявлення НС.

У Великобританії, у доповіді [278], присвяченій протипожежному зберіганню вибухонебезпечних речовин, що знаходяться у державних службах, розглянуті системи протидії НС різного характеру, в тому числі і унаслідок пожежі на ОКІ.

На ОКІ ядерної промисловості, велика увага приділена безпеці від НС унаслідок пожеж. Так, у доповіді [279] обговорюється протидія пожежам та

іншим техногенним НС. Особливу увагу приділено застосуванню сучасних засобів виявлення НС подібного характеру.

У США при захисті ОКІ від НС, застосовують стандарт NFPA [280], де застосовуються мультиспектральні інфрачервоні оптичні детектори [281], які здатні виявляти НС на великих відстанях через потенційно сильне задимлення. Застосовується система з додатковими датчиками, щоб уникнути помилкових спрацьовувань при електромагнітних перешкодах.

Також в якості альтернативи NFPA, на окремих ОКІ застосовують системи Det-Tronics [282] – світового лідера в області систем безпеки, що забезпечують виявлення і зменшення небезпеки для ОКІ і небезпечних виробництв, застосовуючи інфрачервоні детектори полум'я типу EagleQuantumPremier.

Авторами в роботі [283] приділено увагу випадкам, які мали місце на ОКІ зі збереженням вибухонебезпечних речовин. Аналіз показав, що причини пожежі, значно, менш технічні, а здебільш – це результат зовнішніх впливів, та є наслідком порушень правил безпеки.

У роботах [284, 285] наведені аспекти створення системи виявлення НС в хімічних лабораторіях. Концепція цього проекту полягає в розробці системи попереджень для ОКІ подібного типу з метою мінімізації ризику і підвищення безпеки. Для досягнення цих цілей розглянуті стандартні фактори, які супроводжують НС [286] і пропонується метод «Ідентифікації та оцінки небезпеки». Там же запропонований метод «Списку небезпечних хімічних сполук» [287], що мають специфічні параметри займання і горіння [288, 289].

У статті [290] описується система безпеки для ОКІ, які містять вибухонебезпечні речовини підземного типу складування на підземному об'єкті в Сінгапурі. Дана система відповідає директиві SAF по ліцензуванню вибухонебезпечних об'єктів і стандарту НАТО «Зберігання і транспортування боєприпасів» [291, 292].

У роботі [293] пропонується застосування алгоритму виявлення полум'я по образах в просторі, що є досить перспективним напрямом, але вимагає тривалого навчання нейронної моделі.

У роботі [294] запропоновано метод нейронних мереж по виявленню НС, унаслідок пожежі та пропонується нова система виділення ознак та нова нейронна мережа з прямим зв'язком, яка має підвищену швидкість обчислень, ніж впроваджені в даний час системи глибокого навчання. Нейронні системи пропонується використовувати і для виявлення задимлення [295]. Авторами [296, 297] були запропоновані більш досконалі алгоритми виявлення диму за відео зображеннями.

У роботі [298], розглянуто виявлення полум'я за відеосигналом, базуючись на обробці спектру відеосигналу. У статті [299] представлена технологія обробки зображень для автоматичного виявлення полум'я і диму в режимі реального часу в тунелях.

В дослідженнях [300, 301] запропоновано метод виявлення НС, який базується на спектральному аналізі оптичного потоку [302], що дозволяє визначити розміри і площу НС [303]. Відеосистеми з виявлення пожеж отримали найбільше поширення і все частіше використовуються у моніторингу НС, пов'язаних з лісовими пожежами, пожежами в авіаційних ангарах [304]. Так у роботі [305] запропоновано спосіб визначення полум'я за Rgb (колірними) і Ycbcr (компонентними) спектрограмами, що дає ряд переваг при виявленні факторів НС, унаслідок пожежі на стадії полум'яного горіння.

У роботі [306] описано методу виявлення полум'я і диму в режимі реального часу, яка базується на накопиченні зображень переднього плану, що дозволяє виявляти пожежі в режимі реального часу в трьох випадках: вогонь з полум'ям і без диму, вогонь з димом і без полум'я, вогонь з полум'ям і димом.

У серії робіт описано інструмент для виявлення НС, що включає: спостереження за людьми, CCD-камери, інфрачервоні камери [307], бездротові

сенсорні мережі (WSN) [308], метод Демпстера-Шефера [309], нечітку логіку [310] і пороговий метод [311]. Автори стверджують, що використання нечіткої логіки для компіляції даних, дозволяє забезпечити організацію формування даних про НС більш ефективною.

Метод виявлення небезпечних чинників НС за спектроскопічною складовою, так званої диференціальної спектроскопією поглинання світла (DOAS) запропонований у [312], дозволяє виділити полум'я на фоні об'єктів, які швидко рухаються.

У статті [313] розглядається можливість прогнозування динаміки НС з використанням інверсної обчислювальної газодинаміки і дотичної лінеаризації, що також підвищує ймовірність виявлення НС.

У [314, 315] запропоновані моделі поширення полум'я і прогнозу теплового випромінювання, яке формується фронтом полум'я пожежі, яка, виникаючи на території ОКІ, може привести до перегріву та вибухів технологічного устаткування при сильному тепловому випромінюванні. У статті [315] метод сегментації доданий, як додатковий до [314], при визначенні області виникнення пожежі.

У дослідженні [316] запропоновано метод автоматичної обробки зображення на наявність в ньому особливих піксельних послідовностей, що характеризують полум'я пожежі.

У роботі [317] запропоновані точні алгоритми виявлення НС унаслідок пожежі, але поза розглядом лишилися проблеми ідентифікації, що призводить, на думку авторів [318] до високої частоти помилкових спрацьовувань. Також у цій роботі представлено новий відеодетекторний метод виявлення зображень пожеж, який складається з чотирьох етапів. Спочатку застосовується алгоритм віднімання фону для виявлення рухомих областей. Далі, можливі області пожежі визначаються за допомогою СІЕ гами [319]. На третьому етапі, спеціальний вейвлет-аналіз [320] використовується для того, щоб розрізнити фактичний вогонь і подібні вогню об'єкти, оскільки області, які досліджуються можуть містити рухомі, подібні



вогню, об'єкти. Метод опорних векторів використовується для класифікації, як по реальному зображенню, так і без наявності пожежі. Остаточні експериментальні результати підтверджують, що запропонований метод ефективно виявляє лише пожежі великої площі, коли наслідки НС класифікуються, принаймні, як для місцевого рівня поширення.

У статті [321], автори запропонували метод виявлення диму в приміщеннях об'єкта критичної інфраструктури по радіочастотному діапазону змін середовища об'єкта.

Окремі проблеми захисту від НС унаслідок пожежі на об'єктах атомної промисловості обговорювалася на міжнародному семінарі «International Seminar on firesafety in nuclear power plants and installations-2017». Так в роботі [322] обговорюються шляхи вирішення подібних проблем, на прикладі НС на станції Фукусіма. Пропонується використовувати детерміновану систему для запобігання НС подібного характеру. Переглянуто комплекс протипожежних заходів та розроблено нові стандарти. Авторами [323] пропонується використовувати системи запобігання НС з пристроєм, що реагує на концентрацію водню, а також застосування вогнезахисних перегородок і скорочення запасів палива для дизельних станцій-генераторів.

В роботі [324] авторами пропонується оптоволоконний пристрій попередження НС виходячи з показників температури в місцях з важкими умовами експлуатації, як-то склади чи сховища.

З метою зменшення помилкових спрацьовувань система виявлення НС інтегруються з іншими системами, які обслуговують об'єкт. За статистикою впровадження таких технологій, на прикладі США, зменшилась кількість НС протягом 1977–1997 років на 45,3% [325].

За даними організації NFPA, за 5 років з 2006 по 2010 дві третини НС на ПНО відбулися через відсутність сигналізації або її несправність [326].

Нерідкі випадки, коли НС унаслідок пожежі на ОКІ були виявлені вже при повному їх розвитку. Такі випадки переважно трапляються при загорянні

електропроводки в малодоступних місцях, що вимагає застосування пристроїв, які за своїм принципом дії реагують на такі джерела загорянь. Наприклад, кабелі «SaveCables», які реагують на зміну температури в прокладеній лінії електропроводки [327].

Методи виявлення НС все ще стикаються з проблемами, пов'язаними з помилковим спрацюванням унаслідок недостатньої чутливості, вибіркової та інформативності пристроїв попередження НС.

Шляхами вирішення зазначеної проблеми можна вважати підходи, які запропоновані у статті [328], а саме способи виявлення зміни температури, деформації, розтягуючих зусиль. На відміну від звичайних пристроїв попередження НС запропоновані оптоволоконні датчики використовують все оптичне волокно в якості чутливого середовища.

Авторами роботи [329] запропоновано метод зондування простору на вміст у ньому газів, виділення яких передуює займанню. Особлива увага приділяється контролю газів  $H_2S$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$  в контрольованих приміщеннях [330, 331]. Так виявлення горіння по окису вуглецю ( $CO$ ) докладно описано в роботі [332].

У роботі [333] сформульовано принципові особливості, які властиві автоматизованим системам моніторингу НС. Показано, що доцільним є використання системного підходу при побудові систем раннього виявлення НС на ОКІ, а розробку автоматизованої системи необхідно розглядати як процес, який враховує взаємозв'язки частин системи або окремих її підсистем.

Оскільки, велику проблему викликають помилкові спрацювання запобіжних пристроїв, то дослідженню цього питання присвячена робота [334], мета якої визначити ефективний детектор НС виходячи з умов його застосування.

У роботах [335, 336], описані сучасні уявлення про методи і способи виявлення пожежі. На даний час досить повно розглянуті методи вимірювань

та аналіз газоподібних середовищ, які мають місце до і під час загоряння [337].

Авторами роботи [338] доведено, що впровадження методів штучного інтелекту значно підвищує ефективність технології раннього виявлення НС. Запропонований в роботі пристрій контролю, може обробляти ознаки НС унаслідок пожежі одночасно по декількох каналах вимірювання: дим, температура,  $\text{CO}_2$ .

Метод напівпровідникових технологій [339] дозволяє виявляти вогонь при пожежі. Мінімізувати загрози людині та навколишньому середовищу.

Обґрунтування підходів до вибору системами виявлення НС унаслідок пожежі середнього та великого розміру, наведено в роботі [340]. В роботі наголошується про факт, що детектори без мікропроцесорів і схем підтримки менш складні і більш надійні. Процесор може бути вбудований в панель управління, щоб система використовувала складні алгоритми обробки сигналу для ідентифікації ознак НС і її характеристик. Це може забезпечити можливість швидкого виявлення осередку НС, в той же час знижуючи загальні витрати на систему [341].

В роботі [342] автори доводять, що дані від різних розподілених датчиків по  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ , диму, тепла на загальному пульті управління знижують частоту помилкових спрацьовувань.

З панелі керування можна отримати дані про точне місце знаходження осередку НС за даними просторової системи виявлення пожежі, як наведено в [343]. Це можуть бути теплові, димові, оптичні, фотоелектричні, акустичні, барометричні, іонізаційні, газові, оптоволоконні, магнітоконтактні, електроконтактні і комбіновані датчики [344, 345].

Робота пристрою, який реагує на зміни теплового балансу із зони НС [346] заснована на принципі використання теплових властивостей газів, рідин, металів і напівпровідників [347].

Ефективність порогових пристроїв на основі теплового ефекту відносно низька, оскільки формує сигнал тривоги тільки при досягненні деякого встановленого порога температури спрацьовування.

Більш ефективними є теплові детектори диференціального і максимально-диференціальної дії [348], які здатні видавати сигнал тривоги на більш ранній стадії розвитку НС, що обумовлено реєстрацією не порогового значення температури, а похідною в часі процесу підвищення температури контрольованого об'єму приміщення ОКІ.

Одним з інноваційних підходів в області теплових датчиків вважається застосування розподіленого оптоволоконного датчика [349].

В роботі [350] авторами пропонується використовувати комбіновані протипожежні системи із застосуванням сучасних інформаційних технологій.

Виходячи з припущення, що на стадії пожежі дим з'являється набагато раніше ніж інші ознаки горіння, автори [351] у якості ключового параметру для виявлення НС унаслідок пожежі на ОКІ розглядають масову концентрацію диму, його об'ємну частку в приміщенні та розподіл за розмірами частинок (гранулометричний розмір).

Для ідентифікації молекул газу с визначеними характеристиками автори [352] використовують технології, які ґрунтуються на зміні електричних властивостей матеріалу або композиту.

В якості чутливих матеріалів в залежності від поставленої задачі можуть бути використані і вологопоглинаючі матеріали, на полімерній основі [353]. Також для виявлення горючих газів в осередку НС у приміщеннях ОКІ можуть застосовуватися калориметричні методи [354].

Автори [355] стверджують, що за концентрацією  $O_2$  можна визначити тип пожежі – полум'яний, тліючий або проміжний.

Втім застосування методів зондування, заснованих на спектроскопії, обмежені в застосуванні через високу вартість, чутливість до зовнішнього впливу (туман, дим, пара), підвищеними вимогами до надійності. У загальному випадку мова йде про забезпечення високих метрологічних

параметрів, а саме – чутливості, селективності і стабільності вимірювань та контролю параметрів повітряного середовища приміщень ОКІ.

Отже, для достовірного і раннього виявлення загроз виникнення НС техногенного характеру на ОКІ, наряду з достатнім розвитком якісних характеристик чутливих елементів датчиків окреслених параметрів, потребують удосконалення підходи та алгоритми обробки таких даних.

Далі розглянемо методи і засоби, які забезпечують попередження НС техногенного характеру внаслідок небезпечного забруднення атмосферного повітря на території (поблизу) ОКІ.

Контроль забруднення атмосферного повітря на території ОКІ має ряд характерних особливостей, що вимагає специфічних підходів з метою попередження НС. Такими підходами може бути стаціонарно розташована система (вишка, стаціонарний зонд, стаціонарний аеростат, тощо) [356] реєстрації факторів, що передують виникненню НС. Або це може бути автономний безпілотний літальний апарат (БПЛА).

БПЛА визначають місцезнаходження осередків або фонові перевищення концентрацій забруднюючих речовин над територією чи поблизу ОКІ [357], в тому числі викликані пожежами [358], де оцінюється використання існуючих системи дистанційного зондування для активного виявлення НС, з акцентом на використання таких системи як систем протидії НС.

На БПЛА та у стаціонарних системах застосовуються пристрої контролю забруднення атмосферного повітря небезпечними речовинами на території ОКІ. Розглянемо деякі особливості застосування наведених методів при застосуванні їх на території ОКІ.

Так в роботі [359], описано метод, який можливо застосовувати для контролю великих територій, в тому числі з кількома суміжними ОКІ. У роботі [360] мова йде про використання БПЛА з метою проведення локального моніторингу стану забруднення атмосферного повітря із

застосуванням роботизованої системи, що дозволяє декільком БПЛА здійснювати безперервне спостереження за об'єктами.

Автори роботи [361] пропонують використання середньо-інфрачервоного і теплового діапазонів пристроїв виявлення джерела НС на борту бортових платформ і супутників [362], що дозволяє виявляти осередки НС на поверхні Землі [363].

Застосування дистанційних датчиків, розташованих на стаціонарних вишках поворотного (кутове сканування) спостереження [364] лазерного типу [365] можуть бути використані для активного виявлення осередків НС з різними фізичними факторами та контролю забруднення атмосферного повітря на території ОКІ [366].

Ці інструменти часто позиціонуються в системах забезпечення постійного моніторингу навколишніх територій, як-то, лісових масивів [367] чи ОКІ [368].

Авторами роботи [369] обговорюється набір пристроїв, які знаходяться на борту БПЛА. Показано, що найбільш прийнятними для БПЛА вертолітного типу, є відео та інфрачервоні сенсори або ж їх одночасне використання.

У роботі [370] описаний спосіб реєстрації НС на великій площі в автоматичному режимі, який засновано на методиці розпізнавання образів.

В роботах [371-373], автори віддають перевагу при застосуванні на БПЛА відеокамерам видимого і інфрачервоного спектру.

Так використання роботизованих керованих дирижаблів запропоновано в роботі [374], як засобу моніторингу і контролю забруднення атмосферного повітря на території ОКІ. Застосування такого ж типу БПЛА описано і в роботі [375].

У роботі [376] розглянуто застосування дирижабля як засобу моніторингу за станом навколишнього середовища на території та поблизу ОКІ.

Продовження цього напрямку є дослідження проведені в роботі [377], де наведено конструктивні особливості і апаратне забезпечення малогабаритного дирижабля для спостереження за невеликою територією, що є досить прийнятним для використання при контролі забруднення атмосферного повітря на території невеликого по площі ОКІ.

Останнім часом такого типу БПЛА набули поширення при спостереженні за ОКІ військового призначення [378].

Застосування БПЛА типу дирижаблів або зонд, дозволяє розширити можливості системи контролю забруднення атмосферного повітря на території об'єкта та значно знизити витрати на обслуговування таких систем.

У роботі [379] розроблена автоматизована система, яка може ефективно використовуватися на різних ОКІ для виявлення шкідливих домішок повітря, таких як: компоненти холодоагентів, пально-мастильних матеріалів, вихлопних газів турбін і двигунів, ракетних палив, порохових і вибухових газів, технічних рідин, акумуляторних газів, дезінфекційних засобів, продуктів метаболізму людини, побутових газів, виділень із синтетичних матеріалів.

В роботі [380] розглядаються профілактичні та захисні системи. Також в [381], йдеться, про системи, що запобігають НС на ОКІ, які включають засоби виявлення НС та автоматизовані системи протидії поширенню наслідків НС при зберіганні НХР. Основною метою є безпечна експлуатація ОКІ при низькому рівні ризику.

Ефективною парадигмою протидії існуючій тенденції наростання небезпеки НС техногенного характеру на ОКІ є застосування систем раннього виявлення загроз[382]. Основним джерелом отримання такої інформації є стан повітряного (газового) середовища в приміщеннях та на території об'єктів критичної інфраструктури. Оперативний контроль стану повітряного середовища дозволяє виявляти передвісники НС, пов'язані із небезпекою загорянь, вибухів, а також токсичною небезпекою внаслідок забруднення атмосферного повітря понад ГДК.

Розглянуті методи та засоби, які забезпечують попередження НС техногенного характеру розглядають повітряне середовище в приміщеннях та на території ОКІ переважно як лінійну систему. При цьому повітряне середовище в умовах небезпеки являє собою складну нелінійну динамічну систему, яка характеризується дисипативною структурою і самоорганізацією [383]. У такій системі класичні методи не дозволяють виявляти наявні складні зв'язки між елементами, оскільки ґрунтуються на лінійних принципах, які зазвичай порушуються. Це в свою чергу призводить до некоректного подання реальних фізичних процесів, що відбуваються в повітряному середовищі. Однак характер динаміки стану повітряного середовища на етапі виникнення небезпеки має першорядне значення для попередження ураження і загибелі обслуговуючого персоналу, руйнування технологічного обладнання і агрегатів, викидів небезпечних речовин в атмосферне повітря [384].

У зв'язку з цим активною областю досліджень стають методи нелінійної динаміки [385]. Найбільш популярними для дослідження різних складних систем стають методи, що базуються на кореляційній розмірності, показниках Ляпунова і ентропії [386]. Однак застосування зазначених методів ґрунтується на досить тривалих рядах даних спостережень, які для реальних природних і технічних систем не завжди вдається отримати. Некоректне застосування таких методів, особливо до природних систем, часто призводить до помилкових результатів [387]. Щоб успішно досліджувати складну систему, як повітряне середовище, краще використовувати нелінійний інструментарій, який не залежить від апріорних статистичних розподілів даних, дозволяє використовувати короткий набір даних з урахуванням шумів, перехідних процесів і артефактів [388]. Такий інструмент базується на фундаментальній властивості дисипативних динамічних систем – рекурентності станів. Така властивість виражається в тому, що навіть найменше збурення системі, що викликає експоненціальне зростання її стану, через деякий час прагне повернутися до стану, близького



до попереднього, маючи при цьому подібну динаміку. Конструктивним інструментом для вивчення рекурентності станів складних динамічних систем є методи рекурентних діаграм (RP) [389]. Дані методи відносяться до класу візуальних і є основою сучасних методів кількісної оцінки рекурентності станів (RQA). Методи, засновані на RP і RQA, успішно використовуються при дослідженні різних біологічних систем [390], а також в науках про Землю [391]. Однак, попри успішність застосування в інших сферах, можливості відомих методів RP та RQA по відношенню до контролю стану повітряного середовища є досить обмеженими [384] і в системах попередження НС техногенного характеру не використовуються.

Таким чином, для достовірного і раннього виявлення загроз виникнення НС техногенного характеру на ОКІ, наряду з достатнім розвитком якісних характеристик чутливих елементів датчиків окреслених параметрів, потребують удосконалення підходи та алгоритми обробки таких даних. Перспективним напрямом розвитку систем контролю забруднення атмосферного повітря на території ОКІ є застосування роботизованих пристроїв, які дозволяють розширити можливості таких систем та значно знизити витрати на їх обслуговування. При цьому, для подальшої розробки інженерно-технічних заходів попередження НС техногенного характеру на ОКІ доцільно використовувати методи RP і RQA.

#### **2.4 Системний аналіз виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури**

Розробка інженерно-технічних методів попередження НС вимагає проведення системного аналізу їх виникнення в приміщеннях ОКІ, а також внаслідок забруднення атмосферного повітря викидами шкідливих речовин ОКІ, з метою використання для цього стану повітряного середовища в приміщенні та на території (поблизу) об'єктів.

Нехай довільне приміщення об'єкта або сам об'єкт забруднення атмосфери (надалі просто об'єкт небезпеки)  $O$  представляє деяку систему  $S = O \cup E$ , яка складається з об'єкта небезпеки  $O$ , який є потенційним джерелом відповідної НС, і навколишнього середовища  $E = G \cup R$ , де  $G$  – повітряне середовище в приміщенні або атмосферне повітря населених місць, а  $R$  – відповідний об'єкт, який піддається впливу об'єкта небезпеки.

У даній системі об'єкт небезпеки  $O$  спричиняє через повітряне середовище приміщення (атмосферне повітря)  $G$  вплив на об'єкт  $R$ . При цьому об'єкт небезпеки може являти собою технологічне обладнання та агрегати, розміщені в приміщенні або шкідливі речовини, що викидаються об'єктом в штатному або аварійному режимі. Об'єкт впливу небезпеки – обслуговуючий персонал або територія населених місць міської інфраструктури.

Нехай об'єкт небезпеки  $O$  характеризується небезпечними станами  $h \in O$ . Такими станами можуть бути, наприклад, загоряння різних матеріалів або вибухи обладнання і агрегатів в приміщенні, а також викиди шкідливих речовин в атмосферне повітря населених місць. Це означає, що стани  $O$  в моменти часу  $t \in [0, T]$  будуть описуватися випадковою функцією  $h = h(t)$ .

При цьому, повітряне середовище приміщення або атмосферне повітря населених місць  $G$ , за допомогою яких здійснюється перенесення небезпечних станів від відповідного джерела до відповідного об'єкту впливу, також характеризується станом  $z \in G$ . Параметрами стану повітряного середовища приміщення можуть бути, наприклад, небезпечні для обслуговуючого персоналу чинники у вигляді температури, концентрації чадного газу і щільності диму. У разі атмосферного повітря, забрудненого шкідливими речовинами викидів, параметрами стану можуть бути концентрації відповідних забруднювачів в точці контролю.

У довільний момент часу стан  $G$  характеризується випадковою функцією  $z = z(t)$  часу. У цьому випадку стан об'єкта  $R$ , який піддається

впливу небезпеки, може бути охарактеризовано деяким параметром  $l \in R$ , який представляє величину втрат (смерть або шкода здоров'ю, руйнування конструкцій тощо), який наноситься об'єкту впливом об'єктом небезпеки  $O$ . При цьому, параметр  $l$  в довільний момент буде визначатися поточним станом системи, яка визначається  $SG = O \cup G$ , і представляти певний оператор  $l = l(h(t), z(t))$ . При цьому в даній системі  $S = O \cup E$  стан повітряного середовища в приміщенні або забрудненого атмосферного повітря  $z = z(t)$  повністю визначаються станом  $h = h(t)$  об'єкта небезпеки  $O$ . Тому, параметр  $l$  буде повністю визначатися поточним станом повітряного середовища в приміщенні або забрудненого атмосферного повітря. Наприклад, якщо збиток, що наноситься об'єкту  $R$ , залежить від стану  $z = z(x, t)$  небезпечних факторів повітряного середовища в точці простору  $x$  приміщення об'єкта (або точці контролю забрудненої атмосфери), то параметр  $l$  буде представляти відповідну одновимірну інтегральну функцію, яка визначає, наприклад, інгаляційну дозу небезпечних факторів повітряного середовища для обслуговуючого персоналу приміщення або шкідливих речовин атмосферних забруднень.

Таким чином, попередження НС техногенного характеру на ОКІ можна здійснювати на основі поточного контролю або стану  $z = z(t)$  небезпечних факторів повітряного середовища в приміщеннях об'єкта, в яких розміщується технологічне обладнання та обслуговуючий персонал, або стану забрудненої атмосфери з урахуванням втрат (або збитку здоров'ю) наноситься об'єкту  $R$  впливом об'єкта  $O$ .

Стани  $z = z(t)$  повітряного середовища в приміщеннях і забрудненої атмосфери залежать не тільки від джерела небезпеки, але і схильні до дії різних збурень. У більшості практичних випадків, дані про збурення відсутні, і єдиною інформацією є реальні вимірювання станів повітряного середовища і забрудненого атмосферного повітря населених місць з урахуванням невідомих збурень. Вимірювання станів повітряного середовища і

забрудненого атмосферного повітря може здійснюватися як в дискретному, так і в безперервному часі.

Таким чином, системний аналіз виникнення НС внаслідок пожеж (вибухів) на ОКІ та наявності в атмосферному повітрі шкідливих речовин, понад ГДК, свідчить про те, що їх попередження можна здійснювати на основі аналізу станів повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) об'єктів. Даний аналіз дозволить виявляти ранні загоряння в приміщеннях об'єкта і наявність шкідливих речовин, небезпечних для здоров'я людини. Це означає, що при розробці інженерно-технічних методів попередження розглянутих типів НС техногенного характеру повітряне середовище в приміщеннях ОКІ і забруднена атмосфера повинні розглядатися як складні нелінійні динамічні системи, що характеризуються певною динамікою їх стану, які здійснюють передачу впливів від відповідного об'єкта небезпеки до відповідного об'єкту впливу.

У зв'язку з цим, наступні розділи дисертаційного дослідження будуть присвячені розробці нових інженерно-технічних методів попередження розглянутих НС техногенного характеру з урахуванням особливостей динаміки станів складних нелінійних динамічних систем у вигляді повітряного середовища і забрудненої атмосфери і їх впливу на відповідні об'єкти впливу.

## **Висновки розділу 2**

1. До об'єктів критичної інфраструктури відноситься сукупність стратегічно важливих об'єктів для економіки і національної безпеки (електростанції, хімічні і нафтохімічні комбінати, об'єкти нафтогазової промисловості, металургійні заводи і безліч інших підприємств), порушення функціонування яких може завдати шкоди життєво важливим національним інтересам і тому повинні відповідним чином захищатися від відповідних об'єктів небезпеки.

2. Стійкість об'єктів критичної інфраструктури являє собою сукупність організаційних заходів, інженерно-технічних засобів і дій адміністрації і служби безпеки об'єкта, підрозділів цивільного захисту, направлених на забезпечення внутрішньо об'єктового режиму з оперативного, радіаційного, хімічного і екологічного напрямів, і спрямована на попередження надзвичайних ситуацій на об'єкті. Для ефективного визначення уразливості і стійкості об'єктів критичної інфраструктури в надзвичайних ситуаціях повинні регулярно проводитися навчання, за підсумками яких оцінюється рівень її організації і стану, надійність технічних засобів, злагодженість і професіоналізм дій адміністрації об'єкта та підрозділів цивільного захисту.

3. Приміщення об'єктів критичної інфраструктури характеризуються надзвичайно високим рівнем вибухопожежної та пожежної небезпеки. Системи вибухопопередження, вибухо- та протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури мають об'єднувати заходи і засоби як активного, так і пасивного захисту. Активний захист визначається застосуванням речовин, техніки, засобів, що придатні в будь-який час бути мобілізованими для ліквідації надзвичайної ситуації (події), а пасивний захист визначається застосуванням заходів вибухо- та вогнезахисту, що виконані заздалегідь і не потребують додаткової мобілізації під час позаштатної ситуації.

4. Попри високу небезпеку надзвичайних ситуацій викликаних аварійними викидами небезпечних хімічних речовин, їх кількість та питомий вклад в загальне забруднення атмосферного повітря є незначним. Тому подальші дослідження будуть направлені на оперативний контроль стану забруднення атмосферного повітря об'єктами критичної інфраструктури при їх довготривалій роботі в штатному режимі з урахуванням ризику здоров'ю людини. Потребують виявлені приховані небезпечні стани, викликані повсякденними викидами підвищеної інтенсивності понад гранично допустимі концентрації, а також випадки накопичення небезпечних речовин в атмосферному повітрі внаслідок особливостей метеорологічних умов. Оперативний контроль за наявністю в атмосферному повітрі шкідливих

речовинна територія (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури також дозволить забезпечити раннє виявлення загроз виникнення аварійних ситуацій та своєчасність реагування на них.

4. Для достовірного і раннього виявлення передумов виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури, наряду з достатнім розвитком якісних характеристик чутливих елементів датчиків небезпечних параметрів, потребують удосконалення підходи та алгоритми обробки таких даних. Перспективним напрямом розвитку систем контролю забруднення атмосферного повітря на території об'єктів критичної інфраструктури є застосування роботизованих пристроїв, які дозволяють розширити можливості таких систем та значно знизити витрати на їх обслуговування. При цьому, для подальшої розробки інженерно-технічних заходів попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури доцільно використовувати методи RP і RQA, які базуються на дослідженні станів повітряного середовища у приміщеннях об'єктів та забрудненого атмосферного повітря як складних нелінійних динамічних систем.

## РОЗДІЛ 3

### **РОЗРОБКА ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНОГО МЕТОДУ ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ ВНАСЛІДОК ПОЖЕЖ (ВИБУХІВ) У ПРИМІЩЕННЯХ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ**

Вирішення третього наукового завдання включає: дослідження динаміки та розробку мір кореляцій та взаємних кореляцій флуктуацій щодо основних небезпечних факторів повітряного середовища при ранньому загорянні, розробку математичної моделі поточних показників фрактальності станів повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях об'єктів критичної інфраструктури; розробку керуючого алгоритму інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища приміщень об'єктів критичної інфраструктури та опис процедури його реалізації.

#### **3.1 Розробка математичної моделі поточних показників фрактальності щодо станів повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях об'єктів**

Розробка математичної моделі поточних показників фрактальності станів повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях ОКІ здійснювалась наступним чином. По-перше, виконано експериментальні дослідження динаміки небезпечних факторів повітряного середовища при ранніх загоряннях у приміщеннях ОКІ. По-друге, розроблено математичну модель міри автокореляцій і взаємних кореляцій

небезпечних факторів повітряного середовища при ранніх загоряннях у приміщеннях ОКІ. По-третє, розроблено математичні моделі для поточних показників фрактальності вектору прирощення станів повітряного середовища при загорянні в приміщеннях ОКІ у вигляді відповідних мір кореляційної розмірності та рекурентності станів. Після чого здійснений опис математичної моделі поточних показників фрактальності щодо вектору прирощення станів повітряного середовища при загорянні в приміщеннях ОКІ.

### **3.1.1 Експериментальні дослідження динаміки небезпечних факторів повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях об'єктів**

У силу різноманіття складної нелінійної динаміки стану небезпечних факторів реального повітряного середовища при загоряннях у приміщенні ОКІ актуальними стають експериментальні дослідження щодо динаміки основних небезпечних факторів повітряного середовища приміщень.

Відомо, що приміщення ОКІ характеризуються різним пожежним навантаженням, обумовленим, звичайно, кількістю та властивостями горючих матеріалів та апаратів у конкретному приміщенні [392]. Однак динаміка основних небезпечних факторів повітряного середовища залежить не тільки від конкретного пожежного навантаження приміщень, але й від доступу в приміщення повітря, збагаченого киснем, тобто від повітрообміну в конкретному приміщенні. При цьому осередок загоряння розглядається як випадкове джерело, яке викликає відповідні зміни у фізичних компонентів повітряного середовища. В якості основних небезпечних компонентів зазвичай розглядаються температура, щільність диму та концентрація чадного газу (CO). В зв'язку з цим попередження надзвичайних ситуацій внаслідок пожеж на ОКІ можливо здійснювати за допомогою раннього виявлення змін у небезпечних компонентах повітряного середовища, обумовлених загоряннями у приміщеннях ОКІ.



Дослідження проводилися в спеціальній випробувальній камері, що імітує негерметичне приміщення, при підпалі та подальшому горінні тестових горючих матеріалів у вигляді спирту, паперу, деревини та текстилю [393]. Об'єм камери становив  $0,524 \text{ м}^3$ . У верхній частині камери, на висоті  $0,84 \text{ м}$ , розташовувалися чутливі сенсори, що реєструють небезпечні фізичні компоненти повітряного середовища при загорянні відповідних горючих матеріалів. При цьому висота полум'я не перевищувала  $0,2 \text{ м}$ . Значення  $x_i$  небезпечних компонентів повітряного середовища в камері при загорянні матеріалів реєструвалися за допомогою теплового сенсора ТПТ-4 [394], оптичного сенсора щільності диму ДИП-3.2 та сенсора оксиду вуглецю (серії Discovery).

Дані у вигляді сигналів відповідних сенсорів реєструвалися в пам'яті персонального комп'ютера, а розроблене програмне забезпечення дозволяло здійснювати опитування відповідних сенсорів з різною дискретністю в часі. В експерименті опитування сенсорів здійснювалось з дискретністю, рівною  $0,1 \text{ с}$ . Примусовий підпал матеріалів проводився в момент часу, рівний приблизно  $20 \text{ с}$ , що відповідало дискретному відліку часу  $t_{200}$ .

Для дослідження динаміки небезпечних факторів повітряного середовища при ранньому загорянні обиралися два однакових інтервали тривалістю  $200$  відліків ( $20 \text{ с}$ ). Перший інтервал вибирався в проміжку між  $0$ -м та  $200$ -м відліком та відповідав достовірній відсутності загорання. Другий інтервал вибирався в проміжку між  $100$ -м та  $300$ -м відліком і охоплював момент початку загорання горючого матеріалу приблизно в середині цього інтервалу.

Експериментальне дослідження динаміки основних небезпечних факторів повітряного середовища при ранньому загорянні проводилося для кожного з горючих матеріалів у наступній послідовності: спирт, папір, деревина та текстиль. Реєстрація динаміки зазначених факторів повітряного середовища в камері для сеансу загорання кожного з матеріалів здійснювалася протягом загального інтервалу спостереження, рівного  $300 \text{ с}$ .

Після кожного сеансу загоряння тестових матеріалів здійснювалася вентиляція камери протягом 5–7 хвилин з метою встановлення параметрів повітряного середовища в камері в стан, близький до вихідного.

Як ілюстрація на рис. 3.1 наведені результати дослідження динаміки небезпечних факторів повітряного середовища ( $T$  – температури,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\text{CO}$  – концентрації чадного газу,  $\times 10^{-4}\%$ ; і  $D$  – щільності диму,  $\text{дБ/м}$ ) у камері для двох інтервалів аналізу тривалістю по 20 с [395]. При цьому перший інтервал (рис. 3.1, а) відповідає відсутності загоряння в камері, а другий (рис. 3.1, б) – підпалу спирту приблизно в середині цього інтервалу.

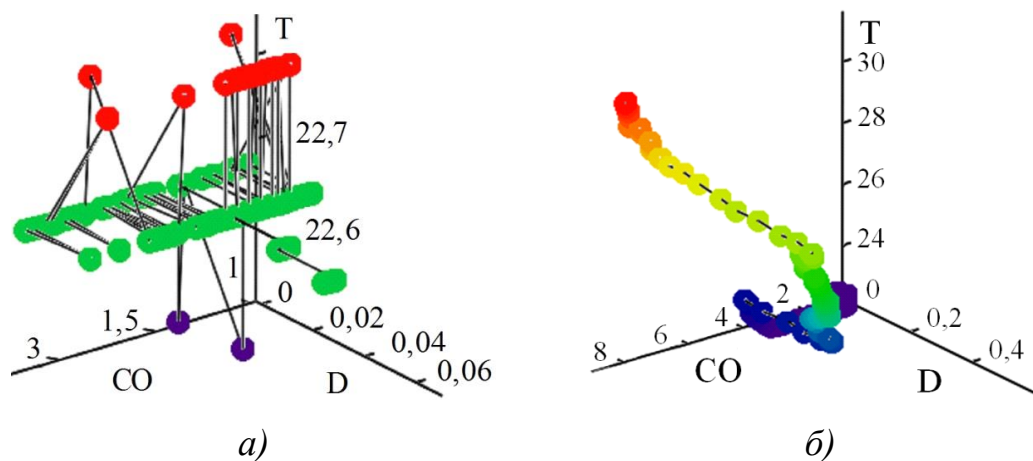


Рис. 3.1 – Динаміка небезпечних факторів стану повітряного середовища в камері для двох інтервалів аналізу: а – відсутність загоряння; б – наявність загоряння спирту в середині інтервалу

Аналогічні результати після звичайної вентиляції камери при підпалі паперу, деревини та текстилю представлені відповідно на рис. 3.2, рис. 3.3 та рис. 3.4.

Точки на рис. 3.1–3.4 відповідають дискретним станам динаміки досліджуваних небезпечних факторів повітряного середовища при загоряннях на відповідних інтервалах спостереження. Колір точок визначає відносний рівень середньої об'ємної температури повітряного середовища в

камері. При цьому мінімальний рівень відповідає фіолетовому кольору, а максимальний рівень – червоному кольору.

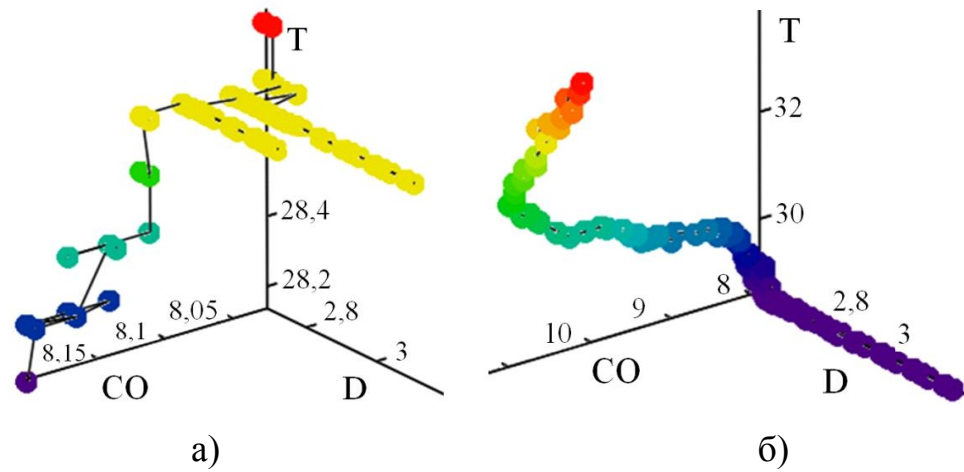


Рис. 3.2 – Динаміка небезпечних факторів стануповітряного середовища в камері для двох інтервалів аналізу: а – відсутність загоряння; б – наявність загоряння паперу в середині інтервалу

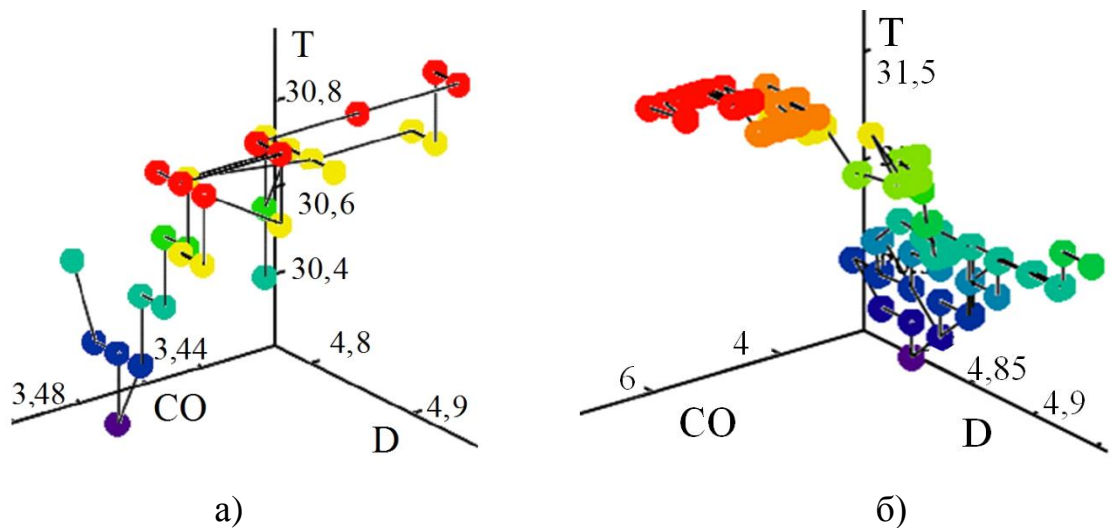


Рис. 3.3 – Динаміка небезпечних факторів стануповітряного середовища в камері для двох інтервалів аналізу: а – відсутність загоряння; б – наявність загоряння деревини в середині інтервалу

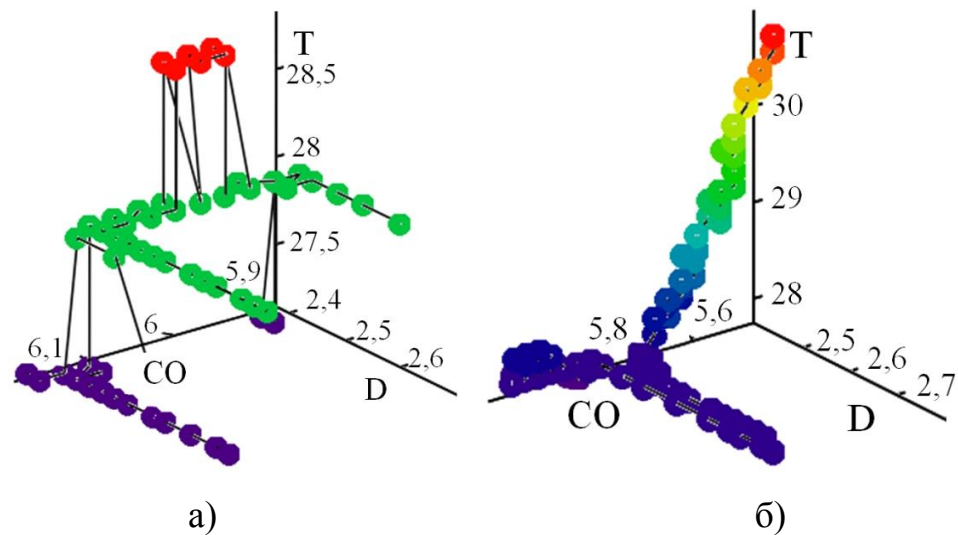


Рис. 3.4 – Динаміка небезпечних факторів стануповітряного середовища в камері для двох інтервалів аналізу: а – відсутність загоряння; б – наявність загоряння текстилю в середині інтервалу

Наведені експериментальні залежності враховують помилки вимірів небезпечних факторів повітряного середовища відповідними сенсорами, а також помилки обробки вимірів при перетворенні [395]. У розглянутому випадку помилки перетворення можна вважати малими в порівнянні з помилками сенсорів. Тому, отримані результати відображають реальну динаміку небезпечних факторів з урахуванням помилок вимірювальних сенсорів. Беручи до уваги, що застосовувані в камері сенсори входять до складу існуючих типів пожежних датчиків, оцінка кореляцій небезпечних факторів на основі результатів сенсорних вимірів буде близька до реальної.

З аналізу даних на рис. 3.1–3.4 випливає, що динаміка основних небезпечних факторів стану повітряного середовища в камері до загоряння матеріалів є локально-неоднорідною та характеризується випадковими переходами між локальними станами в розглянутому просторі небезпечних факторів. Різний характер випадкових переходів на інтервалі відсутності загорянь пояснюється неоднаковим станом повітряного середовища в камері після попередніх загорянь матеріалів та неідеальної вентиляції камери. При

цьому поява загорянь призводить до групування випадкових локальних станів повітряного середовища, що мали місце до загоряння.

Отже, загоряння матеріалу призводить до відповідної трансформації динаміки стану повітряного середовища. Це означає, що вид трансформації станів повітряного середовища в принципі може бути використаний як інформативна ознака щодо раннього виявлення загорянь у негерметичних приміщеннях. При цьому в загальному випадку по характеру трансформації динаміки станів повітряного середовища можна здійснювати також попереднє розпізнавання типу матеріалу, що загоряється в приміщенні. Пояснюється це неоднаковим характером трансформації фізичних компонентів повітряного середовища при впливі тепла, диму та чадного газу від осередку загоряння.

Варто відмітити, що в нормальних умовах (до появи загорянь) повітряне середовище в камері характеризується малими випадковими флуктуаціями розглянутих небезпечних факторів. Стан повітряного середовища при цьому залишається в цілому стійким. У випадку появи загоряння стійкий стан повітряного середовища порушується, що призводить до зміни характеру флуктуацій небезпечних факторів та динаміки станів повітряного середовища. Встановлено, що флуктуації динаміки станів повітряного середовища залежать від типу горючого матеріалу. Особливості характеру флуктуацій небезпечних факторів станів повітряного середовища при ранніх загоряннях будуть відображатися в їх автокореляціях та взаємних кореляціях.

### **3.1.2 Розробка математичної моделі міри автокореляцій і взаємних кореляцій небезпечних факторів повітряного середовища при ранніх загоряннях у приміщеннях об'єктів**

Відомо, що в загальному випадку аргументом міри автокореляцій і взаємних кореляцій є інтервал між двома значеннями одного або двох різних процесів. Міра автокореляцій і взаємних кореляцій для флуктуацій

небезпечних факторів станів повітряного середовища при ранніх загоряннях визначалася для фіксованих інтервалів спостереження. При цьому інтервали спостереження вибиралися таким, щоб флуктуації небезпечних факторів стану повітряного середовища на цих інтервалах задовольняли ергодичним властивостям.

Як математична модель міри кореляцій використовувалися коефіцієнти кореляції Пірсона щодо фіксованих інтервалів, обумовлених заданим числом  $n$  дискретних відліків, зсунутих у часі на заданому інтервалі спостереження щодо відповідних флуктуацій небезпечних факторів [395]. Модель міри інтервального коефіцієнта кореляції  $r_{xy}(n)$  для двох довільних компонентів векторів  $X$  і  $Y$  небезпечних факторів стану повітряного середовища при зрушенні на  $n$  відліків (лагів) визначалася у наступному вигляді:

$$r_{xy}(n) = \frac{\sum (x_j - \bar{x})(y_{j+n} - \bar{y}_n)}{\sqrt{\sum (x_j - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_{j+n} - \bar{y}_n)^2}}, \quad (3.1)$$

де  $\bar{x}$  – середнє значення компонента  $X$  повітряного середовища на інтервалі спостереження;  $\bar{y}_n$  – середнє значення компонента  $Y$  повітряного середовища на інтервалі спостереження, зсунутого на  $n$  відліків у часі. Варто відмітити, що інтервальна міра (3.1) є лаговою і, в порівнянні з іншими відомими коефіцієнтами, володіє найкращою інтерпретацією. При цьому слід зауважити, що така міра найкраще підходить для оцінки лінійного взаємозв'язку між двома довільними компонентами з розподілами Гауса. У випадку негаусових розподілів для одного або обох компонентів вона як і раніше буде характеризувати ступінь їхнього лінійного взаємозв'язку, але до неї вже не можна застосовувати відомі методи перевірки на значимість.

Для визначення автокореляцій для довільного компонента  $X$  у виразі (3.1) компонент  $Y$  замінюється компонентом  $X$ . При цьому відомо, що статистична вірогідність міри (коефіцієнтів кореляції) (3.1) буде зберігатися

для числа лагів, що не перевищують чверть від загального числа відліків, що визначають обраний інтервал спостереження [395].

У зв'язку з відсутністю чіткої теорії щодо значень розглянутої міри для кореляцій, доцільно дотримуватися наступних рівнів: дуже слабка міра кореляції– 0–0,2; слабка міра кореляції– 0,2–0,5; середня міра кореляції – 0,5–0,7; висока міра кореляції – 0,7–0,9; дуже висока міра кореляції – 0,9–1.

Таким чином, розроблена математична модель міри інтервальних автокореляцій і взаємних кореляцій небезпечних факторів повітряного середовища при ранніх загоряннях у приміщеннях ОКІ. Відміною ознакою даної міри є те, що вона базується на обчисленні коефіцієнта кореляції Пірсона для обмеженого інтервалу спостереження небезпечних факторів повітряного середовища. Розроблена математична модель міри дозволяє визначити чисельне значення автокореляцій і взаємних кореляцій небезпечних факторів повітряного середовища, що спостерігаються на різних інтервалах вимірювання, наприклад, включаючи інтервал відсутності загоряння, його появи та інтервалів подальшого горіння матеріалу.

### **3.1.3 Розробка математичної моделі для поточних показників фрактальності прирощень станів повітряного середовища при загорянні в приміщеннях об'єктів**

Розроблена математична модель міри автокореляцій і взаємних кореляцій небезпечних факторів повітряного середовища при ранніх загоряннях у приміщеннях ОКІ (3.1) володіє рядом обмежень і є досить грубою для попередження НС внаслідок пожеж на ОКІ. Більш ефективними з точки зору попередження НС внаслідок пожеж на ОКІ на основі виявлення ранніх загорянь у приміщеннях є міри, що засновані на припущенні фрактальності параметрів станів небезпечних факторів повітряного середовища в приміщеннях. Фрактальний аналіз дозволяє на якісно більш високому рівні та конструктивно вирішувати завдання не тільки аналізу динаміки стану небезпечних факторів повітряного середовища, але й

надійного раннього виявлення загроз, пов'язаних із загоряннями у приміщеннях ОКІ [396]. Важливими для раннього виявлення загорянь у приміщеннях ОКІ є поточні показники фрактальності щодо прирощень станів повітряного середовища у вигляді кореляційної розмірності (КР) [396] та міри рекурентності станів (РС) щодо їх прирощень [386].

В цілому КР та міра РС прирощень є оцінками складності динаміки стану повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях ОКІ. Тому ці показники можна розглядати в якості конструктивних щодо раннього виявлення загорянь та попередження НС техногенного характеру, пов'язаних з пожежами та вибухами, шляхом поточного контролю стану повітряного середовища у виробничих та інших приміщеннях ОКІ. Відомо, що у загальному випадку КР є нижньою оцінкою фрактальної розмірності Хаусдорфа для  $x$ -мерного атратора. При цьому визначення КР звичайно ґрунтується на обчисленні міри РС щодо досліджуваних складних систем.

### **3.1.3.1 Розробка поточної міри кореляційної розмірності прирощення станів повітряного середовища при загорянні в приміщеннях об'єктів**

Нехай стан повітряного середовища в довільному приміщенні ОКІ визначається вектором  $z_1(t)$  довільного розміру. Для визначеності будемо вважати, що компоненти вектора стану  $z_1(t)$  повітряного середовища в приміщенні визначаються в поточний момент часу  $t$  відповідними небезпечними факторами: оптичною щільністю диму, температурою повітряного середовища та концентрацією чадного газу [397]. Розробка міри КР вектора прирощення станів  $z(t)$  повітряного середовища включає кілька етапів.

На першому етапі безперервна траєкторія вектора стану  $z(t)$  повітряного середовища, замінюється дискретною траєкторією, яка складається з  $N$  точок  $\{z_i\}$ , вимірюваних у дискретні моменти часу в багатомірному фазовому просторі [398].



На другому етапі для кожної точки  $i$  траєкторії станів повітряного середовища визначається величина вектора прирощення  $x_i = z_{1i} - z_{1i+1}$  між поточним  $i$  та наступним  $i+1$  станами вектора.

На третьому етапі за отриманим значенням  $x_i$  обчислюється відстань  $\|x_i - x_j\|$  між відповідними парами точок дискретної траєкторії вектора прирощення станів, використовуючи евклідову, або іншу еквівалентну метрику  $\|\cdot\|$ .

На четвертому етапі визначається кореляційна функція  $C_3(r)$ , яка обчислюється для заданої кінцевої множини  $N$  точок дискретної траєкторії відповідно до виразу

$$C_3(r) = N^{-2} [\text{число пар } (i, j), \text{ для яких відстань } \|x_i - x_j\| < r]. \quad (3.2)$$

де  $r$  – задана величина припустимої відстані між парою довільних точок траєкторії.

Значення кореляційної функції (3.2) залежить від заданої величини  $r$ . Якщо при  $r \rightarrow 0$  значення кореляційної функції (3.2) визначаються степеневим законом у наступному вигляді:

$$C_3(r) = a r^{D_2}, \quad (3.3)$$

де  $a$  – константа, а  $D_2$  – КР, то вважають, що траєкторія прирощення станів  $x_i$  повітряного середовища володіє фрактальними властивостями.

Відомо, що кореляційну функцію (3.2) можна обчислити більш ефективно за методикою Грассбергера-Прокаччі [398]. Суть методики полягає в опису в розглянутому фазовому просторі сфери радіуса  $r$  (або куба) навколо кожної точки  $x_i$  та підрахунку числа точок траєкторії, які виявилися в кожній сфері, тобто

$$C_3(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, i \neq j}^N H(r - \|x_i - x_j\|). \quad (3.4)$$

У виразі (3.4) функція  $H(*)$  визначає індикаторну функцію Хевісайда, а у якості метрики  $\|x_i - x_j\|$  вибирається норма  $L_\infty$ . Переваги даної норми полягають в незалежності від мірності розглянутого фазового простору, а також у простоті її обчислення. Оскільки функція (3.4) визначається всіма  $N$  точками  $\{x_i\}$  траєкторії прирощень вектора стану, скористатися нею для визначення поточної динаміки КР не представляється можливим.

Тому на п'ятому етапі для поточної міри КР на основі функції (3.4) пропонується обчислювати її в прямокутному вікні фіксованого розміру  $N_w \ll N$ , що переміщується по траєкторії дискретно в часі щодо надходження поточних даних у момент  $t$  (тобто в реальному темпі дискретного виміру стану повітряного середовища) [399]. Віконна кореляційна функція для довільного дискретного моменту  $t$  буде визначатися виразом наступного виду:

$$C'_3(r, N_w, t) = \frac{1}{N_w^2} \sum_{i=1}^{N_w} \sum_{j=1, i \neq j}^{N_w} H(r - \|x_{i+t} - x_{j+t}\|). \quad (3.5)$$

При цьому розмір вікна  $N_w$  в (3.5) вибирається заздалегідь, виходячи із заданих вимог до якості виявлення ранніх загорянь у приміщеннях об'єкта та заданого рівня попередження НС внаслідок пожежі на ОКІ. Однак, варто враховувати, що велике значення ширини вікна призводить до кращого згладжування поточної міри КР і до більшої затримки її значення у часі. Мала ширина вікна погіршує згладжування міри КР, але має меншу часову затримку [400].

З урахуванням (3.4) величина поточної міри КР буде визначатися виразом наступного виду:

$$D_2(r, N_w, t) = \ln C_3(r, N_w, t) / \ln r, \text{ при } r \rightarrow 0. \quad (3.6)$$

Таким чином, поточна міра КР (3.6), яка обчислюється на основі (3.3) у вікні розміру  $N_w \ll N$ , що дискретно переміщується в часі  $t$  уздовж траєкторії прирощень станів повітряного середовища, є параметричною мірою поточної КР прирощень станів повітряного середовища у виробничих приміщеннях ОКІ. При цьому чутливість міри залежить від параметрів, що визначають розмір вікна та спосіб обчислення норми у виразі (3.5). У загальному випадку зазначені параметри міри (3.6) будуть впливати на величину поточної міри КР прирощень вектора станів повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях ОКІ.

### **3.1.3.2 Розробка поточної міри рекурентності прирощень станів газового середовища при загорянні в приміщеннях об'єктів**

Відмітимо, що величина  $H(r - \|x_i - x_j\|)$  у виразі (3.2) визначає відому РР  $H(r - \|x_i - x_j\|) = R^{m,r}_{i,j}$  щодо  $x_i \in \Omega^m$  у просторі  $\Omega^m$  розмірності  $m$  при всіх  $i, j = 1, 2, \dots, N$  [401]. При цьому відомо, що РР широко використовуються для чисельного визначення РС у різних типах складних нелінійних динамічних систем [402]. Чисельне визначення РС ґрунтується на відповідних мірах РС. Однак відомі міри РС, що базуються на обчисленні РР, не є оперативними й виявляються недостатньо чутливими до змін динаміки прирощень станів повітряного середовища у приміщеннях ОКІ. Це обмежує можливості застосування відомих мір РС щодо виявлення на їх основі ранніх загорянь у приміщеннях ОКІ та попередження НС внаслідок появи пожежі в них. Тому запропоновано модифіковану міру РС [403], яка обумовлена функціоналом від величини  $\tau$  для поточного дискретного відліку (або моменту часу спостереження)  $i$ , та визначається у наступному вигляді:

$$M_1(r,i) = \frac{1}{i+1} \sum_{k=0}^i R^{m,r}_{i,k}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (3.7)$$

Модифікована міра (3.7), на відміну від відомих, є поточною мірою РС щодо прирощень станів повітряного середовища у довільний дискретний момент часу  $i$  виміру для заданого розміру  $r$  околиці РС вектора  $x_i$ .

Тому модифікована міра (3.7) дозволяє відображати динаміку РС щодо прирощень станів повітряного середовища при ранніх загоряннях у приміщеннях ОКІ. Однак варто мати на увазі, що міра (3.7) при збільшенні часу  $i$  вимірювання знижує чутливість до змін прирощень станів через прояв кумулятивної властивості даної міри. Крім цього величина міри (3.7) на початку вимірювання має низьку точність. Тому міра (3.7), маючи зазначені обмеження, не може повною мірою використовуватися для надійного виявлення загорянь у приміщеннях та попередження НС внаслідок пожежі на основі поточних вимірів станів повітряного середовища в приміщеннях ОКІ. З метою усунення зазначених обмежень міри (3.7) пропонується спочатку модифікувати обчислення RP [404] відповідно до виразу:

$$TRP_{i,j}^{m,r} = \text{if}(i \neq j \prod_{j \leq i} R^{m,r}_{i,j}, 0). \quad (3.8)$$

Вираз (3.8) визначає пропоновану модифікацію обчислення RP щодо прирощень станів повітряного середовища в реальному часі їх спостереження. На підставі (3.8) пропонується поточна міра РС прирощення станів повітряного середовища при загорянні в приміщеннях ОКІ, яка визначається у вигляді:

$$M_2(i,r) = \frac{1}{i+1} \sum_{k=0}^i TRP_{i,k}^{m,r}. \quad (3.9)$$

Запропонована міра (3.9) чисельно характеризує РС прирощення небезпечних факторів повітряного середовища в приміщеннях ОКІ для кожного поточного дискретного моменту часу  $i$  з урахуванням розміру  $r$  околиці для станів  $x_i$  [405]. Дана міра залежить від розміру околиці  $r$ , яка повинна обиратися за умови забезпечення ідентичності (3.9) реальним РС прирощення небезпечних факторів повітряного середовища в приміщеннях ОКІ. Це означає, що за допомогою міри (3.9), можна виявляти динаміку РС прирощення небезпечних факторів повітряного середовища ОКІ в різні моменти часу. При цьому міра (3.9) одночасно характеризує оцінку ймовірності РС прирощення небезпечних факторів повітряного середовища приміщень ОКІ щодо поточного моменту часу. Міра (3.9) дозволяє в реальному часі спостереження відображати особливості динаміки РС щодо прирощення станів небезпечних факторів повітряного середовища, наприклад, які характерні для стійких станів або станів втрати цієї стійкості.

### **3.1.3.3 Опис математичної моделі для поточних показників фрактальності прирощень станів повітряного середовища при загорянні в приміщеннях об'єктів**

Математична модель для поточних показників фрактальності прирощень станів повітряного середовища при загорянні в приміщеннях ОКІ [406] визначається аналітичними залежностями (3.6) та (3.9).

Перша описує залежність поточної міри КР (3.6) від послідовних заданих або результатів реальних вимірювань прирощень станів повітряного середовища, функціонала норми, ширини вікна усереднення, а також розміру околиці рекурентних станів. Друга описує залежність поточної міри РС (3.9) від послідовних заданих або результатів реальних вимірювань прирощень станів повітряного середовища, функціонала норми й розміру околиці щодо РС.

Аналітичні залежності (3.8) та (3.9) дозволяють за заданими даними або послідовними результатами реальних вимірювань прирощень станів повітряного середовища в приміщеннях чисельно визначати показники

фрактальності динаміки прирощень станів повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях ОКІ.

Новий науковий результат полягає у теоретичному обґрунтуванні запропонованої математичної моделі щодо показників фрактальності динаміки прирощень станів повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях ОКІ, обумовлених поточними мірами КР та РС. Чисельні значення зазначених мір та перевищення ними відповідних порогів дозволяють виявляти ранні загоряння в приміщеннях та попереджати НС внаслідок пожежі на різних ОКІ. Розроблена модель дозволяє за заданими даними або послідовними результатами реальних вимірювань прирощень станів повітряного середовища в приміщеннях ОКІ оперативно виявляти не тільки явні, але й сховані небезпечні стани, попереджаючи появу можливих НС.

### **3.2 Розробка управляючого алгоритму інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища приміщень об'єктів критичної інфраструктури**

Відповідно до розробленої моделі, що визначає поточні показники фрактальності для прирощень станів повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях ОКІ, розроблено управляючий алгоритм інженерно-технічного методу попередження НС техногенного характеру внаслідок пожежі на ОКІ [407]. Управляючий алгоритм складається із семи послідовних блоків, що мають певну ієрархічну структуру зв'язку.

Перший блок передбачає виконання інженерно-технічного аналізу приміщень ОКІ, які є потенційними джерелами виникнення НС внаслідок пожеж і вибухів. Результати визначення приміщень на цьому рівні ієрархії є вхідними для наступного рівня ієрархії.

Другий блок визначає другий рівень ієрархії та включає визначення небезпечних факторів стану повітряного середовища для приміщень ОКІ, визначених на першому рівні, що є основними індикаторами для попередження НС техногенного характеру внаслідок пожеж та вибухів. Результати цього рівня ієрархії є вхідними для третього рівня.

Третій блок, що визначає третій рівень ієрархії, передбачає інженерно-технічне обґрунтування вибору вимірювальних сенсорів для визначених на другому ієрархічному рівні небезпечних факторів стану повітряного середовища приміщень ОКІ. При цьому обґрунтовуються доцільні місця розміщення сенсорів у виробничих приміщеннях, що відповідають засобам та методикам виконання технічних вимірів. Аналізуються точність обраних вимірювальних сенсорів і засобів вимірів, а також очікувані методичні та інструментальні похибки.

Наступний рівень ієрархії алгоритму управління реалізується в четвертому блоці та включає виконання технічних вимірів небезпечних факторів станів повітряного середовища у виробничих приміщеннях із заданою дискретністю. У даному блоці за результатами поточних вимірів небезпечних факторів станів повітряного середовища визначаються поточні прирощення станів повітряного середовища приміщень ОКІ. Дані цього блоку є вхідними для наступного рівня ієрархії алгоритму управління, який реалізується у п'ятому блоці.

П'ятий блок припускає інженерно-технічне використання запропонованої моделі визначення поточних показників фрактальності для прирощення станів повітряного середовища в приміщеннях ОКІ на основі вихідних даних четвертого блоку. На цьому рівні ієрархії визначаються поточні значення КР і міри РС відповідно до розробленої моделі.

Наступний рівень ієрархії управління реалізується в шостому блоці та передбачає інженерно-технічне обґрунтування порогів, необхідних для забезпечення заданого рівня надійності виявлення загорянь за поточним значенням КР та міри РС щодо прирощень станів повітряного середовища у

приміщеннях ОКІ. При цьому задається величина порогу, який дозволяє управляти рівнем вірогідності попередження НС техногенного характеру внаслідок пожеж у приміщеннях ОКІ.

Сьомий блок реалізує заключний рівень ієрархії управління запропонованого інженерно-технічного методу та включає прийняття рішень про моменти перевищення поточними значеннями мір КР і РС відповідних порогів та подальшу логічну обробку ухвалених рішень для підвищення вірогідності виявлення ранніх загорянь та попередження НС. При цьому величини порогів визначатимуть різні показники якості попередження НС техногенного характеру на ОКІ та відповідних управлінських рішень щодо їхньому недопущенню.

Таким чином, розроблений управляючий алгоритм інженерно-технічного методу попередження НС техногенного характеру внаслідок пожеж на основі контролю поточних показників фрактальності щодо прирощень станів повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях ОКІ. Даний управляючий алгоритм дозволяє забезпечувати надійне попередження НС техногенного характеру, як у приміщеннях ОКІ з різним технологічним устаткуванням та агрегатами, так і в приміщеннях, де розміщується обслуговуючий персонал, чергові зміни та офісні працівники.

### **3.3 Опис процедури застосування для управляючого алгоритму інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища приміщень об'єктів критичної інфраструктури**

Розроблений управляючий алгоритм інженерно-технічного методу попередження НС техногенного характеру внаслідок пожеж базується на реалізації запропонованої моделі поточних показників фрактальності щодо прирощень станів повітряного середовища у приміщеннях ОКІ та порівнянні



їх чисельних значень з порогоми для ухвалення рішення про попередження НС із заданими показниками якості [408]. Запропонований управляючий алгоритм інженерно-технічного методу попередження НС техногенного характеру передбачає виконання наступних процедур:

1) обґрунтування та визначення вхідних даних про техногенні об'єкти та небезпечні фактори повітряного середовища у приміщеннях ОКІ;

2) інженерно-технічне обґрунтування типів вимірювальних сенсорів для небезпечних факторів станів повітряного середовища в приміщеннях, а також засобів і методик їхніх вимірів;

3) технічне вимірювання небезпечних факторів станів повітряного середовища в приміщеннях ОКІ та обчислення поточних прирощень станів у реальному часі;

4) інженерно-технічна реалізація запропонованої моделі для показників фрактальності щодо прирощень станів повітряного середовища з метою визначення поточних мір КР (5) та РС (6) у відповідному фазовому просторі;

5) інженерно-технічне обґрунтування величини порогів (або наборів порогів) для поточних значень КР та РС щодо прирощень станів повітряного середовища у виробничих та операційних приміщеннях ОКІ;

6) виявлення моментів перевищення поточними значеннями КР та РС відповідних порогів з метою реалізації різного рівня надійності щодо попередження НС техногенного характеру внаслідок пожежі на ОКІ;

7) обґрунтування та вибір адекватних управлінських рішень за результатами перевищення поточними значеннями КР і РС заданих порогів з метою попередження та недопущення виникнення НС техногенного характеру внаслідок пожежі в приміщеннях ОКІ.

Структурна схема процедур, які реалізують запропонований інженерно-технічний метод попередження НС техногенного характеру внаслідок пожежі на ОКІ на основі поточних показників фрактальності щодо прирощень станів повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях ОКІ представлена на рис. 3.5.

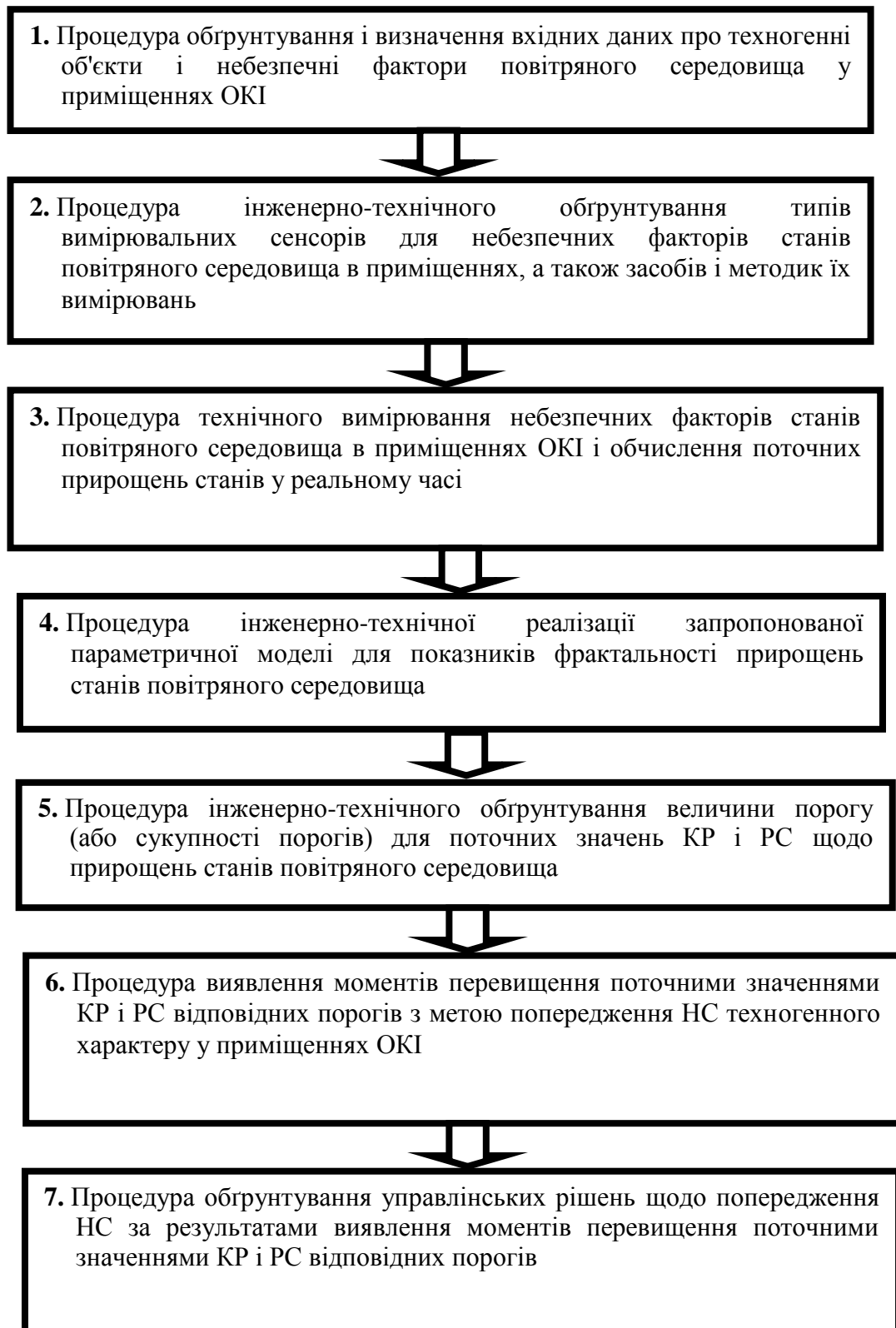


Рис. 3.5 – Структурна схема процедур, обумовлених запропонованим інженерно-технічним методом попередження НС техногенного характеру внаслідок пожежі на основі поточних показників фрактальності щодо прирощень станів повітряного середовища у приміщеннях ОКІ

Таким чином, описана процедура застосування запропонованого інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища приміщень ОКІ. Метод базується на використанні поточних показників фрактальності щодо прирощень станів повітряного середовища в приміщеннях ОКІ. Представлена процедура передбачає сім основних послідовних процедурних елементів.

### **Висновки розділу 3**

1. Для попередження НС внаслідок пожеж і вибухів на ОКІ, уперше запропоновано розглядати повітряне середовище приміщень ОКІ у вигляді нелінійної складної динамічної системи. При цьому стан такої системи в довільний фіксований момент часу визначається вектором небезпечних факторів повітряного середовища з урахуванням дії всіх дестабілізуючих впливів.

2. Розроблено математичну модель міри інтервальних автокореляцій і взаємних кореляцій небезпечних факторів повітряного середовища при ранніх загоряннях у приміщеннях ОКІ. Дана міра базується на обчисленні коефіцієнта кореляції Пірсона для обмеженого інтервалу спостереження. Математична модель дозволяє визначити чисельне значення автокореляцій і взаємних кореляцій небезпечних факторів повітряного середовища на різних інтервалах, наприклад, включаючи інтервал відсутності загоряння, його появи та подальшого горіння речовини.

3. Встановлено, що запропонована міра інтервальних автокореляцій і взаємних кореляцій небезпечних факторів повітряного середовища при ранніх загоряннях у приміщеннях ОКІ володіє рядом обмежень і є досить грубою для попередження НС внаслідок пожеж на ОКІ. Більш ефективними для попередження НС внаслідок пожеж на ОКІ шляхом

виявлення ранніх загорянь у приміщеннях є показники фрактальності прирощень станів щодо небезпечних факторів повітряного середовища в приміщеннях ОКІ.

4. Основною ознакою можливого виникнення НС внаслідок пожежі є порушення динамічної стійкості стану небезпечних факторів повітряного середовища при ранніх загоряннях у приміщеннях ОКІ. Мова йде про зміну характеру прирощень станів повітряного середовища при появі загорянь. Встановлено, що прирощення станів повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях ОКІ володіють фрактальними властивостями.

5. Показано, що загоряння матеріалу приводить до відповідної трансформації динаміки прирощень станів повітряного середовища. При цьому характер трансформації прирощень станів повітряного середовища може бути використаний як інформативна ознака для раннього виявлення загорянь у негерметичних приміщеннях ОКІ. По характеру динаміки прирощень станів повітряного середовища можна здійснювати також попереднє розпізнавання типу матеріалу, що загоряється в приміщенні ОКІ.

6. Розроблена математична модель для поточних показників фрактальності щодо прирощень станів повітряного середовища при загорянні в приміщеннях ОКІ визначається двома аналітичними залежностями. Перша описує залежність поточної міри КР від заданих даних або результатів реальних вимірів щодо прирощень станів повітряного середовища, функціонала норми, ширини вікна усереднення, а також розміру околиці РС. Друга описує залежність поточної міри РС від заданих даних або результатів реальних вимірів щодо прирощень станів повітряного середовища, функціонала норми та розміру околиці РС.

Новий науковий результат полягає в теоретичному обґрунтуванні запропонованої математичної моделі показників фрактальності динаміки щодо прирощень станів повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях ОКІ, що визначаються поточними мірами їх КР та РС. Чисельні

значення зазначених мір та перевищення ними відповідних порогів дозволяють виявляти ранні загоряння в різних приміщеннях та попереджати НС внаслідок пожежі на ОКІ.

7. Управляючий алгоритм інженерно-технічного методу попередження НС внаслідок пожежі на ОКІ реалізує математичну модель для показників фрактальності динаміки прирощень станів повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях ОКІ, які визначаються поточними мірами КР та РС. Алгоритм складається із сьома послідовних блоків, що мають ієрархічну структуру прямих логічних зв'язків. Управляючий алгоритм дозволяє здійснювати надійне попередження НС техногенного характеру, як у приміщеннях ОКІ з різним технологічним устаткуванням та агрегатами, так і в приміщеннях, де розміщується обслуговуючий персонал, чергові зміни або офісні працівники.

8. Інженерно-технічний метод попередження НС техногенного характеру внаслідок пожеж призначений для раннього виявлення загорянь (вибухів) за поточними показниками фрактальності щодо прирощень станів повітряного середовища у приміщеннях ОКІ. Застосування методу передбачає виконання сьома процедур, пов'язаних з обґрунтуванням і визначенням вхідних даних про ОКІ та небезпечних факторів повітряного середовища у приміщеннях ОКІ. Інженерно-технічним обґрунтуванням типів вимірювальних сенсорів, а також засобів і методик вимірів стану повітряного середовища в приміщеннях. Технічними вимірами небезпечних факторів станів повітряного середовища в приміщеннях ОКІ та обчислення поточних прирощень станів у реальному часі. Інженерно-технічним використанням запропонованої параметричної моделі для показників фрактальності щодо прирощень станів повітряного середовища. Інженерно-технічним обґрунтуванням величини порогів (або наборів порогів) для поточних значень КР та РС. Виявлення моментів перевищення поточними значеннями КР та РС відповідних порогів з метою реалізації різного рівня надійності попередження НС внаслідок

пожежі на ОКІ. Обґрунтуванням і вибором управлінських рішень щодо попередження або недопущення виникнення НС техногенного характеру внаслідок пожежі в приміщеннях ОКІ.

## РОЗДІЛ 4

### **РОЗРОБКА ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНОГО МЕТОДУ ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ ОБУМОВЛЕНИХ НАЯВНІСТЮ В АТМОСФЕРНОМУ ПОВІТРІ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН НА ТЕРИТОРІЇ (ПОБЛИЗУ) ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ**

Вирішення четвертого наукового завдання включає: розробку математичної моделі чисельних мір динаміки рекурентних станів забрудненої атмосфери на основі рекурентних діаграм і функції невизначеності та ризику здоров'ю людей, розробку управляючого алгоритму інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок наявності в атмосферному повітрі шкідливих речовин, понад ГДК та опис процедур для його реалізації. Крім того розроблено комунікативні моделі бездротового середовища, яке використовується для дистанційного контролю динаміки станів забрудненої атмосфери з використанням різних платформ.

#### **4.1 Розробка математичної моделі чисельних мір аналізу рекурентних діаграм динаміки станів забрудненого атмосферного повітря та ризику здоров'ю людей**

Розробку математичної моделі чисельних мір аналізу рекурентних діаграм динаміки станів забрудненого атмосферного повітря та ризику здоров'ю людей будемо здійснювати в такий спосіб. По-перше, розглянемо загальне вирішення завдання визначення рекурентних діаграм динаміки станів забрудненої атмосфери за поточними вимірами концентрації

атмосферних забруднюючих речовин. По-друге, розробимо чисельні міри рекурентних станів забрудненої атмосфери на основі рекурентних діаграм і функції невизначеності станів. По-третє, розглянемо вирішення завдання оцінки ризику здоров'ю людей, спричиненого забрудненою атмосферою, а також існуючі критерії оцінки для ризику. Після чого дамо опис розробленої математичної моделі.

#### **4.1.1 Загальне вирішення завдання визначення рекурентних діаграм динаміки станів забрудненого атмосферного повітря за поточними вимірами концентрації атмосферних забруднень**

Основними джерелами забруднення атмосферного повітря є: промисловість (виробництво енергії, чорна та кольорова металургія, хімічна й нафтохімічна промисловість), підприємства з виробництва будівельних матеріалів, гірничодобувна промисловість і транспорт. Залежно від джерела та механізму утворення розрізняють первинні та вторинні забруднювачі атмосферного повітря. Первинні являють собою шкідливі хімічні речовини, що попадають безпосередньо в атмосферне повітря від стаціонарних або рухомих джерел. Вторинні утворюються в результаті взаємодії в атмосфері первинних забруднювачів між собою та присутніми в повітрі речовинами (кисень, озон, аміак, вода) з урахуванням дії ультрафіолетового випромінювання.

Для попередження НС внаслідок наявності в атмосферному повітрі шкідливих речовин, що перевищують граничнодопустимі концентрації (ГДК) та зниження ризику впливу забруднень на здоров'я людини та навколишнє середовище в умовах антропогенного впливу необхідний ретельний і діючий контроль забруднення атмосферного повітря ОКІ [409].

З позиції теорії систем забруднена атмосфера являє собою складну динамічну систему, стан якої залежить від безлічі факторів, які важко врахувати апіорі. Насамперед, це особливості джерел емісії атмосферних забруднювачів (тип джерела, природа та властивості забруднюючих повітря



речовин, обсяг викидів), а також різноманіття метеорологічних і топографічних факторів (напрямок і швидкість вітру, температурні інверсії, атмосферний тиск, вологість повітря, рельєф місцевості та відстань до джерела забруднення). При цьому атмосферне повітря здатне не тільки розсіювати викиди шкідливих речовин, але й накопичувати їх, підвищуючи локальну концентрацію забруднень у просторі та часі над певними територіями, у тому числі, і понад ГДК, навіть у випадку штатної роботи ОКІ.

Атмосферні забруднення можуть бути джерелами виникнення НС як миттєвої, при концентраціях забруднень понад або рівних приблизно 30–50 ГДК, так і віддаленої дії у випадку менших значень перевищень, але діючих більш довгостроково. При цьому феномен віддаленої дії НС пояснюється механізмами адаптації людського організму, живих істот і навколишнього природного середовища до малих перевищень концентраціями шкідливих речовин атмосферних забруднень їх ГДК.

У цей час моніторинг забруднення атмосферного повітря здійснюється переважно на стаціонарних постах шляхом програмного відбору проб повітря для подальшого виміру концентрації шкідливих речовин з одночасним виміром метеорологічних параметрів стану атмосфери в пункті розміщення поста. Відзначається, що перспективним напрямком розвитку моніторингу атмосферних забруднень є перехід від ручного до автоматичного та дистанційного безперервного виміру концентрації шкідливих речовин і метеорологічних параметрів атмосферного повітря [409].

Однак, з позиції теорії систем, існуючий і навіть перспективний підходи до моніторингу забруднень атмосферного повітря залишаються в рамках реалізації старої концепції, відповідно до якої забруднена атмосфера представляється у вигляді двох взаємодіючих систем (система забруднення та система їхнього розсіювання). Тому, в існуючих та перспективних системах моніторингу забруднення атмосферного повітря продовжують

залишатися в якості базових виміри концентрації шкідливих речовин і метеорологічних параметрів атмосферного повітря.

У даному дослідженні пропонується новий системний підхід, заснований на представленні забрудненої атмосфери у вигляді єдиної складної динамічної системи [410, 411], стан якої визначається як викидами шкідливих речовин, так і метеорологічними та іншими параметрами, наприклад, характером конкретної забудови, якщо мова йде про місто.

Процеси забруднення атмосферного повітря небезпечними викидами техногенного характеру й їхнього розсіювання в силу об'єктивної складності не можуть бути адекватно описані та змодельовані на основі традиційних підходів і відомих моделей. Однак їх можна вивчати та моделювати на основі вимірів поточних станів забрудненої атмосфери, як єдиної системи. Для такої системи характерні дисипативна структура та нелінійна динаміка її станів з елементами самоорганізації та хаосу. Вивчення таких систем на основі традиційних методів, що базуються на лінійності взаємодії елементів, не допустиме [412].

При цьому для попередження можливих НС внаслідок забруднення атмосферного повітря шкідливими речовинами першорядного значення набуває інформація про складну динаміку станів забрудненої атмосфери [403]. Тому останнім часом методи нелінійної динаміки складних систем стають активною областю досліджень у багатьох дисциплінах [398]. Відомі, наприклад, методи кореляційної розмірності, Ляпунова, ентропії та ін. Однак, зазначені методи ґрунтуються на досить довгих реалізаціях спостережень. Із цієї причини застосування таких методів для обмежених за часом спостережень, часто приводить до некоректних результатів [413]. У цьому випадку для попередження НС доцільно використовувати нелінійні підходи, які не залежать від імовірнісних розподілів спостережуваних даних, застосовні для коротких за часом спостереженнях із урахуванням різних шумів, перехідних процесів і артефактів. На теперішній час лише рекурентний аналіз складних динамічних систем, відповідає відзначеним

вище вимогам [414–417]. Рекурентні діаграми (RP) дозволяють судити про характер процесів, що протікають у системах, наявності та впливі шуму, дрейфу, наявності станів повторення та завмирання (ламінарні стани), здійсненні екстремальних подій, наявності прихованої періодичності та циклічності.

На стаціонарних постах контролю атмосферних забруднень відбір проб (виміру) здійснюється за встановленими програмами у дискретні моменти часу (звичайно 4 рази в добу за винятком вихідних і святкових днів). Програми відбору проб регламентуються нормативними документами. У загальному випадку виміри за результатами відбору проб для конкретного поста в довільний дискретний момент часу  $i$  будуть визначатися  $m$ -мірним вектором. Складові вектора являють собою результати вимірів поточних концентрацій  $m$  забруднювачів атмосфери

$$z_i = d_i + \Delta_i, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N_s - 1, \quad (4.1)$$

де  $d_i$  – вектор істинних, але не відомих, поточних концентрацій  $m$  забруднювачів атмосфери;  $\Delta_i$  – вектор невідомих поточних помилок виміру та збурень для відповідних  $m$  забруднювачів;  $N_s$  – максимальна кількість вимірів протягом заданого інтервалу контролю, який звичайно є кінцевим.

Відповідно до [418], RP для забрудненої атмосфери будуть визначатися співвідношенням виду [419]:

$$R^{m, \varepsilon}_{i,j} = \Theta(\varepsilon - \|z_i - z_j\|), \quad z_i \in \Omega^m, \quad i, j = 0, 1, 2, \dots, N_s - 1, \quad (4.2)$$

де  $\Theta(*)$  – функція Хевісайда;  $\varepsilon$  – заданий розмір околиці рекурентності для стану  $Z_i$  в момент часу  $i$ ;  $\|*\|$  – позначає операцію визначення заданої норми.

Для кінцевого значення  $N_s$  застосування RP (4.2) дозволяє відобразити складні траєкторії вектора (4.1) в  $m$ -мірному фазовому просторі на

двовимірну бінарну матрицю розміром  $N_s \times N_s$ . При цьому одиничні елементи цієї матриці при деяких дискретних моментах  $i$  та  $j$  будуть відображати так звані рекурентні стану (РС) у динаміці вектора станів концентрації  $m$  забруднювачів атмосфери. Координатні осі подання RP у цьому випадку будуть визначати дискретні моменти часу виміру концентрацій забруднювачів.

Для попередження НС внаслідок атмосферних забруднень замість RP (4.2) потрібно обчислювати  $R^{m,\varepsilon}_{i,j}$  тільки на основі поточних вимірів у момент  $i$  та моменту часу, який йому передуює (тобто в реальному темпі вимірів). Це означає, що величина  $N_s$  в (4.2) не фіксується, а послідовно приймає значення 0,1, 2, 3... і т.д. У цьому випадку RP (4.2) будуть відображатися матрицею трикутної форми наступного виду:

$$RM^{m,\varepsilon}_{i,j} = \Theta(\varepsilon - \|z_i - z_j\|), \text{ при } \bar{z}_i \in \Omega^m, i \neq j, i \geq j, i, j = 0,1,2,\dots \quad (4.3)$$

Відмітимо, що всі відомі на сьогодні в літературі різновиди методів обчислення RP ( $R^{m}_{i,j}$ ), у тому числі й (4.2), для довільного  $m$ -мірного вектора  $z_i$  станів (4.1) забрудненої атмосфери, вимірюваного в дискретні моменти часу  $i$ , можливо узагальнити у вигляді:

$$R^{m,\varepsilon}_{i,j} = F(\|z_i - z_j\|, \varepsilon), z_i \in \Omega^m, z_j \in \Omega^m, i, j = 0,1,2,\dots, N_s - 1, \quad (4.4)$$

де  $F(*)$  – задана характеристична функція своїх аргументів;  $\varepsilon$  – деякий поріг, що визначає припустиму околицю рекурентності для вектора  $z_i$ ;  $\|*\|$  – функціонал, що визначає норму в просторі  $\Omega^m$ , який породжує метрику  $\|z_i - z_j\|$ ;  $N_s$  – максимальне число вимірюваних значень вектора  $z_i$  станів системи. При цьому характеристична функція в (1) задається у вигляді

$$F(\|\cdot\|, \varepsilon) = \begin{cases} 1 & \text{якщо } \|\cdot\| < \varepsilon \\ 0 & \text{якщо } \|\cdot\| \geq \varepsilon \end{cases}. \quad (4.5)$$

Неоднозначність функціонала норми, який породжує метрику, і порога в (4.1) обумовлюють суть існуючої метрико-граничної невизначеності відомих методів RP. Це означає, що в умовах зазначеної метрико-граничної невизначеності траєкторії вектора  $z_i$  станів досліджуваної системи в  $m$ -мірному нормованому просторі будуть відображатися на відповідну двовимірну матрицю для довільних функціоналів норм, що породжують метрики в просторі  $\Omega^m$ , і величинах  $\varepsilon$  порога. При цьому кожний елемент матриці, який дорівнює одиниці, для різних моментів часу  $i$  та  $j$ , буде характеризувати рекурентність (повторюваність) вектора станів досліджуваної системи в умовах зазначеної метрико-граничної невизначеності. Координатні осі графічного подання RP при цьому будуть тимчасовими осями, що відповідають дискретним моментам часу виміру вектора станів. Наявність метрико-граничної невизначеності буде породжувати відповідну невизначеність відображення RP.

Для подолання зазначеної метрико-граничної невизначеності при обчисленні RP, вони звичайно задаються конкретним видом функціонала норми, що однозначно індукує метрику у розглянутому просторі. Нехай задані два вектори станів  $X^T = (x_1, x_2, \dots, x_m)$  і  $Y^T = (y_1, y_2, \dots, y_m)$  в  $m$ -мірному лінійному нормованому просторі. Тоді для найбільш поширених при обчисленні RP функціоналів норми в (4.4), індуковані метрики можна, виходячи з [401], представити у вигляді:

$$\|X - Y\|_1 = \sum_{i=1}^m |x_i - y_i|, \quad (4.6)$$

$$\|X - Y\|_2 = \left[ \sum_{i=1}^m |x_i - y_i|^2 \right]^{1/2}, \quad (4.7)$$

$$\|X - Y\|_3 = \max\{|x_i - y_i|; i = 1, 2, \dots, m\}. \quad (4.8)$$

Для октаедричної, сферичної та кубічної норми, індуковані метрики (4.6)–(4.8), прийнято називати відповідно рівномірною, евклідовою та максимальною. З (4.6)–(4.8) витікає, що зазначені метрики для тих самих векторів станів будуть різними по величині. При цьому тільки евклідова метрика (4.7) для векторів лінійного нормованого простору буде визначати відстань у загальноприйнятому геометричному змісті. Інші метрики (4.6) і (4.8) мають інший геометричний зміст.

Основні переваги та обмеження зазначених норм і метрик при обчисленні RP викладені в [420]. Тому, вибором конкретного виду функціонала норми та породжуваної метрики (4.6)–(4.8) вдається перебороти тільки частину розглянутої метрико-граничної невизначеності, пов'язаної тільки з метрикою. Інша частина метрико-граничної невизначеності, обумовлена порогом, потребує подолання.

Для подолання цієї частини невизначеності відомі різні евристичні підходи та способи вибору величини порога, які носять приватний і евристичний характер [421, 422].

Таким чином, для існуючих функціоналів норм і породжуваних метрик (4.6)–(4.8) перебороти граничну невизначеність обчислення RP у загальному випадку не представляється можливим. Пояснюється це тим, що відомі підходи подолання розглянутої метрико-граничної невизначеності базуються на традиційній парадигмі незалежності метричної та граничної невизначеності [403].

Для розробки методів обчислення RP, інваріантних або частково інваріантних щодо розглянутої метрико-граничної невизначеності потрібна зміна традиційної парадигми.

Нова парадигма, що розвивається в роботі, складається в поданні метрико-граничної невизначеності в цілому у вигляді залежної метричної та граничної складових. Відповідно до цієї парадигми, подолання існуючої метрико-граничної невизначеності відомих методів обчислення RP (4.4)

шляхом вибору функціоналів норм, індукованих метрик, і порогів необхідно здійснювати з єдиної позиції.

У рамках реалізації запропонованої парадигми, доцільно перейти від розгляду традиційних для методів обчислення RP функціоналів норм і породжуваних метрик до просторів деякої вдосконаленої структури [403, 412]. Таке вдосконалення пропонується здійснити за рахунок введення додаткової геометричної характеристики у вигляді скалярного добутку двох векторів. Скалярний добуток є відображенням упорядкованих пар векторів лінійного простору на дійсну вісь [423]. Якщо позначити це відображення через  $(z_i, z_j)$ , то скалярний добуток  $z_i^T z_j = (z_i, z_j)$  двох довільних векторів станів системи можна інтерпретувати як деякий кут  $\theta$  між відповідними векторами

$$\cos \theta = \frac{(z_i, z_j)}{\sqrt{(z_i, z_i)} \sqrt{(z_j, z_j)}}. \quad (4.9)$$

Важливою властивістю скалярного добутку є

$$(z_i, z_i)^{0,5} = \|z_i\| = (z_i, z_i)^{0,5}. \quad (4.10)$$

Співвідношення (4.10) свідчить про те, що в запропонованому вдосконаленому просторі скалярний добуток породжує норму. Ця норма у свою чергу індукує відповідну метрику, обумовлену співвідношенням виду

$$\|z_i - z_j\| = \sqrt{(z_i - z_j)^T (z_i - z_j)}. \quad (4.11)$$

Зі співвідношення (4.11) видно, що дана метрика в запропонованому вдосконаленому просторі визначає звичайну відстань між двома довільними векторами  $z_i$  і  $z_j$  досліджуваної системи. Для зручності введемо позначення для векторів станів  $z_i$  і  $z_j$  і їхньої різниці:  $z_i = A$ ,  $z_j = U$  і  $z_i - z_j = C$  відповідно. Тоді,

слідуючи теоремі косинусів, в удосконаленому просторі (4.11) справедливе подання

$$C^T C = A^T A + B^T B - 2\sqrt{A^T A} \sqrt{B^T B} \cos \theta. \quad (4.12)$$

Оскільки поріг  $\varepsilon$  у виразах (4.4) і (4.5) задає граничне значення метрики (4.11) для відповідних векторів, то з урахуванням уведених позначень для порога буде справедливе аналогічне (4.12) подання

$$\varepsilon^T \varepsilon = A^T A + B^T B - 2\sqrt{A^T A} \sqrt{B^T B} \cos(\theta_\varepsilon \pi / 180), \quad (4.13)$$

де  $\theta_\varepsilon$  – максимальний кут (у градусах) між векторами, при якому вектори станів ще вважаються рекурентними в змісті обраної величини порога  $\varepsilon$ . У цьому випадку характеристична функція (4.5) в удосконаленому просторі може бути представлена у вигляді

$$F(\|\cdot\|, \varepsilon) = \begin{cases} 1 & \text{если } \|\cdot\| < \varepsilon \\ 0 & \text{если } \|\cdot\| \geq \varepsilon \end{cases} \rightarrow F(A, B, \theta_\varepsilon) = \begin{cases} 1 & \text{если } A^T B > \sqrt{A^T A} \sqrt{B^T B} \cos(\theta_\varepsilon \pi / 180) \\ 0 & \text{если } A^T B \leq \sqrt{A^T A} \sqrt{B^T B} \cos(\theta_\varepsilon \pi / 180) \end{cases}. \quad (4.14)$$

Переходячи від позначень в (4.14) до відповідних векторів станів досліджуваної системи характеристична функція (4.5) прийме наступний вид

$$F(z_i, z_j, \theta_\varepsilon) = \begin{cases} 1 & \text{если } z_i^T z_j > \sqrt{z_i^T z_i} \sqrt{z_j^T z_j} \cos(\theta_\varepsilon \pi / 180) \\ 0 & \text{если } z_i^T z_j \leq \sqrt{z_i^T z_i} \sqrt{z_j^T z_j} \cos(\theta_\varepsilon \pi / 180) \end{cases}. \quad (4.15)$$

З урахуванням (4.15) запропонований на основі (4.4) самонастроювальний за вимірами вектора стану системи метод обчислення RP в удосконаленому просторі буде визначатися співвідношенням



$$\mathbf{R}^{m,\theta_\varepsilon}_{i,j} = F(\mathbf{z}_i, \mathbf{z}_j, \theta_\varepsilon), \mathbf{z}_i \in \Omega^m, \mathbf{z}_j \in \Omega^m, i, j = 0, 1, 2, \dots, N_S - 1. \quad (4.16)$$

Запропонований самонастроювальний метод (4.16) отриманий на основі нової парадигми спільного подолання складових метрико-граничної невизначеності, характерної для існуючих методів обчислення RP (4.4). При цьому вдосконалення простору на основі введення скалярного добутку векторів, розглянуте в [403], дозволило здійснити спільний вибір функціонала норми, індукованої відповідної метрики, і порога рекурентності.

На відміну від відомих методів у запропонованому методі обчислення RP норма та поріг виявляються самонастроювальними за самими вимірами вектора станів. При цьому самонастроювання порога здійснюється до змінної довжини вимірюваних векторів станів системи, а граничне значення  $\theta_\varepsilon$  кута між векторами встановлюється таким, при якому вектори станів системи в заданому змісті вважаються рекурентними.

В загальному випадку величина  $\theta_\varepsilon$  порогу кута буде визначати рекурентні стани для ненульових векторів станів. Якщо вектори станів виявляються нульовими, то поріг  $\sqrt{\mathbf{z}_i^T \mathbf{z}_i} \sqrt{\mathbf{z}_j^T \mathbf{z}_j} \cos(\theta_\varepsilon \pi / 180)$  буде також дорівнює нулю для будь-якої величини  $\theta_\varepsilon$ . У цьому випадку самонастроювальний метод обчислення RP (4.16) дає нульове значення – відсутність рекурентності станів системи. Наприклад, на відміну від цього, існуючі методи обчислення RP (4.4) при фіксованому порозі в цій ситуації будуть відображати одиничне значення, що відповідає помилковій рекурентності станів. Тому самонастроювальний метод обчислення RP (4.16) є інваріантним до довжини вимірюваних векторів станів системи.

Варто зазначити, що скалярний добуток векторів у розглянутому просторі породжує новий тип конічної околиці рекурентності замість традиційної сферичної околиці, породжуваною евклідовою метрикою. При використанні конічної околиці рекурентності станів концепція класичної рекурентності втрачає своє первісне значення. У цьому випадку

запропонований самонастроювальний метод обчислення RP в удосконаленому просторі буде відображати фактичну динаміку узагальненої рекурентності (конічної рекурентності).

Із урахуванням виразів (4.16) і (4.6) самонастроювальний метод обчислення RP у реальному часі спостереження буде визначатися у вигляді:

$$RM^{m,\theta_\varepsilon}_{i,j} = F(z_i, z_j, \theta_\varepsilon), \text{ при } z_i \in \Omega^m, i \neq j, i \geq j, i, j = 0, 1, 2, \dots \quad (4.17)$$

У цьому випадку RP (4.17) будуть відображатися матрицею трикутної форми, що дозволяє на основі аналізу реальної поточної динаміки вектора станів забрудненої атмосфери виявляти небезпечні стани з урахуванням дії всіх реальних факторів для попередження НС внаслідок наявності шкідливих речовин в атмосферному повітрі.

Таким чином, представлено загальне вирішення завдання визначення RP (4.5) і (4.16) для аналізу динаміки станів забрудненої атмосфери за поточними вимірами (4.4) концентрації атмосферних забруднень. На підставі загальних рішень (4.5) і (4.16) отримані рішення (4.6) і (4.17) для обчислення RP у реальному темпі виміру концентрацій атмосферних забруднень. При цьому метод (4.17) є самонастроювальним за вимірами концентрацій атмосферних забруднень і, що дозволяють аналізувати динаміку станів забрудненої атмосфери в реальному темпі вимірів.

Розроблені методи обчислення RP (4.16) і (4.17) дозволяють перебороти існуючу метрико-граничну невизначеність, властиву відомим методам. Це забезпечує інваріантність методів до характеру вимірюваних даних і дозволяє відображати рекурентні стани на діаграмах, адекватні реальній забрудненій атмосфері.

Новий науковий результат полягає в теоретичному обґрунтуванні методу обчислення RP у метричному просторі вдосконаленої топології, здатного на основі самонастроювання обчислень за вимірами перебороти

властиву, відомим на цей час методам, метрико-граничну невизначеність. Удосконалення топології простору здійснюється шляхом додаткового введення в нього операції скалярного добутку векторів. Встановлено, що запропонований метод, має можливість відображення RP, які адекватні реальним системам. Даний метод має порівняно невисоку обчислювальну складність і має інваріантність стосовно типу та регулярності вимірів, характерних для існуючих програм відбору проб на стаціонарних постах контролю атмосферних забруднень.

#### **4.1.2 Розробка чисельних мір рекурентних станів забрудненого атмосферного повітря на основі рекурентних діаграм**

Важливим з погляду попередження НС техногенного характеру, обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) ОКІ, властивістю RP станів забрудненої атмосфери є здатність відображати в динаміці вектор концентрацій забруднювачів РС. РС забрудненої атмосфери означають їх повторюваність, що характерна для ламінарних станів забрудненої атмосфери. При зазначених станах атмосфера практично не здатна розсіювати викиди забруднень. Це приводить до нагромадження забруднень і збільшенню їхньої локальної концентрації в атмосферному повітрі. Викиди забруднюючих речовин, які здійснюються в періоди РС, можуть приводити до істотного підвищення концентрації забруднювачів понад ГДК, а в ряді випадків навіть викликати НС при наявності нормативних перевищень концентраціями шкідливих речовин в атмосферному повітрі ГДК. Тому, виявляючи такі РС забрудненої атмосфери, можна не допускати перевищення концентраціями шкідливих речовин в атмосферному повітрі ГДК і тим самим попереджати виникнення НС техногенного характеру на ОКІ. У цьому випадку особлива увага приділяється вивченню динаміки стану складних систем різної сфери на основі чисельних мір РС [424]. При поєднанні методів RP і кількісного

аналізу РС можливо виявляти особливості динаміки станів складних систем, які не можуть бути виявлені на основі використання класичних методів [425].

Тому небезпечні стани забрудненої атмосфери, розглянутої як складної динамічної системи, можуть бути виявлені на основі чисельних мір РС. Однак відомі міри РС залишаються досить складними та не повною мірою забезпечують попередження розглянутих НС. Пояснюється це неможливістю використання відомих методів РР і відповідних мір РС у реальному темпі вимірів. Тому важливим є розробка чисельних мір поточної РС забрудненої викидами шкідливих речовин атмосфери на території (поблизу) ОКІ.

Чисельні міри поточної РС забрудненої атмосфери базуються на запропонованих модифікованих чисельних мірах РС, обумовлених для відповідних РР, що обчислюються на основі вимірів (емпіричних даних) поточних концентрацій шкідливих речовин з урахуванням програмного відбору проб повітря на стаціонарних постах. Найбільш відомою і розповсюдженою є міра РС, описана на основі (4.2) величиною [424]:

$$R_0(\varepsilon) = \frac{1}{N_s^2} \sum_{i \neq j}^{N_s-1} R^{m,\varepsilon}_{i,j}. \quad (4.18)$$

При цьому міра (4.18) та інші відомі міри не є оперативними (поточними), а також виявляються недостатньо чутливими до виявлення особливостей динаміки станів атмосферних забруднень. Це обмежує їхнє використання для попередження розглянутого типу НС на основі контролю РС концентрацій атмосферних забруднень. Чисельна міра (4.18) характеризує середнє значення РС в РР (4.2), без урахування лінії ідентичності  $i=j$ . При  $N_s \rightarrow \infty$  чисельна міра (4.18) прагне до ймовірності РС для досліджуваної динамічної системи.

Основним обмеженням чисельної міри (4.18) є те, що вона оцінює ймовірність РС для всієї вибірки вимірів довжини  $N_s$  у цілому. Це означає, що міра (4.18) не дозволяє оцінювати РС для реального моменту часу та не є

поточною. У зв'язку із цим її неможливо використовувати для тимчасової локалізації РС забрудненої атмосфери. Тому в роботі [426] вперше запропоновано замість міри (4.18) використовувати модифіковану чисельну міру РС, обумовлену з урахуванням (4.3) функціоналом, який залежить від величини розміру області рекурентності  $\varepsilon$  та поточного моменту часу  $i$ , у вигляді:

$$M_1(\varepsilon, i) = \frac{1}{i+1} \sum_{k=0}^i RM^{m,\varepsilon}_{i,k}, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (4.19)$$

Модифікація міри (4.19), на відміну від міри (4.18), дозволяє аналізувати щільність РС забрудненої атмосфери для поточного моменту часу  $i$  з урахуванням заданого розміру околиці  $\varepsilon$ . Тому чисельна міра (4.19) може використовуватися для аналізу динаміки РС вектора концентрацій для довільного числа забруднювачів атмосфери (4.1) у реальному часі. При цьому варто відмітити, що міра (4.19) зі збільшенням часу  $i$  спостереження знижує чутливість до змін у динаміку РС забрудненої атмосфери через прояв кумулятивних властивостей даної чисельної міри. Крім цього модифікована чисельна міра (4.19) на початковому етапі спостережень має недостатню точність оцінювання РС. Тому міра (4.19) в цілому має обмежені можливості при аналізі особливостей динаміки РС забрудненої атмосфери та тимчасової локалізації її РС. З метою усунення зазначених обмежень пропонується замість модифікованої чисельної міри (4.19) використати віконну чисельну міру із вікном заданого розміру  $a$ , яке рухається уздовж осі часу спостереження.

Для довільного моменту  $i$  часу спостереження зазначена віконна чисельна міра РС буде визначатися співвідношенням виду

$$M_2(i, a, \varepsilon) = \text{if} \left( i < a, \frac{1}{i+1} \sum_{k=0}^i R^{m,\varepsilon}_{i,k}, \frac{1}{a} \sum_{k=0}^{a-1} R^{m,\varepsilon}_{i,i-k} \right). \quad (4.20)$$

Запропонована міра (4.20) дозволяє аналізувати динаміку щільності РС забрудненої атмосфери для вектора концентрацій (4.1) довільного числа забруднювачів в атмосферному повітрі в поточний момент часу і при заданому розмірі околиці  $\epsilon$  та заданому розмірі  $a$  вікна, що рухається.

Відповідно до (4.9), дана чисельна міра є параметричним функціоналом, що залежить від поточного часу та двох параметрів  $\epsilon$  і  $a$ , величина яких задається виходячи з необхідних показників якості оцінювання РС забрудненої атмосфери для найкращого виявлення РС. На відміну від модифікованої міри (4.8), запропонована міра (4.9) дозволяє виявляти особливості динаміки РС забрудненої атмосфери для вектора концентрацій довільного числа забруднювачів (4.1) в атмосферному повітрі контрольованої зони в реальному часі. Чисельна міра (4.9) є усередненою чисельною мірою (4.2) у вікні розміру  $a$  для заданої величини околиці  $\epsilon$  рекурентності.

Це означає, що за допомогою міри (4.9) можливо аналізувати динаміку РС забрудненої атмосфери в реальному часі та на її основі виявляти небезпечні стани, пов'язані з накопиченням шкідливих речовин в атмосферному повітрі. При цьому знання метеорологічних параметрів для забрудненої атмосфери у випадку розглянутих чисельних мір РС не потрібно. Тому чисельна міра (4.9) може бути покладена в основу загальної емпіричної моделі РС забрудненої атмосфери, що дозволяє оперативно виявляти небезпечні стани, пов'язані з накопиченням забруднень в атмосферному повітрі. При цьому динаміка щільності РС забрудненої атмосфери на основі такої моделі буде чисельно характеризувати ступінь повторюваності вектора концентрацій забруднювачів для поточного моменту часу в заданій зоні контролю.

У зв'язку із цим чисельна міра РС (4.9) дозволяє локалізувати в часі динамічні стани забрудненої атмосфери, пов'язані з небезпечними станами, які характеризуються, наприклад, ламінарними станами при яких відсутня

турбулентність і розсіювання забруднень. Ламінарні стани динаміки означають, що концентрації забруднювачів атмосферного повітря в контрольованій зоні в такі моменти часу не змінюються або змінюються незначно. Дана чисельна міра також дозволяє виявляти переходи від хаотичних станів вектора концентрацій забруднень в атмосферному повітрі до випадкових станів і навпаки. При цьому варто зазначити, що перехід від випадкових до хаотичних станів супроводжується збільшенням концентрацій забруднювачів в атмосферному повітрі. Зворотний перехід від хаотичних до випадкових станів свідчить про втрату динамічної стійкості станів забрудненої атмосфери. При цьому варто відмітити, що розглянуті чисельні міри РС забрудненої атмосфери залишаються справедливими при будь-якій розмірності вектора  $z_i$ . В окремому випадку для одного забруднювача атмосфери вектор  $z_i$  в (4.1) буде вироджуватися в скаляр.

#### **4.1.3 Розробка чисельних мір рекурентних станів забрудненого атмосферного повітря на основі функції невизначеності**

З аналізу [402, 427–430] слідує, що забруднена атмосфера являє собою значну небезпеку як для здоров'я людини та навколишнього середовища, так і для клімату на планеті. Відомо, що функція невизначеності (ФН) широко використовується в різних радіолокаційних додатках з метою одночасної локалізації прийнятого сигналу в часі та радіальної швидкості. Однак виявлення небезпечних станів забрудненої атмосфери шляхом застосування ФН має свої особливості та специфіку. Тому важливим для попередження НС техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) ОКІ, варто вважати розробку чисельних мір РС забрудненої атмосфери з метою виявлення небезпечних станів на основі безпосередньо вимірюваних у реальному часі станів атмосферних забруднень без використання RP.

Відповідно до сучасної теорії турбулентної дифузії, поширення забрудненою атмосферою у вигляді концентрацій тих або інших шкідливих речовин здійснюється за рахунок переносу їх потоком та дифузії, обумовленої турбулентними флуктуаціями швидкості потоку. При цьому молекулярним потоком, обумовленим тепловим рухом молекул, можна зневажити. У процесі переносу забруднююча речовина може зазнавати змін, вступаючи у фізичну та хімічну взаємодію із частками навколишнього середовища та інших домішок, які змінюють механічні, фізичні та хімічні властивості забруднюючих речовин.

Проблема турбулентного переносу та розсіювання забруднень в атмосферному повітрі відноситься до числа найбільш складних у сучасній науці, завершеного вирішення якої поки немає. Пояснюється це складністю та різноманіттям процесів, які відбуваються в реальній атмосфері при її забрудненні викидами шкідливих речовин. Відомо, що небезпечні стани забрудненої атмосфери в загальному випадку залежать як від потужності забруднюючих викидів, так і від характеристик атмосферного переносу, і насамперед від швидкості вітру та від поточної стійкості (стабільності) атмосфери. На жаль, дотепер відсутній загальноприйнятий критерій визначення категорій стабільності атмосфери. Тому частіше використовують відому класифікацію (Паскуїла) за вертикальним градієнтом температур. Така класифікація виявляється досить грубою та не доцільна для виявлення небезпечних станів забрудненої атмосфери. При цьому більш ефективною ознакою небезпечних станів варто вважати РС забрудненої атмосфери.

У загальному випадку викиди, що забруднюють атмосферу, відбуваються у довільні моменти часу без урахування стану метеорологічних параметрів (стану) атмосфери. При цьому реєструємі міськими постами контролю концентрації забруднювачів атмосфери, містять всю достатню інформацію про фактори поточного турбулентного переносу та розсіювання забруднень в атмосфері.



В [431] відзначається, що при вивченні динаміки концентрацій забрудненої атмосфери міст, як санітарно-гігієнічний норматив доцільно використовувати середньодобові ГДК, які розроблені спеціально для населених місць і не викликають в організмі людини негативних наслідків при необмежено тривалому впливі.

Будемо вважати, що сукупність вимірюваних концентрацій забруднень визначається вектором  $X$ , якій через випадковий характер турбулентного переносу та розсіювання в атмосфері набуває одночасно часового та частотного зсуву. При цьому частотне зрушення обумовлене радіальною швидкістю руху забруднень у напрямку поста контролю. Нехай оператор  $\Phi_\tau$  визначає часовий зсув вектора  $X$  концентрацій вихідних забруднень на величину  $\tau$ , а оператор  $\Phi_\varphi$  – його частотний зсув на величину  $\varphi$ , обумовлену радіальною швидкістю  $V$  руху вектора  $X$  концентрацій у напрямку поста контролю. Тоді для поточного вектора концентрації забруднень, що вимірюються, буде справедливе наступне подання  $\Phi_\varphi(\Phi_\tau(X))$  [432].

При цьому енергія середньоквадратичного відхилення між вектором  $X$  та вектором  $\Phi_\varphi(\Phi_\tau(X))$  у просторі зі скалярним добутком буде визначатися величиною

$$\varepsilon^2 = \|X - \Phi_\varphi(\Phi_\tau(X))\|^2 = \|X\|^2 + \|\Phi_\varphi(\Phi_\tau(X))\|^2 - 2\langle X, \Phi_\varphi(\Phi_\tau(X)) \rangle,$$

де  $\|X\|^2$  являє собою енергію  $E_x$  вимірюваного вектора  $X$  концентрацій забруднень. Якщо часовий  $\tau$  та  $\varphi$  частотний зсуви малі, то  $\|X\|^2 = \|\Phi_\varphi(\Phi_\tau(X))\|^2 = E_x$ . Звідси зрозуміло, що  $\varepsilon^2 = 2E_x - 2\langle X, \Phi_\varphi(\Phi_\tau(X)) \rangle$ . При цьому скалярний добуток  $\langle X, \Phi_\varphi(\Phi_\tau(X)) \rangle$  у даному виразі буде визначати ФН  $\Psi(\tau, \varphi) = \langle X, \Phi_\varphi(\Phi_\tau(X)) \rangle$  для вектора  $X$  концентрацій забруднень.

Варто відмітити, що ФН  $\Psi(\tau, \varphi) = \langle X, \Phi_\varphi(\Phi_\tau(X)) \rangle$  узагальнює відоме поняття кореляційної функції для вектора  $X$  концентрацій забруднень у

випадку зсуву за часом та частотою через турбулентність та розсіювання в атмосфері. При цьому ФН  $\Psi(\tau, \varphi)$  володіє рядом корисних властивостей. Наприклад, значення ФН у початкових координатах  $\Psi(0,0)=E_x$  максимальне та дорівнює енергії вектора вимірюваних концентрацій забруднень. Відомо також, що двовимірне перетворення Фур'є ФН визначає миттєвий спектр або частотно-часову енергетичну щільність вектора концентрацій забруднень для поточних значень часу та частоти (радіальної швидкості). Можна показати, що квадрат модуля ФН є інваріантом до подвійного перетворення Фур'є. Ця властивість ФН дозволяє визначати квадрат модуля миттєвого спектра або квадрат модуля частотно-часової поточної енергетичної щільності для довільних векторів концентрацій атмосферних забруднень.

Розглянемо більш докладно оператор  $\Phi_\varphi$  частотного зсуву, обумовленого радіальною швидкістю  $V$  руху вектора  $X$  концентрацій забруднень. Зазначений частотний зсув в загальному випадку обумовлений ефектом Доплера-Фізо. Стосовно забруднень, цей ефект проявляється в зміні поточного часового масштабу зсуву щодо кожного із забруднювачів атмосфери. Якщо реєструється сукупність забруднювачів у вигляді вектора  $X(t)$  у безперервному часі  $t$ , то зміна часового масштабу для забруднень буде визначатися вектором  $X(tk)$ , де  $k$  – масштаб часу, обумовлений величиною  $k = 1 - \frac{2V}{V_0}$ ; де  $V$  – радіальна швидкість руху вектора  $X(t)$ ;  $V_0$  – швидкість поширення вектора  $X(t)$  забруднень в атмосферному повітрі. При цьому зазначена величина масштабу часу справедлива у випадку  $\frac{V}{V_0} \ll 1$ .

Враховуючи це, ФН для вектора концентрацій забруднень, вимірюваних у безперервному часі, буде визначатися співвідношенням

$$\Psi(\tau, k) = \langle X(t), X(tk - \tau) \rangle. \quad (4.21)$$

У випадку вимірів вектора  $X(t)$  у дискретні моменти часу  $t=t_i$ , де  $i=0,1,2,\dots$  вектор  $X(t_i)=X_i$ . Тоді ФН, випливаючи з (4.21), буде визначатися

$$\Psi(\tau, k) = \langle X_i, X_{ik-\tau} \rangle. \quad (4.22)$$

В (4.22) величина  $i=0,1,2,\dots$  визначає дискретні моменти виміру вектора концентрацій забруднена атмосфера. Це означає, що масштаб часу  $k$  і затримка  $\tau$  у (4.22) можуть приймати тільки відповідні дискретні значення. З огляду на те, що на практиці операція (4.22) звичайно виконується для кінцевої ширини вікна усереднення та, переходячи від енергії до середньої потужності, можемо представити ФН у випадку дискретного вектора вимірюваних концентрацій забруднень буде визначатись у вигляді:

$$\Psi'(\tau, k) = \frac{1}{M} \sum_{v=0}^{M-1} X_{N-v}, X_{N-vk-\tau}. \quad (4.23)$$

У співвідношенні (4.23) величина  $M$  визначає кількість відліків у вікні усереднення, а  $N$  – номер дискретного моменту вимірювання, що відповідає поточному дискретному моменту часу вікна усереднення. Це дозволяє використовувати для обчислення ФН (4.23) тільки доступні до дискретного моменту  $N$  часу дані вимірів вектора концентрації забруднень. При реалізації (4.23) необхідно дотримуватися умови, при якій  $N \geq M + (M-1)k + \tau$ . З огляду на дану умову, можна представити модифіковану процедуру обчислення дискретної ФН для довільних значень  $N$ ,  $M$ ,  $k$  та  $\tau$  у наступному вигляді:

$$\Psi''(N, \tau, k, M) = \text{if} \left\{ N < M + (M-1)k + \tau, 0, \frac{1}{M} \sum_{v=0}^{M-1} X_{N-v}, X_{N-vk-\tau} \right\}. \quad (4.24)$$

Отримані оцінки ФН для вимірюваних у безперервному (4.23) та дискретному (4.24) часі поточних концентрацій забруднювачів атмосфери,

можуть розглядатися як чисельні міри схожості відповідних векторів. Дані чисельні міри справедливі для довільного числа та виду складових вектора концентрацій забруднюючих речовин. Крім того, вони залишаються справедливими й у випадку, коли складові вектора являють собою перевищення забруднювачами ГДК. У загальному випадку ФН (4.23) і (4.24) і відповідні їм чисельні міри є узагальненнями кореляційних функцій і мір кореляції за часом і частотою. При цьому чисельні міри (4.23) та (4.24) характеризують ступінь подібності (рекурентності) векторів станів концентрацій забруднювачів атмосфери при різних значеннях масштабу часу  $k$  та затримки  $\tau$ .

Тому міри (4.23) і (4.24) по суті, можуть розглядатися у якості моделей РС забрудненої атмосфери щодо різних значень масштабу часу  $k$  та затримки  $\tau$ . Запропоновані моделі РС забрудненої атмосфери (чисельні міри РС) дозволяють моделювати небезпечні стани забрудненої атмосфери (РС), що локалізуються у часі за признаками нульової або близької до нуля величині радіальної швидкості переміщення забруднень відносно точки контролю. Важливим при використанні мир РС на основі ФН є те, що не потрібно апріорна та поточна інформація про метеорологічні параметри та стійкість атмосферного повітря, які звичайно використовуються у відомих моделях та методах.

#### **4.1.4 Вирішення завдання оцінки ризику здоров'ю людей внаслідок забруднення атмосферного повітря**

Відповідно до рекомендацій «Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря» схема оцінки ризику здоров'ю людей від забрудненої атмосфери включає ряд етапів: ідентифікація небезпеки; оцінка експозиції; оцінка токсичності (залежності «доза-ефект»); характеристика ризику [433].

На етапі «ідентифікація небезпеки» визначають, які речовини впливають на організм, а також чи володіють вони потенційною здатністю

викликати несприятливі ефекти в організмі (у тому числі канцерогенні, мутагенні або інші).

На етапі «оцінка експозиції» кількісно визначають дозу речовин, які володіють токсичністю, що діє на організм у конкретній аналізованій ситуації та визначається експозиційною дозою. Для цього визначається вміст речовини в повітрі. При оцінці впливу визначають популяцію осіб, яка піддається агресії, а також частоту, тривалість дії токсичних речовин, спосіб впливу на організм.

Етап «оцінка токсичності» пов'язаний з визначенням залежності «доза-ефект» для досліджуваних речовин. Кінцева мета цього етапу полягає у визначенні рівня доз, при яких з'являються несприятливі ефекти від впливу речовин, які володіють токсичністю, на організм. Якщо таких даних немає, то одержують орієнтовні значення рівня доз, прибігаючи до розрахункових методів. Рівень дози може бути визначений шляхом розподілу встановленої в інших дослідженнях граничної дози на фактор безпеки. При цьому фактор безпеки є своєрідним допущенням, що враховує неповноту або недостатність знань про токсичність речовини.

«Характеристика ризику» – кінцевий етап. На цьому етапі узагальнюється інформація, отримана на попередніх етапах, і визначаються кількісні характеристики ризику.

При оцінці ризику прийнято розрізняти канцерогенну небезпеку, тобто здатність речовин викликати онкологічні захворювання, і не канцерогенну небезпеку, тобто здатність речовин причиняти інші впливи, наприклад, викликати зміни в імунній системі та ферментативній активності. Відповідно до [433], не канцерогенні речовини, що володіють токсичною дією на людину, мають поріг впливу, тобто рівень, нижче якого вони не спричиняють впливу. Це відрізняє їх від канцерогенних речовин, які такого порогу не мають [434]. Основним обмеженням EPA USA [434] і методичних рекомендацій [433] при оцінюванні ризику є недостатня точність оцінок,

обумовлена відсутністю повних даних, використанням не верифікованих моделей, експертів і великої кількості допущень та обмежень.

При цьому міжнародна методологія оцінки ризику здоров'ю населення [434, 435] передбачає для не канцерогенних забруднюючих речовин і канцерогенів негенотоксичної дії наявність граничних рівнів, нижче яких шкідливі наслідки не виникають, а для канцерогенних речовин і канцерогенів генотоксичної дії граничні рівні відсутні. Це пояснюється тим, що для канцерогенних речовин і канцерогенів генотоксичної дії будь-які дози викликають ушкодження генетичного матеріалу. Тому при оцінці ризику здоров'ю населення, обумовленого впливом забрудненого атмосферного повітря, запропоновано орієнтуватися на систему критеріїв, рекомендовану в публікаціях ВОЗ (1999, 2000) [436–438].

Вплив хімічних речовин супроводжується наявністю патологічних змін, що викликають відповідні реакції в організмі людини. Внаслідок цього при оцінюванні ризику для здоров'я населення одним з важливих і обов'язкових умов, є математичний опис функції залежності «доза-ефект».

У всіх режимах функціонування ОКІ технічної сфери можуть впливати на населення, що проживає поблизу ОКІ. Тому в загальному випадку ризик подібного негативного впливу необхідно оцінювати із двох позицій. Періодична оцінка ризику, що виникає в результаті тривалого або періодичного впливу токсичних хімічних речовин та інших потенційно небезпечних речовин, що забруднюють атмосферу, а також аналіз аварійного ризику. Особливо необхідно оцінювати та контролювати реальний ризик, що спричиняється ОКІ здоров'ю людини.

Найбільш прийнятним критерієм для оцінки ступеня ризику ураження людей є ймовірність ураження в заданій точці міста, яка обумовлена з урахуванням мінливості параметрів приземного шару повітря та кількості шкідливих речовин, що потрапляють в атмосферне повітря. У ряді країн західної Європи, наприклад, у Голландії законодавчо встановлені рівні індивідуального ризику (ймовірності ураження): зневажливо малий ( $10^{-8}$ ) і

максимально прийнятний ( $10^{-6}$ ). Зневажливо малим ризиком вважається такий рівень, нижче якого немає необхідності проведення яких-небудь заходів щодо зниження небезпеки ураження. Максимально прийнятний ризик – рівень, який не можна перевершувати, які б не були витрати. Область значень, що лежать між цими двома рівнями, допускає зменшення ризику на основі компромісу між соціальною вигодою та фінансовими можливостями.

Варто відмітити, що при катастрофічному забрудненні атмосферного повітря для оцінки ризику здоров'ю та життю населення застосовуються аналітичні моделі. При цьому звичайно передбачається виконання наступних умов:

- 1) забруднення атмосферного повітря значні і їхній вплив на здоров'я людини багаторазово перевершує вплив інших факторів;
- 2) забруднення атмосферного повітря виявляються постійними, може бути не значними, але їх накопичувальний вплив на здоров'я людини згодом перевершує вплив інших факторів.

Такі впливи одержали назву «доза», а аналітичні моделі, що описують їх вплив на людину, – моделі «доза – ефект». Як доза, наприклад, можна розглядати кількість забруднюючої речовини, що потрапила в організм людини.

При цьому моделі «доза – ефект» застосовуються відповідно до першої умови при визначенні ймовірностей поразки людини, коли рівень дози значний, але її вплив короточасний, що звичайно відбувається при аварійних подіях, пов'язаних з появою НС техногенного характеру внаслідок наявності в атмосферному повітрі на території (поблизу) ОКІ шкідливих речовин, понад ГДК. Відповідно до другої умови, моделі «доза – ефект» застосовуються, коли організм поглинає забруднювач постійно, але невеликими порціями. Цей забруднювач поступово накопичується в організмі, який після закінчення певного часу приводить до негативних наслідків для здоров'я людини. Звичайно друга умова характерна для

населення проживаючого на територіях поблизу ОКІ, що забруднюють атмосферне повітря.

Таким чином, один і той же рівень впливу (кількість поглинутого токсиканта) може викликати наслідки різної ваги в різних людей, тобто ефект ураження носить імовірнісний характер. Такий підхід до визначення вражаючої дії негативних факторів аварій і НС називається імовірнісним. Величина імовірності ураження (ефект ураження)  $P_{yp}$  (вимірюється в частках одиниці або відсотках) певного ступеня тяжкості в моделях «доза – ефект» і виражається функцією Гауса (функцією помилок).

Відомо, що гостра токсичність (негайні токсичні прояви) мають яскраво виражений граничний характер [439]. Для оцінки ризику захворювання  $Ri_3(C)$  негайних токсичних ефектів [440] може бути застосована формула:

$$Ri_3(C) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{a+b \lg C} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt, \quad (4.25)$$

де  $a$  та  $b$  – параметри, що залежать від токсикологічних властивостей речовини;  $C$  – концентрація токсиканта в атмосферному повітрі;  $t$  – параметр інтегрування.

Ризик (4.25) негайних токсичних ефектів являє собою умовний індивідуальний ризик, рівний імовірності летального результату (або захворювання). Звичайно значення коефіцієнтів  $a$  та  $b$  в (4.25) визначаються на підставі спеціальних токсикологічних досліджень властивостей шкідливих забруднювачів і, як правило, наводяться тільки в спеціальній літературі. Для виконання практичних розрахунків представляється доцільним зв'язати коефіцієнти  $a$  та  $b$  зі значеннями традиційних параметрів, які застосовуються для характеристики токсичності речовин і нормування їхнього вмісту в атмосферному повітрі (клас токсичності речовини та ГДК). З урахуванням цього запропонований наступний варіант виразу (4.25):



$$Ri_3(C) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{a+b \lg(C/\Gamma_{ДК_{м.р.}})} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt, \quad (4.26)$$

де  $\Gamma_{ДК_{м.р.}}$  – гранично допустима максимальна разова концентрація хімічної речовини в повітрі населених місць, мг/м<sup>3</sup>.

Ця концентрація при вдиханні протягом 30 хвилин не повинна викликати рефлекторних (у тому числі субсенсорних) реакцій в організмі людини. Значення параметрів  $a$  та  $b$  для проведення розрахунків за формулою (4.26), наведені в табл. 1.8 [439]. Оцінка ризику здоров'ю (4.26), що характерна для сценарію, при якому населення піддається впливу токсиканта, концентрація якого в повітрі  $C$ , а час експозиції (час перебування в забрудненій атмосфері) не менш 30 хвилин.

Табл. 4.1 – Значення емпіричних коефіцієнтів для рівнянь (4.25) і (4.26)

Клас небезпеки речовини	Характеристика речовини	$a$	$b$
1-й	Надзвичайно небезпечні	-9,15	11,66
2-й	Високо небезпечні	-5,51	7,49
3-й	Помірковано небезпечні	-2,35	3,73
4-й	Мало небезпечні	-1,41	2,33

Залежність ризику (4.26) виникнення негайних токсичних проявів від кратності перевищення  $\Gamma_{ДК_{м.р.}}$  щодо речовин різних класів небезпеки представлена на рис. 4.1.

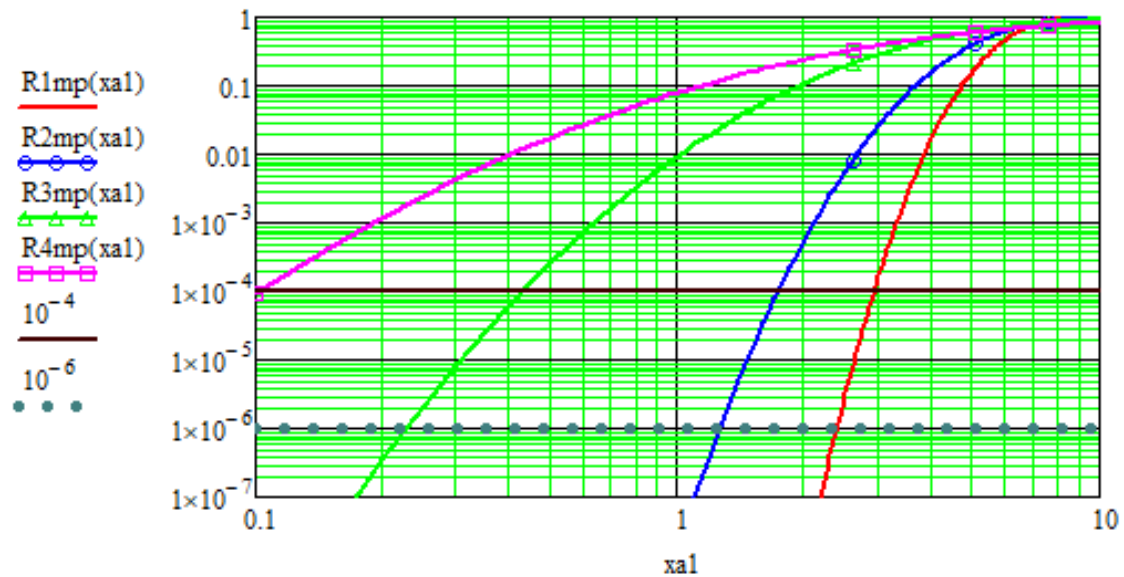


Рис. 4.1 – Залежність ризику (4.26) виникнення негайних токсичних проявів від кратності перевищення ГДК<sub>м.р.</sub> для речовин різних класів небезпеки: R1 (надзвичайно небезпечні); R2 (високо небезпечні); R3 (помірковано небезпечні); R4 (мало небезпечні)

Для ризику хронічної інтоксикації (у тому числі канцерогенного ризику), пов'язаної з атмосферними забрудненнями, часто використовується формула (моделі, що не має порогу) наступного виду:

$$RiH_3(C) = 1 - \exp(-UR \cdot T \cdot C^\beta), \quad (4.27)$$

де UR – одиничний ризик – коефіцієнт пропорційності, який пов'язує ризик та концентрацію токсиканта; C – концентрація або доза речовини, що здійснює вплив протягом часу T;  $\beta$  – коефіцієнт, що враховує особливості токсичних властивостей речовин. Ризик (4.27) може бути визначений за формулою, яка більш зручна для практичних розрахунків

$$RiH_3(C) = 1 - \exp\left[-0,174 \cdot \left(\frac{C}{ПДК_{с.д.} \cdot K}\right)^\beta \cdot T\right], \quad (4.28)$$

де  $ГДК_{с.д.}$  – середньодобова граничнодопустима концентрація небезпечної речовини в повітрі населених місць,  $мг/м^3$ . Ця концентрація не повинна здійснювати на людину прямого або непрямого шкідливого впливу при невизначено тривалому (роки) вдиханні.

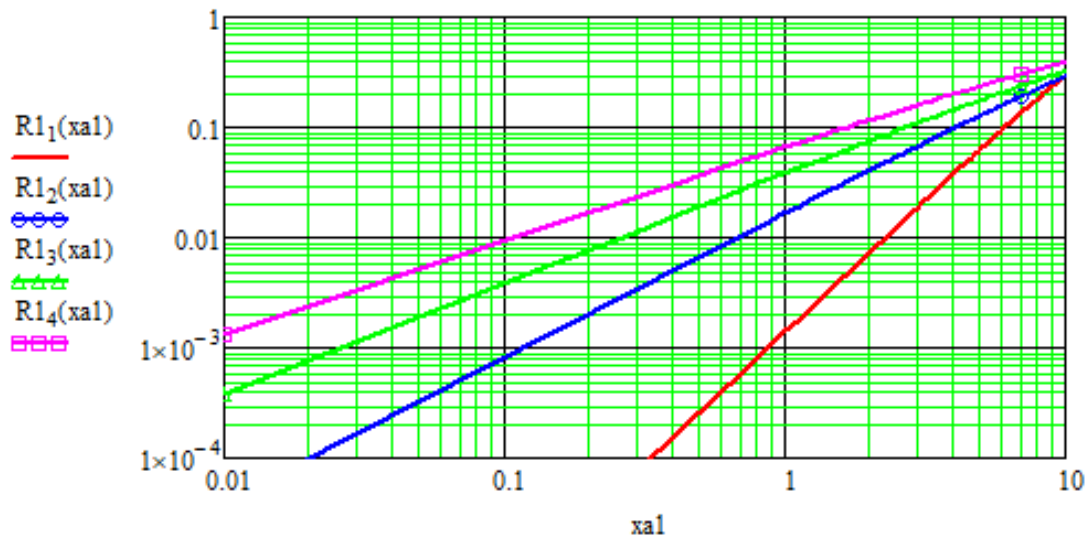
Типові параметри  $\beta$ ,  $K$ , що рекомендовані при розрахунку для часу експозиції 25 років, наведені в табл. 4.2.

Табл. 4.2 – Параметри для розрахунку ризику за формулою (4.28)

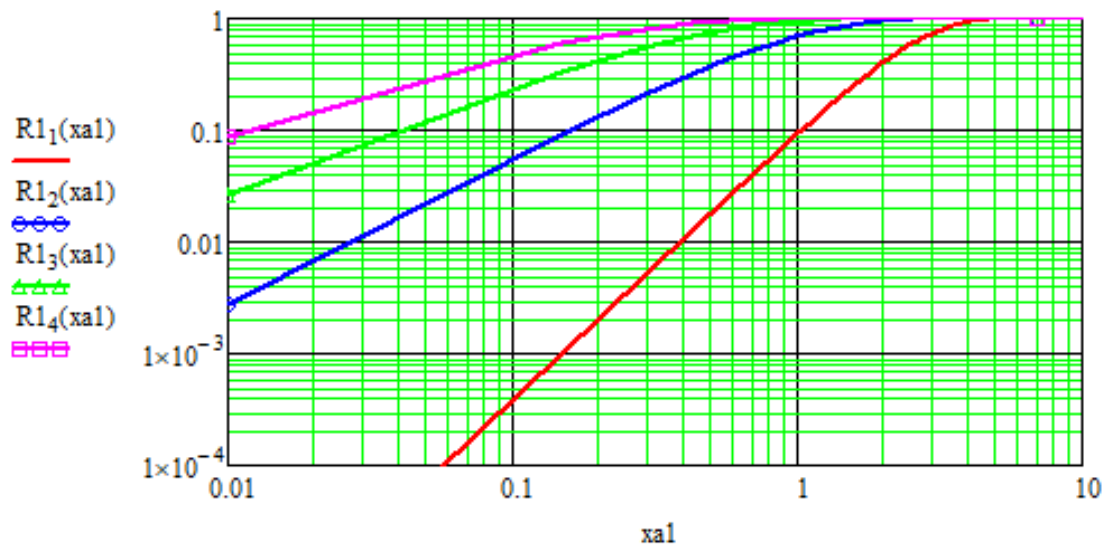
Клас безпеки речовини	Характеристика речовини	$\beta$	$K$
1-й	Надзвичайно небезпечні	2,4	7,5
2-й	Високо небезпечні	1,1	6,0
3-й	Помірковано небезпечні	1,0	4,5
4-й	Мало небезпечні	0,86	3,0

При концентрації небезпечної речовини в атмосферному повітрі менше  $ГДК$  незалежно від класу безпеки  $\beta=1$ .

На рис. 4.2, а, б наведені залежності ризику хронічної інтоксикації, обумовлені забрудненням атмосфери, від кратності перевищення  $ГДК$  (величини  $C/ГДК_{с.д.}$ ) для речовин різних класів безпеки, побудовані на підставі даних табл. 4.2 для 1 року та 70 років відповідно.



а)



б)

Рис. 4.2 – Ризики хронічних інтоксикацій населення як функція кратності перевищення концентрації токсиканта в атмосферному повітрі для речовин різних класів небезпеки: R1 (надзвичайно небезпечні); R2 (високо небезпечні); R3 (помірковано небезпечні); R4 (мало небезпечні); а – протягом 1 року; б – протягом 70 років

Наведені на рис. 4.1 і рис. 4.2 залежності ризиків (4.26) і (4.28) від перевищення ГДК для речовин різних класів небезпеки дозволяють виявляти прийнятні та неприйнятні для здоров'я людини значення перевищень ГДК концентраціями шкідливих забруднювачів атмосферного повітря.

#### 4.1.5 Критерії оцінки ризиків здоров'ю людей внаслідок забруднення атмосферного повітря

Для визначення критеріїв оцінки ризиків здоров'ю населення найчастіше використовують систему критеріїв прийнятності ризику. Відповідно до даної системи критеріями першого діапазону ризику (індивідуальний ризик протягом всього життя, рівний або менший  $10^{-6}$ ) є рівень ризику, що сприймається всіма людьми як зневажливо малий, що не відрізняється від звичайних, повсякденних ризиків.

Другий діапазон (індивідуальний ризик протягом всього життя більший  $10^{-6}$ , але менший  $10^{-4}$ ) відповідає гранично допустимому ризику, тобто верхній границі прийнятного ризику. Саме на цьому рівні встановлена більшість закордонних та рекомендованих міжнародними організаціями гігієнічних нормативів для населення в цілому (наприклад, ВОЗ для атмосферного повітря як допустимий ризик використовує  $10^{-4}$ ).

Третій діапазон (індивідуальний ризик протягом всього життя більший  $10^{-4}$ , але менший  $10^{-3}$ ) прийнятний для професійних груп і неприйнятний для населення в цілому.

Четвертий діапазон (індивідуальний ризик протягом всього життя рівний або більше  $10^{-3}$ ) неприйнятний ні для населення, ні для професійних груп.

Варто відмітити, що параметри наведених критеріїв ризику дотепер широко обговорюються [441, 442], однак наведена класифікація на поточний період є найпоширенішою в усьому світі.

При цьому особливий інтерес у сфері оцінки ризику здоров'ю викликає проблема уніфікації поняття прийнятного ризику. Токсикологічний глосарій національного інституту здоров'я США, крім визначення ризику *deminimis*— «ризик, що є незначним і занадто малим, щоб становити соціальний інтерес», дає кількісний вираз цього ризику (ймовірність нижче  $10^{-5}$  або  $10^{-6}$ ). При цьому відзначається, що використання цього терміна в правовій практиці має на увазі незначний ризик для індивідуума [443].

У документах Міжнародної організації по стандартизації використовується поняття «прийнятний ризик». При цьому наведене і визначення аналогічного терміна «допустимий ризик» – ризик, який прийнятний в конкретному контексті, базується на існуючих на даний момент цінностях у суспільстві [444].

Для визначення безпечних рівнів використовується інформація щодо максимально недіючих та мінімально діючих рівнів експозиції за даними експериментів та про опорні рівні за даними епідеміологічних досліджень. Найчастіше для цього застосовуються парні математичні моделі залежності «експозиція – ефект» для кожного фактора та виду ефекту. Визначення безпечних рівнів впливу проводиться з урахуванням тривалості впливу для найбільш чутливих груп населення [445, 446].

Одним з найбільш важливих питань гармонізації критеріїв оцінки ризику здоров'ю людини є загальне визнання рівнів допустимого ризику здоров'ю населення. У деяких методичних документах такі рівні представлені. Так, наприклад, в «Посібнику з оцінки ризику для здоров'я населення при впливі хімічних речовин, що забруднюють навколишнє середовище» величина індивідуального ризику серйозного захворювання або смерті, рівна  $10^{-4}$ , розглядається як верхня границя прийнятного (допустимого) ризику. Ця величина практично збігається з наведеними в більшості методичних документів США та ЄС.

У зазначених документах перший діапазон ризику (індивідуальний ризик протягом всього життя рівний або менший  $10^{-6}$ ), відповідає одному додатковому випадку серйозного захворювання або смерті на 1 млн. експонованих осіб і характеризує такі рівні ризику, які сприймаються всіма людьми як допустимі малі. Такий ризик не відрізняється від звичайних повсякденних ризиків (рівень *deminimis*). Подібні ризики не вимагають ніяких додаткових заходів щодо їхнього зниження, а їхні рівні підлягають тільки періодичному контролю.

Другий діапазон (індивідуальний ризик протягом всього життя більший  $10^{-6}$ , але менший  $10^{-4}$ ) відповідає гранично припустимому ризику, тобто верхній границі прийнятного ризику. Саме на цьому рівні встановлена більшість закордонних і гігієнічних нормативів, що рекомендуються міжнародними організаціями, для населення. Дані рівні підлягають постійному контролю. У деяких випадках при таких рівнях ризику можуть проводитися додаткові заходи щодо їхнього зниження.

Третій діапазон (індивідуальний ризик протягом всього життя більший  $10^{-4}$ , але менший  $10^{-3}$ ) прийнятний для професійних груп і неприйнятний для населення в цілому. Поява такого ризику вимагає розробки та проведення планових оздоровчих заходів. Планування заходів щодо зниження ризику в цьому випадку повинне ґрунтуватися на результатах більш поглибленої оцінки різних аспектів існуючих проблем і встановленні ступеня їхньої пріоритетності стосовно інших гігієнічних, екологічних, соціальних і економічних проблем на даній території.

Четвертий діапазон (індивідуальний ризик протягом всього життя рівний або більше  $10^{-3}$ ) неприйнятний ні для населення, ні для професійних груп. Даний діапазон позначається як *demanifestisrisk*, і при його досягненні необхідно давати рекомендації для осіб, що приймають рішення про проведення екстрених заходів щодо зниження ризику.

Варто відзначити, що сучасні подання про загальні рівні прийнятного індивідуального ризику мають деякі відмінності. Так, наприклад, відповідно до концепції прийнятного ризику розрізняють:

- зону прийнятного ризику, де допустиме для населення значення індивідуального ризику від будь-якої форми діяльності не повинне перевищувати величину  $10^{-6}$  смертей на одну людину в рік. Цю зону представляють малоймовірні події. Рівень прийнятного ризику в основному пов'язаний зі стихійними природними явищами та НС, позбутися від яких неможливо, внаслідок чого їх змушені приймати як умови свого існування на

Землі (згідно даним статистики індивідуальний ризик летального результату при експлуатації багатьох технічних систем існує на рівні  $10^{-7}$ );

- перехідну зону від недопустимого ризику (менше  $10^{-3}$ ) до зони прийняттого ризику (більше  $10^{-6}$ ). У цю зону входять численні, досить розповсюджені види діяльності та небезпечні події.

- зону неприйняттого ризику, де при ймовірності більше  $10^{-3}$  зосереджені найбільш імовірні причини, за яких гине переважна більшість людей. Існування факторів безпеки з ймовірністю більше  $10^{-3}$  істотно збільшує ймовірність смерті людей від зовнішніх причин.

На рис. 4.3 як приклад наведені залежності ризику хронічних інтоксикацій від величини перевищення ГДК шкідливими речовинами різного класу небезпеки в атмосферному повітрі протягом 1 року.

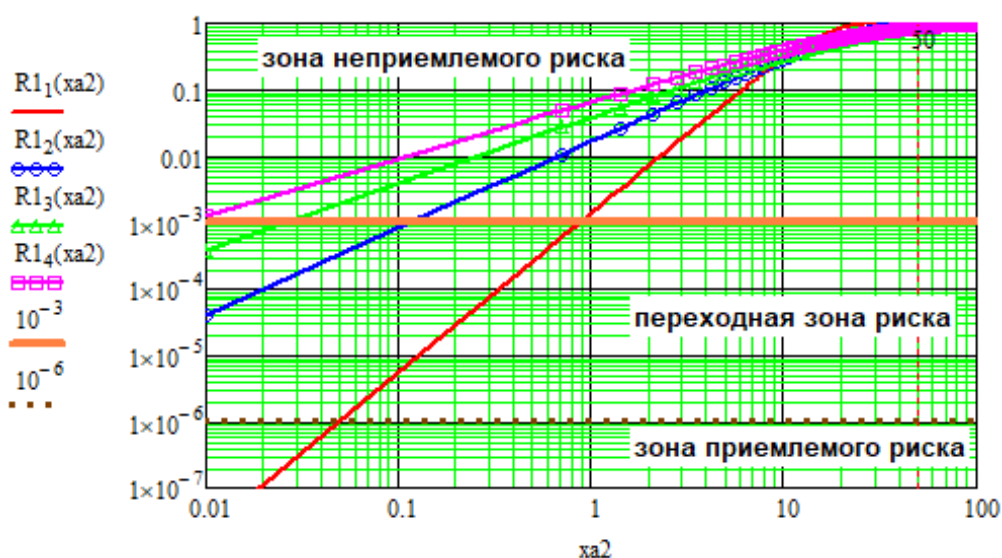


Рис. 4.3 – Ризик хронічних інтоксикацій залежно від перевищення ГДК в атмосферному повітрі протягом 1 року шкідливими речовинами різного класу небезпеки: R1 (надзвичайно небезпечні); R2 (високо небезпечні); R3 (помірно небезпечні); R4 (мало небезпечні)

Аналогічні залежності, але для ризику виникнення негайних токсичних проявів залежно від перевищення ГДК<sub>с.д.</sub> для двоокису азоту, формальдегіду та аміаку в атмосферному повітрі протягом 1 року[447] наведені на рис. 4.4.



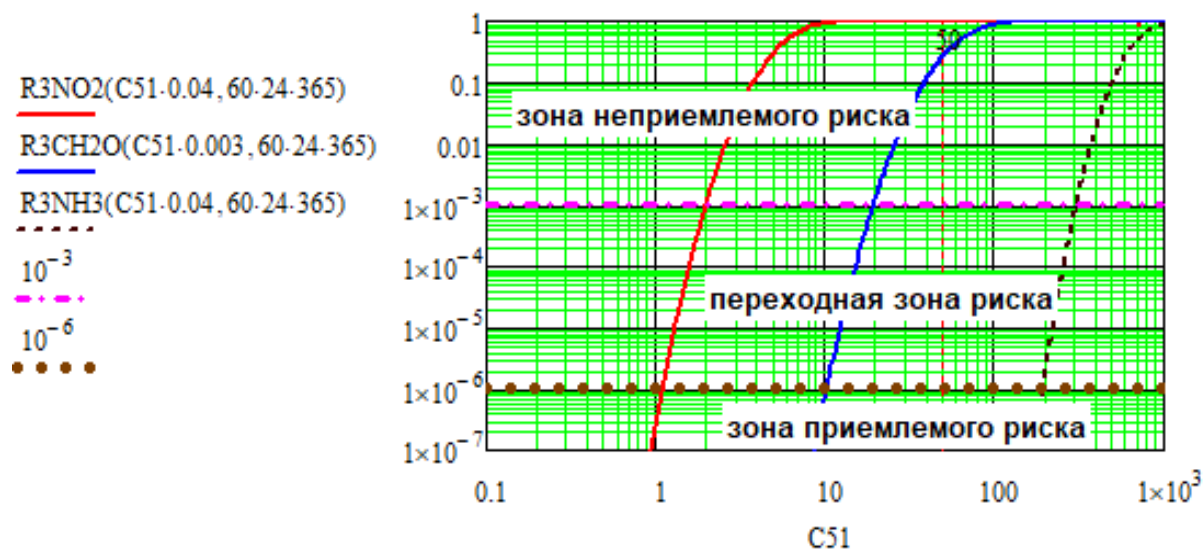


Рис. 4.4 – Ризик негайних токсичних проявів залежно від перевищення ГДК<sub>с.д.</sub> шкідливих речовин (двоокис азоту, формальдегід, аміак) в атмосферному повітрі протягом 1 року

На рис. 4.3 і рис. 4.4 відзначений рівень, що відповідає величині 50 ГДК, що визначений у якості одного з ознак наявності НС техногенного характеру внаслідок перевищення концентрації шкідливих речовин в атмосферному повітрі понад ГДК.

З наведених залежностей слідує, що рівень забруднення атмосферного повітря, рівний 50 ГДК, відповідає майже 100% хронічному та негайному токсичному прояву негативного впливу на людину. Якщо використати в якості ГДК максимально разову концентрацію, то майже 100% хронічний та негайний токсичний прояв негативного впливу на людину для двоокису азоту та формальдегіду спостерігається вже при 10 ГДК<sub>м.р.</sub> (рис. 4.5).

Для оцінки локальних у часі (24 години та 8 годин) нормативних ознак НС внаслідок перевищення забрудненнями атмосферного повітря ГДК досліджувався ризик хронічного негативного впливу на людину для речовин різного класу небезпеки, який представлений на рис. 4.6 і рис. 4.7 для 24 годин і 8 годин відповідно. При цьому границі перехідної зони ризику визначалися інтервалами  $ZNR_{24} - ZP_{24}$  і  $ZNR_8 - ZP_8$  для 24 годин і 8 годин

відповідно. На рис. 4.6 та рис.4.7 відзначені ознаки класифікації НС, які характеризуються відповідно (20–29) ГДК і (30–40) ГДК в атмосферному повітрі, затверджені в Україні та діють на цей час.

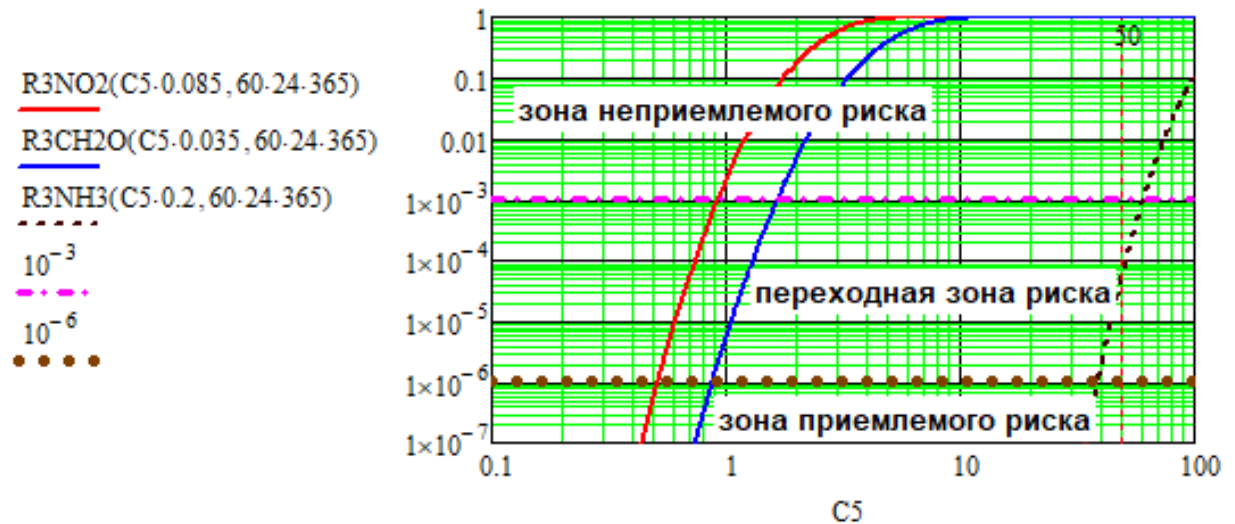


Рис. 4.5 – Ризик негайного токсичного прояву негативного впливу залежно від перевищення ГДК<sub>м.р.</sub> шкідливими речовинами (двоокис азоту, формальдегід, аміак) в атмосферному повітрі протягом 1 року

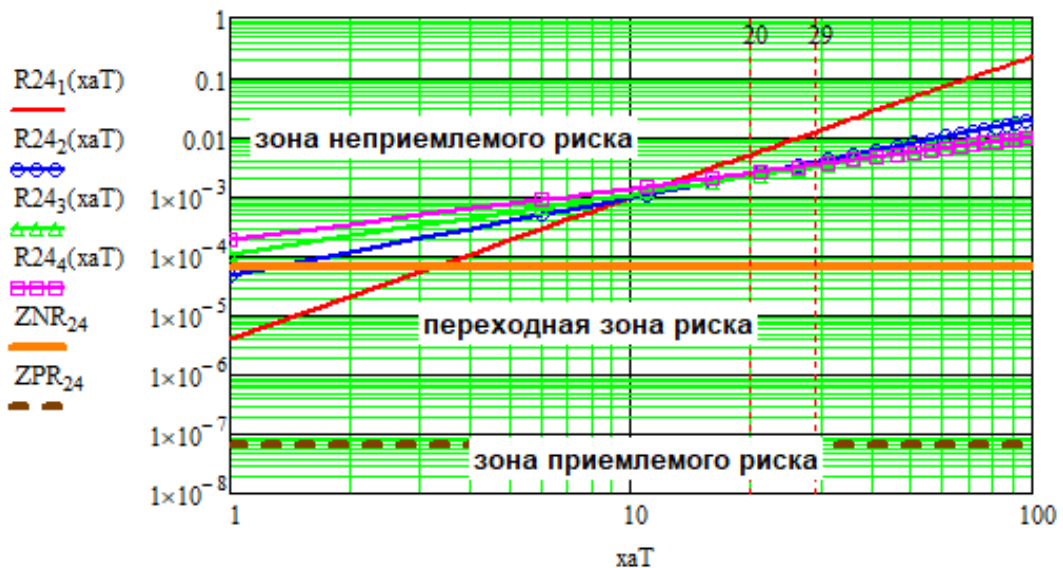


Рис. 4.6 – Ризик хронічних інтоксикацій залежно від перевищення ГДК в атмосферному повітрі протягом 24 годин шкідливими речовинами різного класу небезпеки: R24<sub>1</sub> (надзвичайно небезпечні); R24<sub>2</sub> (високо небезпечні); R24<sub>3</sub> (помірковано небезпечні); R24<sub>4</sub> (мало небезпечні)

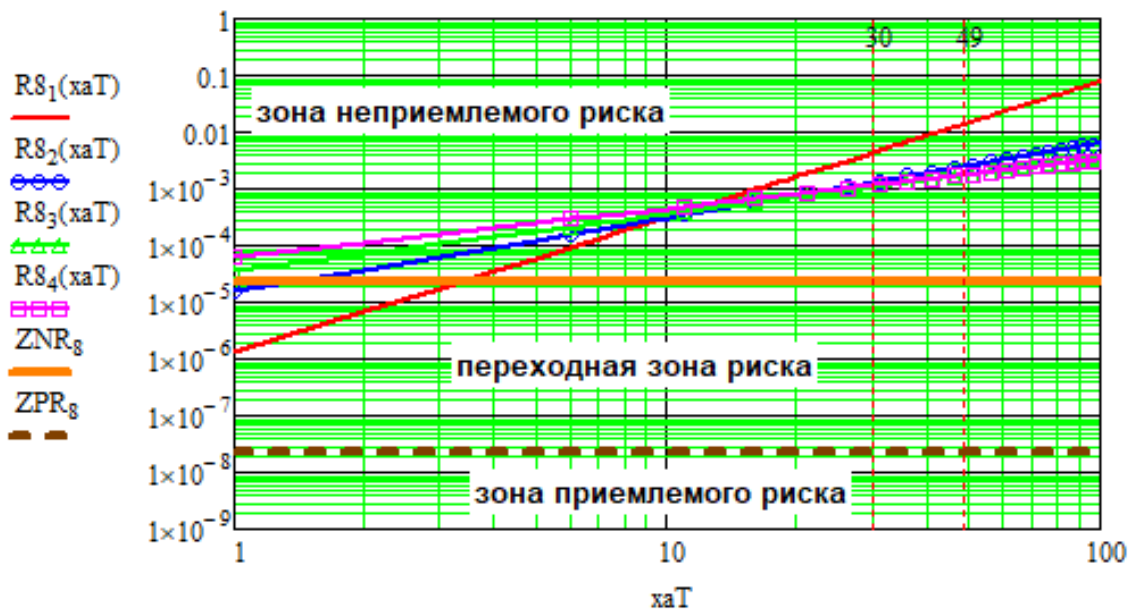


Рис. 4.7 – Ризик хронічних інтоксикацій залежно від перевищення ГДК в атмосферному повітрі протягом 8 годин шкідливими речовинами різного класу небезпеки:  $R8_1$  (надзвичайно небезпечні);  $R8_2$  (високо небезпечні);  $R8_3$  (помірковано небезпечні);  $R8_4$  (мало небезпечні)

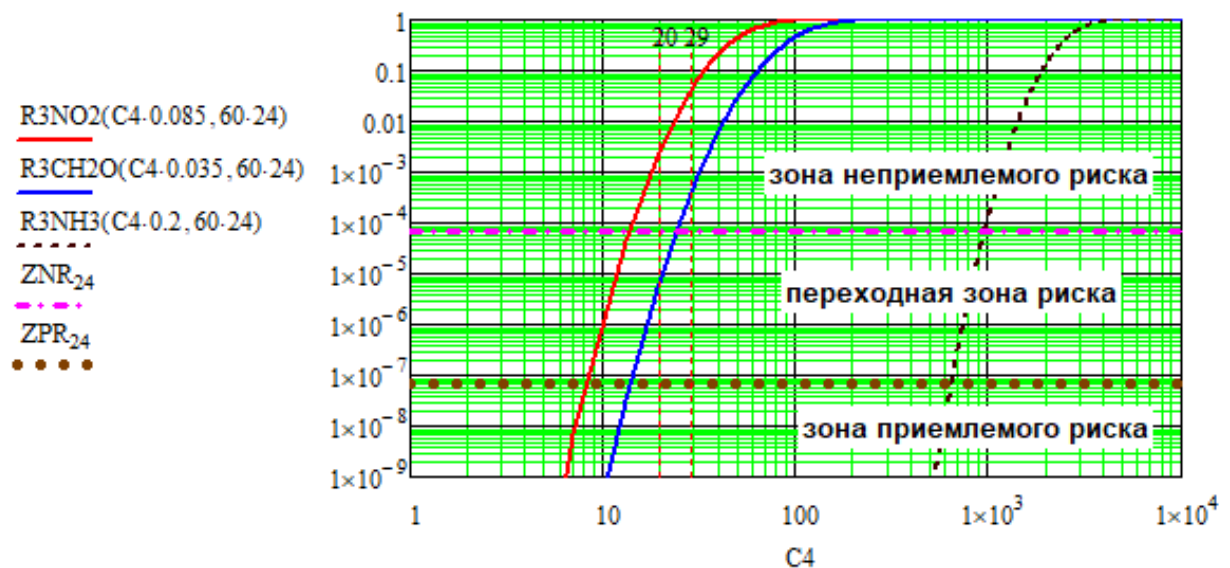


Рис. 4.8 – Ризик негайного токсичного прояву залежно від перевищення ГДК<sub>м.р.</sub> для двоокису азоту, формальдегіду та аміаку в атмосферному повітрі протягом 24 годин

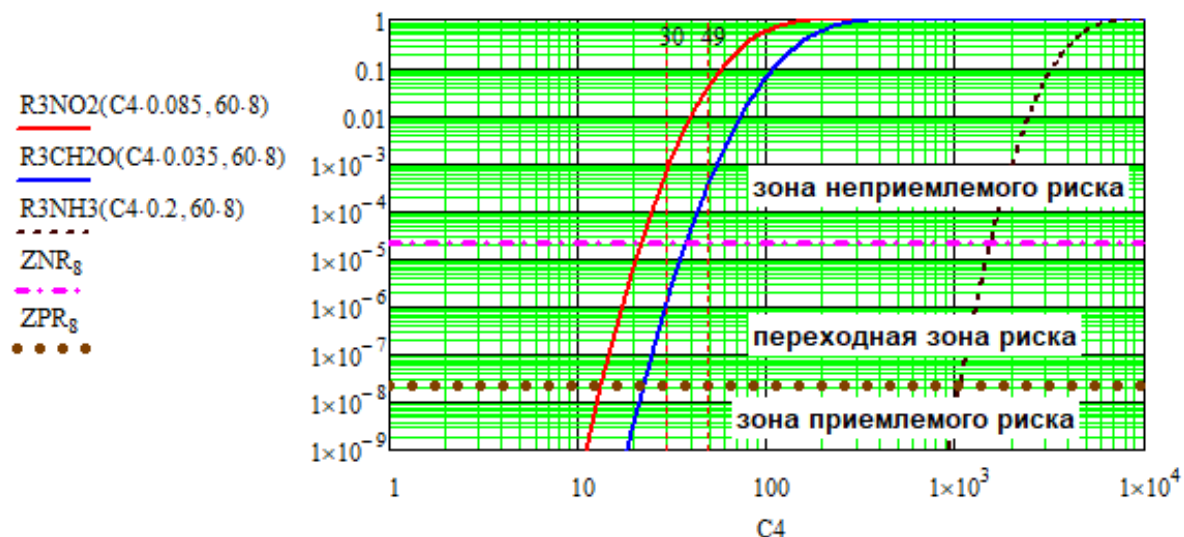


Рис. 4.9 – Ризик негайного токсичного прояву залежно від перевищення ГДК<sub>м.р.</sub> для двоокису азоту, формальдегіду та аміаку в атмосферному повітрі протягом 8 годин

Як приклад на рис. 4.8 і рис. 4.9 наведені залежності ризику негайного токсичного прояву від величини перевищення ГДК<sub>м.р.</sub> для двоокису азоту, формальдегіду та аміаку в атмосферному повітрі протягом 24 годин. Також на рис. 4.8 і рис. 4.9 відзначені нормативні ознаки наявності НС, які характеризуються (20-29) ГДК і (30-40) ГДК в атмосферному повітрі.

Із аналізу наведених залежностей ризику негайного токсичного впливу на людину двоокису азоту та формальдегіду в атмосферному повітрі протягом 24 годин і 8 годин класифікаційними ознаками НС є неприпустимі ризику, величина яких перевищує 0,1% для двоокису азоту та 0,08% для формальдегіду. Це означає, що для попередження НС техногенного характеру внаслідок наявності шкідливих речовин в атмосферному повітрі на території (поблизу) ОКІ, концентрації яких перевищують ГДК, необхідно контролювати поточну концентрацію забруднювачів в області менших значень перевищення ГДК, чим прийняті як нормативні ознаки наявності НС. При цьому необхідно враховувати, що поточні перевищення ГДК шкідливими речовинами в атмосферному повітрі населених місць істотно залежать не тільки від виду та кількості токсиканта, що викидається в

атмосферу, але й від поточного стану атмосфери, що може підсилювати негативний вплив токсиканта та приводити до збільшення ризику здоров'ю людини, включаючи його передчасну смерть.

Таким чином, як критерії для ризику здоров'ю та передчасної смерті населення від забруднення атмосферного повітря доцільно користуватися сучасними поданнями про рівень прийняттого індивідуального ризику, оскільки цей рівень базується на величині смертей на одну людину в рік. Критерії оцінки рівня ризику, пов'язаного зі смертю, розраховуючи на одну людину в рік, не суперечать сучасним поданням і є більш жорсткими в порівнянні з рівнем прийняттого індивідуального ризику для всього життя людини.

#### **4.1.6 Опис розробленої математичної моделі чисельних мір аналізу рекурентних діаграм динаміки станів забрудненого атмосферного повітря та ризику здоров'ю людей**

Модель забрудненої атмосфери на території (поблизу) ОКІ базується на її поданні у вигляді єдиної складної динамічної системи, у якій забруднення та розсіювання шкідливих речовин здійснюються в складній взаємодії з урахуванням великого числа різних явних і прихованих процесів, які важко описати та урахувати заздалегідь [448]. При цьому стан системи буде визначатися безліччю параметрів, пов'язаних із процесами інжекції та розсіювання шкідливих речовин з урахуванням поточних метеорологічних особливостей атмосферного повітря.

З урахуванням зазначеного раніше базовою основою розробки моделі забрудненої атмосфери є емпіричні дані (4.1), які представляють собою результати поточних вимірів концентрацій шкідливих речовин в атмосферному повітрі, зафіксовані на стаціонарних постах контролю атмосферних забруднень [449]. Разом з тим замість емпіричних даних можуть використовуватися задані для моделювання відповідні данні. Для довільного числа забруднювачів емпіричні або задані дані у фіксований

момент часу представляють вектор  $z_i$  вимірюваних концентрацій, або ладанних даних.

Вектор  $z_i$  вимірюваних або заданих концентрацій шкідливих речовин, визначає відповідний стан або модель атмосферних забруднень в області розміщення стаціонарного поста. За вимірами або даними вектора  $z_i$  в дискретні моменти часу можна за допомогою відповідних RP візуально відображати динаміку станів забрудненої атмосфери. У реальному часі вимірів RP будуть визначатися (4.3).

Як раніше відзначалося, обчислення RP (4.3) залежить від функціонала норми та величини порога  $\epsilon$  щодо рекурентності вимірюваних або заданих для моделювання векторів станів забрудненої атмосфери. Із цієї причини такий спосіб відображення не є самонастроювальним за вимірами (заданими даними) і не завжди адекватним відображенню реальної (ладанної) динаміки станів. Для адекватного відображення динаміки станів забрудненої атмосфери запропоновано обчислювати RP відповідно до виразу (4.17) з урахуванням рівняння (4.15).

Як показано вище RP (4.17) є самонастроювальними за вимірами (або заданими даними) та не залежать від функціонала норми, а визначаються лише ладанною величиною кута  $\theta_\epsilon$  між відповідними вимірюваними (або заданими даними) векторами станів. При цьому RP, що обчислюються на основі вимірів (або заданими даними) вектора стану забрудненої атмосфери, дозволяють тільки візуально відображати спостережувану або модельовану динаміку вектора станів. Для ідентифікації небезпечних станів у динаміці необхідні спеціальні чисельні міри аналізу RP, які чутливі до особливостей динаміки станів забрудненої атмосфери. Показано, що з урахуванням небезпечного впливу на здоров'я людини в динаміці забрудненої атмосфери має місце РС.

Тому окреме наукове завдання полягало в розробці чисельних мір РС забрудненої атмосфери за результатами вимірів або змодельованих даних її

вектора станів. Вирішення даного окремого завдання може бути здійснено або на основі попереднього обчислення RP, або на основі обчислення ФН для відповідних векторів станів.

У випадку використання RP запропоновано чисельні міри PC визначати відповідно до отриманих вище виразів (4.19) та (4.20). Якщо застосувати ФН, то чисельні міри PC можна визначати, дотримуючись запропонованих виразів (4.23) та (4.24).

Використання чисельних мір PC (4.19) і (4.20) пов'язане з розглянутими обмеженнями, які мають місце при обчисленні відповідних RP. При цьому застосування чисельних мір PC (4.23) і (4.24), заснованих на ФН, не має обмежень, характерних для RP.

Чисельні міри PC використовуються для виявлення небезпечних станів забрудненої атмосфери, пов'язаних з відсутністю здатності атмосфери розсіювати забруднюючі речовини. Тому у PC відбувається збільшення концентрації шкідливих речовин в атмосфері. Якщо у моменти PC здійснювати випадкову додаткову інжекцію забруднюючих речовин, то це може привести до значного додаткового збільшення концентрації шкідливих речовин в атмосферному повітрі навіть понад ГДК. Це означає, що зростання концентрації шкідливих речовин в атмосферному повітрі буде призводити до збільшення ризику здоров'ю людини (населення), включаючи її смерть, котра є ознакою наявності НС.

З урахуванням ризику здоров'ю людини, включаючи її смерть, атмосферні забруднення проявляються у вигляді негайних токсичних ефектів та хронічної інтоксикації. Визначення ризику негайних токсичних ефектів від забрудненої атмосфери може здійснюватися за формулою (4.26). При цьому ризик хронічної інтоксикації від забрудненої атмосфери буде визначатися виразом (4.28).

З урахуванням вище викладеного шукана математична модель забрудненої атмосфери на території (поблизу) ОКІ, тобто населених місць, із урахуванням ризику здоров'ю людини [450] буде визначатися системою

залежностей (4.3), (4.17), (4.19), (4.20), (4.23), (4.24), (4.26) та (4.28) відповідно.

Таким чином, математична модель забрудненої атмосфери на території та поблизу ОКІ являє собою систему з восьми аналітичних залежностей. Перша (4.3) описує залежність  $RP$  від поточних вимірюваних або заданих станів забрудненої атмосфери, функціонала норми та порогу  $PC$ . Друга (4.17) описує залежність  $RP$ , самонастроювальних за поточними вимірами або заданих станів забрудненої атмосфери та заданій величині кута рекурентності між вимірюваними та заданими векторами станів. Третя (4.19) і четверта (4.20) – дозволяють визначити поточні та модельовані значення  $PC$  забрудненої атмосфери для різних способів поточного усереднення на основі  $RP$ , які описуються першою та другою залежностями. П'ята (4.23) і шоста (4.24) – дозволяють визначити поточні значення  $PC$  забрудненої атмосфери на основі використання ФН для відповідних векторів станів без обчислення  $RP$ . Сьома (4.26) і восьма (4.28) дозволяють визначити відповідно залежність ризику негайних токсичних ефектів і ризику хронічної інтоксикації від концентрацій для довільних небезпечних речовин, що забруднюють атмосферне повітря на території або поблизу ОКІ.

#### **4.2 Розробка управляючого алгоритму інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури**

Управляючий алгоритм інженерно-технічного методу (ІТМ) попередження НС техногенного характеру, обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) ОКІ [411] реалізує розроблену математичну модель забрудненої атмосфери населених місць. Його схема представлена на рис. 4.10.



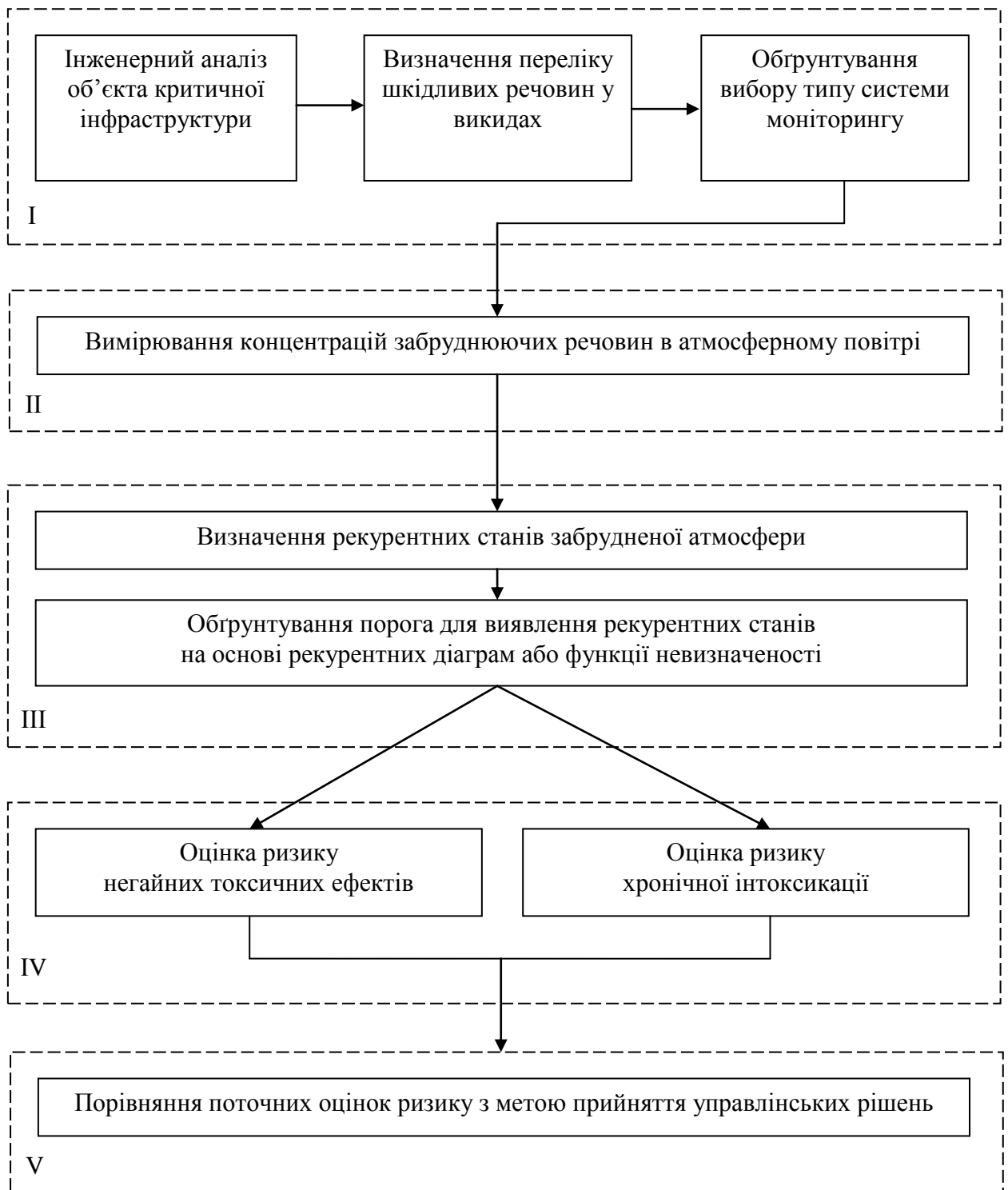


Рис. 4.10 – Управляючий алгоритм інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури

Алгоритм ІТМ складається з дев'яти послідовних блоків, розміщених на п'яти рівнях ієрархії та зв'язані прямими логічними зв'язками.

**На першому рівні ієрархії** розташовуються перший, другий і третій блоки. Даний рівень призначений для збору підготовчої інформації, необхідної для реалізації ІТМ на наступних рівнях ієрархії.

Перший блок включає інженерний аналіз ОКІ (технічної сфери), розташованих на заданій території, які є потенційними джерелами виникнення НС техногенного характеру внаслідок забруднення атмосферного повітря шкідливими речовинами.

Другий блок включає визначення переліку шкідливих речовин, які містяться у викидах цих ОКІ в атмосферне повітря, класу небезпеки, середньодобових і максимально разових ГДК для зазначених шкідливих речовин, що є потенційними джерелами ризиків здоров'ю людей або смерті індивідуумів.

Третій блок включає інженерно-технічне обґрунтування вибору типу системи моніторингу та сенсорів для виміру концентрацій атмосферних забруднювачів, визначених у другому блоці як шкідливих і небезпечних для здоров'я людей. У даному блоці обґрунтовуються також технічні засоби та методики здійснення вимірів концентрації атмосферних забруднювачів. Аналізується реалізована точність обраних вимірювальних засобів і величина методичної похибки вимірів концентрації забруднюючих речовин.

**На другому рівні ієрархії** виконуються технічні виміри концентрації для заданих атмосферних забруднювачів ОКІ. Даний рівень управляючого алгоритму ІТМ реалізується в четвертому блоці.

Блок включає виконання технічних вимірів концентрації забруднюючих речовин в атмосферному повітрі за нормативною програмою (програмами) відбору проб у дискретні моменти часу на стаціонарному або рухомому пості (засобі) контролю. За отриманими результатами вимірів обчислюються РР динаміки вимірюваних станів забрудненої атмосфери при

заданих апріорних даних. У випадку відсутності апріорних даних (наявність апріорної невизначеності) реалізується самонастроювальний за вимірами спосіб обчислення РР.

**На третьому рівні ієрархії** виконується інженерно-технічне використання запропонованої математичної моделі в частині визначення РС забрудненої атмосфери та їхньої тимчасової локалізації залежно від заданого обсягу апріорних відомостей або на основі РРчи на основі ФН. Даний рівень управляючого алгоритму реалізується в п'ятому та шостому блоках.

П'ятий блок полягає в інженерно-технічній реалізації запропонованої математичної моделі в частині визначення РС забрудненої атмосфери за результатами обчислення поточних РР, обчислених у четвертому блоці. У випадку апріорної невизначеності визначення РС забрудненої атмосфери здійснюється на основі поточної ФН для різних значень масштабу часу  $k$  і затримки  $\tau$  у реальному часі вимірювання концентрації забруднюючих речовин.

Шостий блок включає інженерно-технічне обґрунтування порогу для виявлення РС на основі РР або ФН. Для підвищення вірогідності виявлення РС забрудненої атмосфери можливе використання трьох порогів при виявленні РС на основі запропонованих РР без самонастроювання, на основі самонастроювальних РР і на основі ФН. В останньому випадку виявлення РС здійснюється в блоці на основі логічної обробки первинних результатів виявлення РС. При цьому вибором величини порогу для виявлення РС забрудненої атмосфери можна реалізувати різні рівні попередження НС і відповідні управлінські рішення, направлені, наприклад, на зниження поточних параметрів викидів шкідливих речовин ОКІ з метою недопущення виникнення НС внаслідок атмосферних забруднень чи їх пом'якшення.

**На четвертому рівні ієрархії** по даним вимірювання концентрацій забруднюючих речовин оцінюються ризики здоров'ю населення, які спричиняються забрудненою атмосферою. Даний рівень управляючого алгоритму реалізується в сьомому та восьмому блоках.

У сьомому блоці оцінюється ризик негайних токсичних ефектів для поточних концентрацій заданих небезпечних речовин, що забруднюють атмосферне повітря.

У восьмому блоці оцінюється ризик хронічної інтоксикації для поточних концентрацій заданих небезпечних речовин, що забруднюють атмосферне повітря.

**На п'ятому рівні ієрархії** за поточними оцінками ризику негайних токсичних ефектів і хронічної інтоксикації відповідно до прийнятих критеріїв індивідуального ризику, пов'язаного зі смертю індивідуума, визначаються ступінь допустимості отриманих оцінок ризику для кожного з вимірюваних забруднювачів атмосферного повітря. Даний рівень управляючого алгоритму реалізується в дев'ятому блоці.

Дев'ятий блок призначений для порівняння поточних оцінок ризику негайних токсичних ефектів і хронічної інтоксикації відповідно до прийнятих критеріїв індивідуального ризику з метою прийняття управлінських рішень, спрямованих на зниження ризику здоров'ю населення від поточних атмосферних забруднень. У даному блоці за результатами виявлення РС забрудненої атмосфери на третьому рівні ієрархії уточнюються причини перевищення поточними оцінками ризиків відповідних рівнів індивідуального ризику, а також здійснюється короткостроковий прогноз РС забрудненої атмосфери для прийняття превентивних заходів, з метою попередження НС внаслідок наявності в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) ОКІ.

Таким чином, управляючий алгоритм ІТМ попередження НС техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (або поблизу) ОКІ реалізує розроблену математичну модель стану забрудненої атмосфери з урахуванням ризику здоров'ю людей та складається з дев'яти блоків, які розміщені на п'яти рівнях ієрархії та пов'язані прямими логічними зв'язками.

### **4.3 Опис процедури реалізації інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури**

ІТМ попередження НС техногенного характеру, обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) ОКІ [451], призначений для попередження виникнення небезпечних станів забрудненої атмосфери та величини ризику здоров'ю людей за критерієм індивідуального ризику.

Застосування ІТМ попередження НС техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) ОКІ [411] передбачає виконання наступних восьми процедур:

1) обґрунтування та визначення вихідних (вхідних) даних про техногенні ОКІ та небезпечні шкідливі речовини, що викидаються зазначеними ОКІ в атмосферне повітря;

2) інженерно-технічне обґрунтування системи моніторингу атмосферних забруднень, засобів і сенсорів для вимірювання концентрації шкідливих речовин в атмосферному повітрі, а також методичного та метрологічного забезпечення вимірів;

3) технічний вимір концентрації забруднюючих речовин в атмосферному повітрі та обчислення поточних РР, як при наявності повної апріорної інформації, так і наявності апріорної невизначеності;

4) інженерно-технічна реалізація розробленої математичної моделі забрудненої атмосфери на території (поблизу) ОКІ у частині визначення РС забрудненої атмосфери на основі поточних РР та ФН для вимірюваних концентрацій забруднюючих речовин;

5) інженерно-технічне обґрунтування порогів для виявлення з необхідною вірогідністю РС забрудненої атмосфери, а також уточнення ГДК для заданих забруднювачів атмосфери;

б) виявлення моментів перевищення поточними значеннями РС відповідних порогів з метою надійного виявлення РС і попередження НС техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) ОКІ;

7) оцінка ризиків негайних токсичних ефектів і хронічної інтоксикації для населення, які спричиняються забрудненою атмосферою та заданими вимірами концентрацій забруднюючих речовин;

8) обґрунтування відповідних управлінських рішень, спрямованих на зниження ризику здоров'ю людей від забруднення атмосфери та попередження НС техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) ОКІ, шляхом зниження або недопущення викидів інжекцій шкідливих речовин в атмосферне повітря в моменти РС забрудненої атмосфери.

Основні результати експериментальної перевірки запропонованого методу наведені в роботах [410–412, 419, 423, 426, 432, 440, 450–452].

Таким чином, ІТМ попередження НС техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) ОКІ, призначений для попередження ризику здоров'ю людей понад величини допустимого індивідуального ризику. Застосування даного методу попередження НС передбачає виконання восьми процедур, пов'язаних з визначенням вихідних даних про техногенні ОКІ та небезпечні шкідливі речовини, що викидаються в атмосферне повітря, інженерно-технічним обґрунтуванням системи моніторингу атмосферних забруднень і метрологічного забезпечення, технічним вимірюванням і обчисленням поточних РР. Інженерно-технічним використанням запропонованої математичної моделі забрудненої атмосфери на території (поблизу) ОКІ. Інженерно-технічним обґрунтуванням порогів виявлення РС забрудненої

атмосфери, виявленням моментів перевищення поточними РС порогів з метою виявлення РС та попередження НС техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) ОКІ. Оцінкою ризиків негайних токсичних ефектів і хронічної інтоксикації населення, які спричиняються забрудненнями атмосферного повітря. Обґрунтуванням управлінських рішень зниження ризику здоров'ю людей від забруднення атмосфери та попередження НС техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) ОКІ, шляхом зниження або недопущення локальних інжекцій шкідливих речовин в атмосферне повітря в моменти РС забрудненої атмосфери.

#### **4.4 Розробка променевих комунікативних моделей бездротового середовища в надзвичайних ситуаціях техногенного характеру унаслідок наявності в атмосферному повітрі шкідливих речовин**

У рамках вирішення науково-технічної задачі щодо попередження НС за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища на території та поблизу ОКІ важливим є розвиток мережі моніторингу атмосферного повітря на основі інтелектуальних сенсорів, розташовуваних на безпілотних рухомих платформах (БПРП) різного базування. При цьому важливим є вивчення комунікативних можливостей бездротового середовища (БС) із променевим поширенням радіохвиль. Існуюча складність і різноманіття реальних БС з точки зору реалізації запропонованого ІТМ роблять особливо актуальною розробку комунікативних моделей БС для мереж моніторингу повітря на основі БПРП різного базування.

Аналізу сучасних досліджень [453–462] свідчить про те, що до теперішнього часу проведена значна робота в області поліпшення комунікації між мобільними вузлами та отримані оригінальні результати. Однак більша частина відомих результатів стосується модернізації

технологій каналного та мережного рівнів. Фізичний рівень практично не розглядається. На фізичному рівні відмічається тільки про можливість використання направлених антен для забезпечення надійності комунікації із БПЛА.

Комунікативні моделі БС для мереж моніторингу повітряного середовища на основі БПРП не розглядаються та не досліджуються. Вплив дестабілізуючих факторів і перешкод у БС та їх вплив на комунікативні можливості середовища на фізичному рівні з урахуванням направлених антен не розглядаються. При цьому варто відмітити, що саме на фізичному рівні діють всі дестабілізуючі фактори, які породжують проблему, пов'язану з надійністю комунікації, у тому числі, обумовлену мобільністю БПРП. Тому важливим щодо успішної реалізації запропонованого ІТМ є розробка комунікативних моделей БС.

#### **4.4.1 Двох точкова променева комунікативна модель бездротового середовища**

Розробка та дослідження моделей поширення радіохвиль і характеристик антен є ключовими факторами, що впливають на якість бездротової комунікації із БПРП. Точний математичний опис будь-якого реального каналу комунікації із БПРП звичайно є складним та важким завданням з точки зору його реалізації. Найпоширенішою є двох точкове середовище між передавачем БПРП і приймачем пункту управління та у зворотному напрямку. При побудові його моделі варто враховувати багатопроменевий характер поширення радіохвиль у БС. Для мереж моніторингу забруднення повітряного середовища на основі БПРП багатопроменеве поширення часто має яскраво виражені локальні особливості, обумовлені складною геометрією розміщення конструкцій будівель та споруд ОКІ, які суттєво відбивають та розсіюють радіохвилі.

Відомі моделі обмежуються в основному загасанням і затримкою радіохвиль у БС для різної статистики трас щодо прямого поширення або для



випадку істотного багатопроменевого поширення. В умовах дистанційного використання запропонованого ІТМ попередження НС внаслідок забруднення повітря комунікаційні можливості БС істотно залежать від просторових характеристик променів щодо поширення радіохвиль. Для таких умов виявляються справедливими інші наближення, засновані на однократному розсіюванні та першому наближенні багатократного розсіювання.

Нехай просторові характеристики випромінюваного та прийомного променів у БС описуються відповідними функціями  $F_t(\theta, \Delta\theta)$  і  $Fr(\theta, \Delta\theta)$ , де  $\theta$  – визначає напрямок випромінювання та прийому променя у відповідних точках БС, а  $\Delta\theta$  – ширину випромінюваного та прийомного променів. Будемо вважати, що БС характеризується малим числом можливих променів випромінювання та прийому радіохвиль у заданих точках середовища. Така ситуація звичайно має місце у важких комунікаційних умовах, які характеризуються наявністю в БС великої кількості значних конструкцій, що затіняють, відбивають та розсіюють радіохвилі. Нехай кожен із променів у точці випромінювання характеризується напрямком  $utd$ , а в точці прийому напрямком  $urd$ . Загасання та розсіювання радіохвиль у кожному промені будемо описувати в загальному випадку довільною функцією  $a(utd, urd, t)$ , яка залежить від моменту часу  $t$ . Конкретний вид функції  $a(utd, urd, t)$  визначає результуючу амплітуду розсіювання радіохвиль для кожного променя БС із урахуванням загасання уздовж траси променя, а також індивідуальних особливостей неоднорідності розсіювання у середовищі.

Із урахуванням уведених вище параметрів, двох точкова однопроменева комунікативна модель БС для довільних напрямків  $\theta_t$  випромінювання та  $\theta_r$  прийому буде описуватися у вигляді:

$$H_{11}(\theta_t, \theta_r, t) = F_t(\theta_t - utd, \Delta\theta) Fr(\theta_r - urd, \Delta\theta) a(utd, urd, t). \quad (4.29)$$

Якщо БС включає  $L$  променів, то двох точкова комунікативна модель для аналогічних умов буде описуватися у відповідному вигляді:

$$H_{11L}(\theta_t, \theta_r, t) = \sum_{k=0}^{L-1} Ft_k(\theta_t - utd_k, \Delta\theta_k) Fr_k(\theta_r - urd_k, \Delta\theta_k) a_k(utd_k, urd_k, t), \quad (4.30)$$

де  $Ft_k(\theta_t - utd_k, \Delta\theta_k)$  – просторова характеристика  $k$ -го променя випромінювання;  $Fr_k(\theta_r - urd_k, \Delta\theta_k)$  – просторова характеристика  $k$ -го прийомного променя;  $utd_k, \Delta\theta_k$  – напрямок  $k$ -го випромінюючого променя і його ширина;  $urd_k, \Delta\theta_k$  – напрямок  $k$ -го прийомного променя і його ширина;  $a_k(utd_k, urd_k, t)$  – функція загасання та розсіювання радіохвиль щодо  $k$ -го променя.

Моделі (4.29) і (4.30) дозволяють описувати та досліджувати комунікативні властивості БС при різних довільних напрямках  $\theta_t$  випромінювання та  $\theta_r$  прийому без урахування направлених характеристик передавальної та прийомної антен, які розташовуються у відповідних точках випромінювання та прийому в БС. Нехай направлені характеристики передавальної та прийомної антен описуються відповідними функціями  $At(\beta_t, \Delta\gamma_t)$  та  $Ar(\beta_r, \Delta\gamma_r)$ , де  $\beta_t, \beta_r$  – визначають напрямки головного максимуму антен, а  $\Delta\gamma_t, \Delta\gamma_r$  – ширина характеристик направленості антен на рівні половинної потужності.

Тоді з урахуванням направленої передавальної та прийомної антен, які розташовуються у розглянутих точках БС, комунікативні властивості середовища, дотримуючись моделей (4.29) і (4.30), будуть описуватися відповідно

$$AH_{11}(\theta_t, \theta_r, t) = At(\theta_t - \beta_t, \Delta\gamma_t) H_{11}(\theta_t, \theta_r, t) Ar(\theta_r - \beta_r, \Delta\gamma_r), \quad (4.31)$$

$$AH_{11L}(\theta_t, \theta_r, t) = At(\theta_t - \beta_t, \Delta\gamma_t) H_{11L}(\theta_t, \theta_r, t) Ar(\theta_r - \beta_r, \Delta\gamma_r). \quad (4.32)$$

Моделі (4.31) і (4.32) дозволяють описувати та досліджувати комунікативні властивості БС у довільних напрямках  $\theta_t$  випромінювання та  $\theta_r$  прийому з урахуванням різних напрямків випромінювання та прийому, а також ширини характеристик направленості передавальної та прийомної антен, розташованих у відповідних точках середовища.

#### 4.4.2 Багато точкова променева комунікативна модель бездротового середовища

У ряді випадків для надійної комунікації в дистанційних системах моніторингу повітряного забруднення із використанням БПРП кращим виявляється використання на передавальній та прийомній сторонах декількох антен. Для опису та дослідження комунікативних властивостей БС у цьому випадку необхідна багато точкова променева комунікативна модель. Така модель повинна включати дві і більше точок випромінювання та дві і більше точок прийому.

Для спрощення подальшого розгляду обмежимося випадком двох точок на передавальній та приймальній сторонах. Нехай кожна точка на передавальній стороні пов'язана з кожною точкою на прийомній стороні обмеженим числом променів із заданими параметрами, обумовленими конкретними умовами комунікації при моніторингу забруднення атмосферного повітряного середовища. Тоді в розглянутому випадку з урахуванням моделі (4.30) багато точкова променева комунікативна модель БС буде визначатися матрицею загального виду:

$$H_{2 \times 2}(\theta_t, \theta_r, t) = \begin{bmatrix} H_{11L11}(\theta_t, \theta_r, t) & H_{11L12}(\theta_t, \theta_r, t) \\ H_{11L21}(\theta_t, \theta_r, t) & H_{11L22}(\theta_t, \theta_r, t) \end{bmatrix}, \quad (4.33)$$

де  $H_{11Lij}(\theta_t, \theta_r, t) = \sum_{k=0}^{L_{ij}-1} F t_k^{ij}(\theta_t - utd_k^{ij}, \Delta\theta_k^{ij}) Fr_k^{ij}(\theta_r - urd_k^{ij}, \Delta\theta_k^{ij}) a_k^{ij}(utd_k^{ij}, urd_k^{ij}, t)$ ,  
 $i, j=1, 2$ .

Функція  $H_{11Lij}(\theta t, \theta r, t)$  у моделі (4.33) визначає багатопроменеву комунікативну модель БС між  $i$ -ою точкою на передавальній стороні та  $j$ -ою точкою на прийомній стороні, що визначається параметрами  $Ft_k^{ij}(\theta t - utd_k^{ij}, \Delta\theta_k^{ij})$  та  $Fr_k^{ij}(\theta r - urd_k^{ij}, \Delta\theta_k^{ij})$  випромінюваних і прийнятих променів, а також функцій  $a_k^{ij}(utd_k^{ij}, urd_k^{ij}, t)$  загасання та розсіювання радіохвиль у кожному із променів. У випадку довільного числа точок випромінювання на передавальній і прийомній сторонах модель БС буде визначатися розширеною матрицею (4.33) відповідного розміру. При цьому число рядків матриці буде визначатися кількістю точок випромінювання, а число стовпців – кількістю точок прийому в БС.

Поточні комунікативні можливості БС у випадку моделі (4.33) будуть характеризуватися нормою Фробеніуса матриці  $H_{2 \times 2}(\theta t, \theta r, t)$

$$N_F(\theta t, \theta r, t) = \sqrt{\sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 |H_{2 \times 2}(\theta t, \theta r, t)_{i,j}|^2}. \quad (4.34)$$

Перевагами моделі (4.34) є її інваріантність щодо координат розміщення точок випромінювання та прийому в БС. Це означає, що для комунікації можна використовувати зазначені точки для різних типів антен. Наприклад, у випадку антенних решіток з ізотропними характеристиками направленості елементів на обох сторонах БС комунікативні можливості будуть визначатися

$$AR_{2 \times 2}(\theta t, \theta r, t) = |\alpha r(\theta r)^* H_{2 \times 2}(\theta t, \theta r, t) \alpha t(\theta t)|, \quad (4.35)$$

де  $\alpha r(\theta r) = [1/\sqrt{2} \exp\{-j2\pi d_r \sin(\theta r)/\lambda\sqrt{2}\}]^T$ ,  $\alpha t(\theta t) = [1/\sqrt{2} \exp\{-j2\pi d_t \sin(\theta t)/\lambda\sqrt{2}\}]^T$  – вектори фазових зсувів в елементах антенних решіток на передавальній і прийомній сторонах, а величини  $d_r$ ,  $d_t$  та  $\lambda$  визначають відстань між елементами передавальної та прийомної антенними решітками, а також

робочу довжину використовуваних радіохвиль. Якщо застосовуються антенні решітки з направленими характеристиками елементів, то комунікативні можливості такої системи з урахуванням БС будуть визначатися

$$KN_{2 \times 2}(\theta_t, \theta_r, t) = \left| \mathbf{v}_r(\theta_r, \text{urd})^* \mathbf{H}_{2 \times 2}(\theta_t, \theta_r, t) \mathbf{v}_t(\theta_t, \text{urd}) \right|, \quad (4.36)$$

де

$\mathbf{v}_r(\theta_r, \text{urd}) = \left[ 1/\sqrt{2} \exp\{-j2\pi d_r \sin(\text{urd})/\lambda\sqrt{2}\} \right]^T f_r(\theta_r - \text{urd}, \Delta\theta_r)$  та  $\mathbf{v}_t(\theta_t, \text{utd}) = \left[ 1/\sqrt{2} \exp\{-j2\pi d_t \sin(\text{utd})/\lambda\sqrt{2}\} \right]^T f_t(\theta_t - \text{utd}, \Delta\theta_t)$  – вектори фазових зсувів в елементах антенних решітках на передавальній і прийомній сторонах з урахуванням характеристик направленості антенних елементів. При цьому характеристики направленості антенних елементів для передавальної та прийомної антенних решіток визначаються функціями  $f_t(\theta_t - \text{utd}, \Delta\theta_t)$  та  $f_r(\theta_r - \text{urd}, \Delta\theta_r)$  відповідно, де  $\text{utd}$  та  $\text{urd}$  визначають напрями для заданої траси комунікації, а  $\Delta\theta_t$  і  $\Delta\theta_r$  – ширину характеристик направленості елементів для передавальної та прийомної антенних решіток.

Таким чином, розроблені двох точкові комунікативні моделі БС із однопроменевим і багатопроменевим поширенням радіохвиль в умовах наявності в середовищі конструкцій, що суттєво затіняють та розсіюють радіохвилі. Запропоновані моделі дозволяють створювати різні типи частих двох точкових комунікативних моделей БС із урахуванням конкретної складної геометрії конструкцій у середовищі що затіняють та розсіюють. При цьому практичне використання розроблених моделей обмежується двома довільними точками (точкою випромінювання та точкою прийому) середовища з урахуванням розміщення в цих точках направлених передавальної та прийомної антен.

Для дослідження різних технологій забезпечення комунікацій при дистанційної реалізації запропонованого ІТМ попередження НС на основі БППІ з використанням безлічі антен розроблені багато точкові комунікативні

моделі БС із однопроменевим та багатопроменевим поширенням радіохвиль від кожної точки випромінювання до кожної точки прийому з урахуванням конструкцій у середовищі що затіняють та розсіюють. Розроблені багато точкові моделі дозволяють створювати конкретні моделі БС для фізичного рівня у випадку застосування технологій комунікації з безліччю антен довільної конфігурації на передавальній та прийомній сторонах.

На основі розроблених комунікативних моделей з'являється можливість поглибленого вивчення можливостей БС на фізичному рівні для розробки надійної та стабільної архітектури комунікацій в дистанційних системах моніторингу забруднення атмосферного повітря що засновані на реалізації запропонованого ІТМ з урахуванням використання БПРП. При цьому дослідження моделей поширення радіохвиль та структури прийомних і передавальних антен є ключовими факторами, що впливають на комунікативні можливості БС фізичного рівня в дистанційних системах контролю забруднення атмосферного повітря.

#### **Висновки розділу4**

1. Для попередження НС техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) ОКІ, вперше запропоновано розглядати забруднену атмосферу у вигляді деякої єдиної складної динамічної системи забруднення та розсіювання шкідливих речовин. При цьому стан такої системи в довільний фіксований момент часу визначається вектором концентрацій забруднюючих речовин з урахуванням всіх відомих і невідомих параметрів щодо викидів забруднювачів, а також поточних метеорологічних та інших особливостей атмосфери.

2. Встановлено, що основною ознакою можливого виникнення НС обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) ОКІ, є локальна в часі РС щодо забрудненої атмосфери та

одночасна здійснювана в цей час інжекція шкідливих речовин в атмосферне повітря. Важливим при цьому для попередження НС є не тільки РС, а і поточний ризик здоров'ю людини, що спричиняється забрудненою атмосферою.

3. Встановлено, що діючі нормативні ознаки НС внаслідок наявності в атмосферному повітрі забруднюючих речовин, понад ГДК, відповідають близькій до одиниці ймовірності смерті людини від впливу забрудненої атмосфери. На основі цього зроблений висновок про те, що попередження виникнення НС необхідно здійснювати для забрудненої атмосфери при незначних перевищеннях забруднюючих речовин їх ГДК. При цьому припустима величина перевищення ГДК не повинна перевищувати верхню границю проміжної зони допустимого ризику здоров'ю людини.

4. Математична модель забрудненої атмосфери на території (поблизу) ОКІ із урахуванням ризику здоров'ю людини являє собою систему з восьми аналітичних залежностей. Перша описує залежність  $RP$  від поточних вимірюваних станів забрудненої атмосфери, функціонала норми та порога РС. Друга описує залежність  $RP$ , самонастроювальних за поточними вимірами станів забрудненої атмосфери та заданій величині кута рекурентності між вимірюваними векторами станів. Третя і четверта – дозволяють визначати поточні значення РС забрудненої атмосфери для різних способів поточного усереднення на основі  $RP$ , описуваних першою та другою залежностями. П'ята і шоста – дозволяють визначати поточні значення РС забрудненої атмосфери на основі використання ФН для відповідних векторів вимірюваних станів без обчислення  $RP$ . Сьома і восьма дозволяють визначати відповідно залежність ризику негайних токсичних ефектів і ризику хронічної інтоксикації від концентрацій для довільних небезпечних речовин, що забруднюють атмосферне повітря.

5. Управляючий алгоритм інженерно-технічного методу попередження НС техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) ОКІ

реалізує математичну модель стану забрудненої атмосфери, а також оцінки ризику здоров'ю людей складається з дев'яти блоків, які розміщені на п'яти рівнях ієрархії та пов'язані прямими логічними зв'язками.

6. Інженерно-технічний метод попередження НС техногенного характеру, обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) ОКІ, призначений для попередження ризику здоров'ю людей понад величини прийнятного допустимого індивідуального ризику для людини. Застосування методу передбачає виконання восьми процедур, пов'язаних з визначенням вихідних даних про ОКІ та небезпечні шкідливі речовини, що викидаються в атмосферне повітря, інженерно-технічним обґрунтуванням системи моніторингу атмосферних забруднень і метрологічного забезпечення, технічним вимірюванням і обчисленням поточних РР. Інженерно-технічним використанням математичної моделі забрудненої атмосфери на території (поблизу) ОКІ з метою виявлення РС та попередження НС техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) ОКІ. Оцінкою ризиків негайних токсичних ефектів та хронічної інтоксикації для людини, які спричиняються забрудненою атмосферою. Обґрунтуванням управлінських рішень щодо зниження ризику здоров'ю людини внаслідок наявності в атмосферному повітрі шкідливих речовин, понад ГДК, шляхом виключення локальних викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря в моменти РС забрудненої атмосфери.

7. Розроблені комунікативні моделі дозволяють досліджувати комутаційні можливості БС на фізичному рівні для розробки надійної та стабільної інформаційної архітектури щодо дистанційної реалізації запропонованого інженерно-технічного методу попередження НС техногенного характеру, обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) ОКІ, на основі використання БПРП. Відмічається, що дослідження моделей поширення радіохвиль та



структури прийомних і передавальних антен є ключовими факторами, що впливають на комунікативні можливості щодо дистанційної реалізації запропонованого інженерно-технічного методу попередження НС на основі використання БПРП.

## РОЗДІЛ 5

### ПЕРЕВІРКА РОЗРОБЛЕНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИХ МЕТОДІВ

Перевірка розроблених математичних моделей та інженерно-технічних методів попередження НС техногенного характеру на ОКІ за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища здійснювалася в три етапи.

На першому етапі виконувалася перевірка розроблених мір кореляцій та взаємних кореляцій на інтервалі щодо флуктуацій основних небезпечних факторів повітряного середовища при ранньому загорянні, математичної моделі поточних показників фрактальності щодо вектору прирощення станів повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях ОКІ та інженерно-технічного методу попередження НС техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища приміщень ОКІ, розглянутих у розділі 3. Перевірка здійснювалася з використанням лабораторного комплексу та експериментальних вимірів середньої об'ємної температури, щільності диму та концентрації чадного газу повітряного середовища в спеціальній камері при підпалі та горінні типових тестових матеріалів [399].

На другому етапі перевірка виконувалася для математичної моделі, що визначається обчисленням  $RP$ , чисельними мірами динаміки  $PC$  забрудненого атмосферного повітря та відповідним ризиком здоров'ю людей, а також інженерно-технічного методу попередження НС техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) ОКІ, розглянутих у розділі 4. Перевірка здійснювалася на основі вимірів реальних концентрації забруднюючих

речовин в атмосферному повітрі в умовах типової міської конфігурації із середнім рівнем індексу забруднення атмосфери та використанням маршрутних постів контролю [411].

На третьому етапі виконувалась валідація запропонованих у розділі 4 двох точкової та багато точкової променевих комунікативних моделей бездротового середовища для тестових умов НС [463].

### **5.1 Експериментальна перевірка розробленої математичної моделі та інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища приміщень об'єктів критичної інфраструктури**

Спочатку наведено опис лабораторного комплексу щодо експериментального дослідження особливостей динаміки стану небезпечних факторів повітряного середовища в негерметичному приміщенні при ранніх загоряннях типових матеріалів. Потім виконано експериментальну перевірку мір автокореляцій і взаємних кореляцій небезпечних факторів повітряного середовища при ранніх загоряннях тестових горючих матеріалів. Після чого здійснено експериментальну перевірку розробленої математичної моделі для поточних показників фрактальності вектору прирощень станів повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях ОКІ. Потім проведено оцінку достовірності запропонованого інженерно-технічного методу попередження НС техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища приміщень ОКІ [399] шляхом поточної кореляційної розмірності та РС щодо вектору прирощення станів повітряного середовища.

### **5.1.1 Опис лабораторного комплексу для експериментального дослідження особливостей динаміки стану небезпечних факторів повітряного середовища в негерметичному приміщенні при ранніх загоряннях**

Попередження НС внаслідок пожеж на ОКІ у значній мірі залежить від можливостей раннього виявлення загорянь у приміщеннях об'єкта. У загальному випадку загоряння в приміщеннях об'єктів характеризуються масовими та тепловими процесами обміну з газовим середовищем, які мають складний характер та розвиваються в часі і просторі. Такі процеси є взаємозалежними, їх інтенсивність та умови взаємодії визначаються безліччю факторів, багато з яких носять випадковий характер. При цьому кожне загоряння являє собою індивідуальну небезпечну ситуацію, обумовлену збігом відповідної сукупності випадкових подій. У зв'язку із цим точно визначити динаміку небезпечних факторів повітряного середовища в приміщеннях при загоряннях у всіх деталях не представляється можливим.

У лабораторному комплексі передбачалося, що параметри осередку загоряння в загальному випадку характеризуються деяким векторним процесом  $Y(t)$ , складовими якого є параметри температури, газоподібних продуктів горіння, диму, полум'я та ін. [393, 464]. У цьому випадку повітряне середовище є елементом, що перетворює вектор  $Y(t)$  у відповідний вектор  $z(t)$  небезпечних факторів повітряного середовища, складові якого, звичайно підлягають вимірюванню відповідними сенсорами з подальшою обробкою вимірюваної інформації. При цьому враховувалося, що в реальних умовах перетворення вектора  $Y(t)$  повітряним середовищем приміщень відбувається при дії різних випадкових впливів збурювання, що представляють фонові впливи [465]. З урахуванням цього дане перетворення можна описати узагальненим оператором  $C(*,t)$ , який залежить від часу та кожному вектору  $Y(t)$  ставить у відповідність вектор  $z(t)$ , що визначається

$$z(t) = C\{Y(t), n(t), t\}, \quad (5.1)$$

де  $n(t)$  – вектор фонових впливів у повітряному середовищі приміщень.

З урахуванням перетворення (5.1) структурно-фізична схема лабораторного комплексу може бути представлена у вигляді, показаному на рис. 5.1.

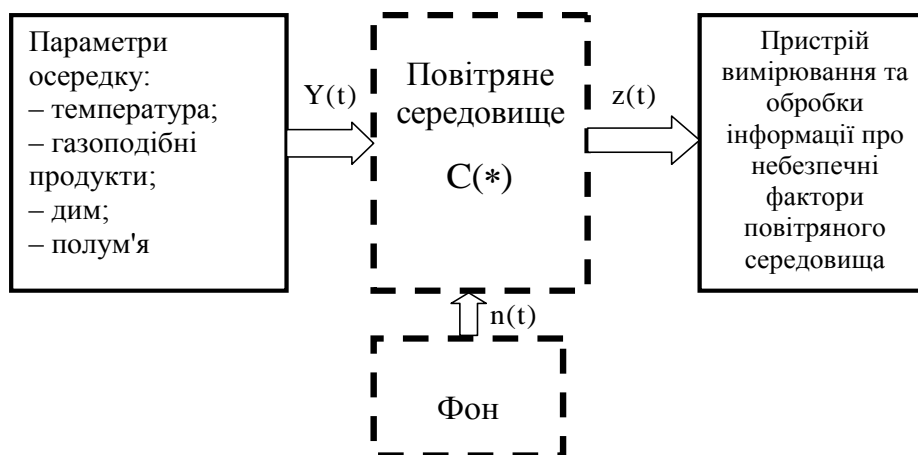


Рис. 5.1 – Структурно-фізична схема лабораторного комплексу

Повітряне середовище та фонові впливи в лабораторному комплексі обмежувалися розмірами випробувальної камери, обумовленими 1020мм x 840мм x 520мм. При цьому фонові впливи визначалися застосуванням негерметичної випробувальної камери [393]. У верхній частині камери розташовувалися вимірювальні сенсори для реєстрації небезпечних факторів повітряного середовища, обумовлених осередком загоряння [466]. В якості осередку загоряння в лабораторному комплексі розглядалися тестові горючі матеріали у вигляді спирту ( $C_2H_5OH$ ), тканини, паперу та деревини.

Площа осередку загоряння становила близько  $35\text{см}^2$ . Максимальна висота полум'я від осередку не перевищувала 200–230 мм (рис. 5.2). У ході експерименту здійснювався примусовий підпал матеріалів [467, 468] приблизно на 30-ій секунді загального спостереження. При цьому відповідні сенсори вимірювали середню об'ємну температуру повітряного середовища в камері, щільність диму та концентрацію CO [469].

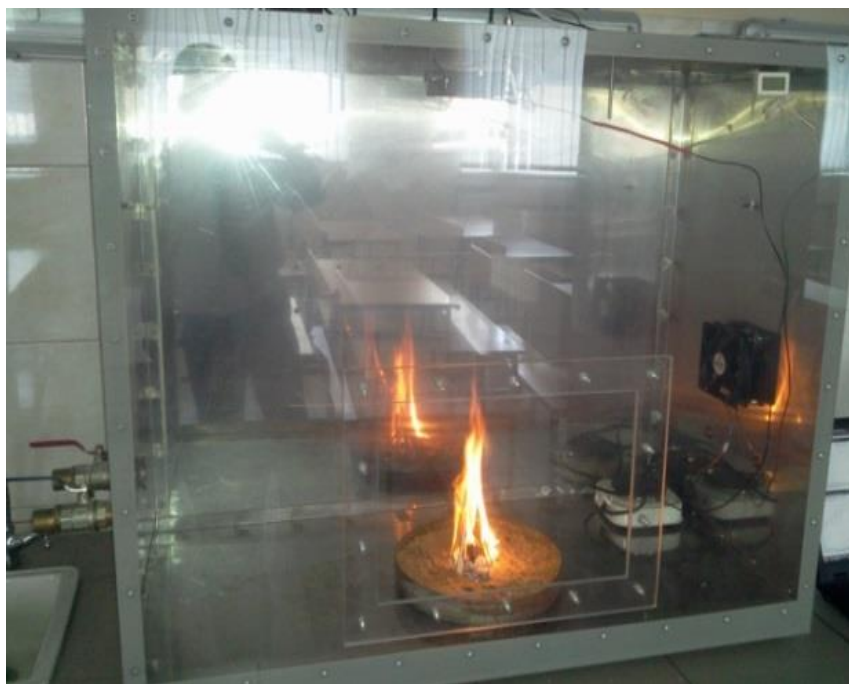


Рис. 5.2 – Зовнішній вигляд випробувальної камери та тестового осередку загоряння

На рис. 5.3 представлені результати експерименту для середньої об'ємної температури повітряного середовища у випробувальній камері лабораторного комплексу при загорянні різних типів горючого матеріалу.

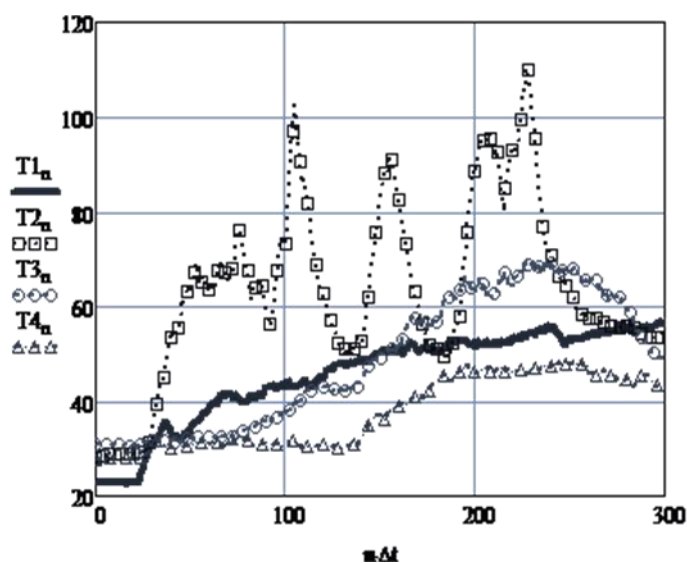


Рис. 5.3 – Середня об'ємна температура повітряного середовища у випробувальній камері лабораторного комплексу для різних типів матеріалів: T1 – спирт, T2 – папір, T3 – деревина, T4 – тканина

На рис. 5.4 та 5.5 представлені аналогічні залежності відповідно для щільності диму та концентрації CO у газовому середовищі випробувальній камері лабораторного комплексу.

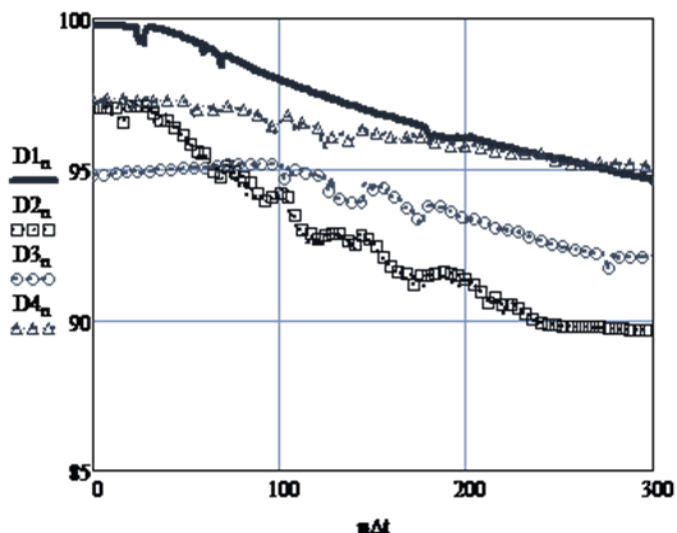


Рис. 5.4 – Щільність диму повітряного середовища в камері для різних типів матеріалів: D1 – спирт, D2 – папір, D3 – деревина, D4 – тканина

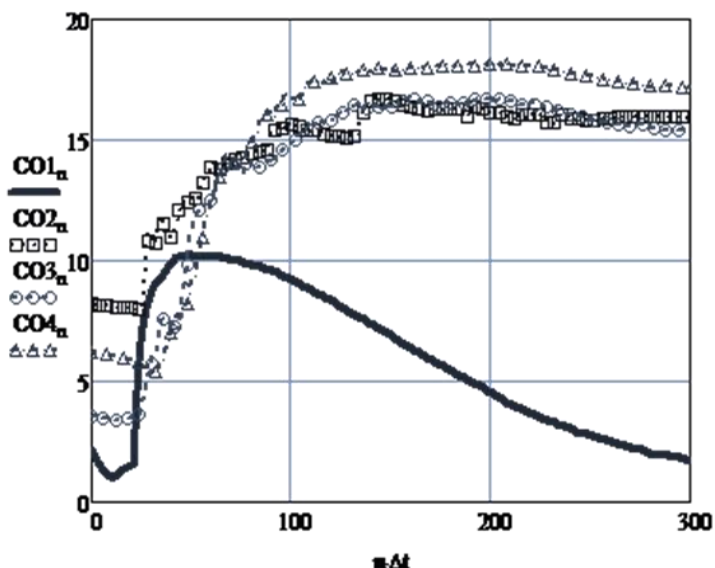


Рис. 5.5 – Концентрація CO у газовому середовищі камери для різних типів матеріалів: CO1 – спирт, CO2 – папір, CO3 – деревина, CO4 – тканина

Аналіз залежностей на рис. 5.3 – рис. 5.5 свідчить про те, що динаміка середньої об'ємної температури, щільності диму та концентрації CO повітряного середовища у випробувальній камері лабораторного комплексу

при підпалі тестових матеріалів не є детермінованою, а носить складний та нестаціонарний характер з явними ознаками наявності трендів та випадкових флуктуацій. При цьому у випадку загорянь тестових матеріалів стійкий стан розглянутих небезпечних факторів повітряного середовища у випробувальній камері лабораторного комплексу порушується, що викликає зміну динаміки та флуктуацій її небезпечних факторів.

### **5.1.2 Експериментальна перевірка міри автокореляцій і взаємних кореляцій небезпечних факторів повітряного середовища при ранніх загоряннях у приміщеннях об'єктів**

Експериментально встановлено, що динаміка флуктуацій небезпечних факторів повітряного середовища у випробувальній камері лабораторного комплексу залежать від типу горючого матеріалу. У цьому зв'язку досліджувалися експериментально кореляційні та взаємні кореляційні функції флуктуацій небезпечних факторів повітряного середовища при загорянні різних тестових матеріалів у випробувальній камері комплексу.

Здійснювалася експериментальна перевірка міри автокореляцій і взаємних кореляцій флуктуацій небезпечних факторів повітряного середовища для різних лагів  $n$  [395]. При цьому для одержання статистично достовірної оцінки кореляції для розглянутих інтервалів аналізу кореляційні функції визначалася для лагів, що не перевищують 50. Експериментальні функції автокореляції флуктуацій середньої об'ємної температури, щільності диму та концентрації CO повітряного середовища в камері наведені на рис. 5.6–5.9.

На рис. 5.6–5.9 через  $KT_n$ ,  $KD_n$  і  $KCO_n$  позначені відповідно функції кореляції флуктуацій середньої об'ємної температури, щільності диму та концентрації CO, а через  $CDT_n$ ,  $CCOT_n$  і  $CCOD_n$  парні взаємні кореляційні функції флуктуацій середньої об'ємної температури та щільності диму, концентрації CO та середньої об'ємної температури, концентрації CO і щільності диму відповідно.



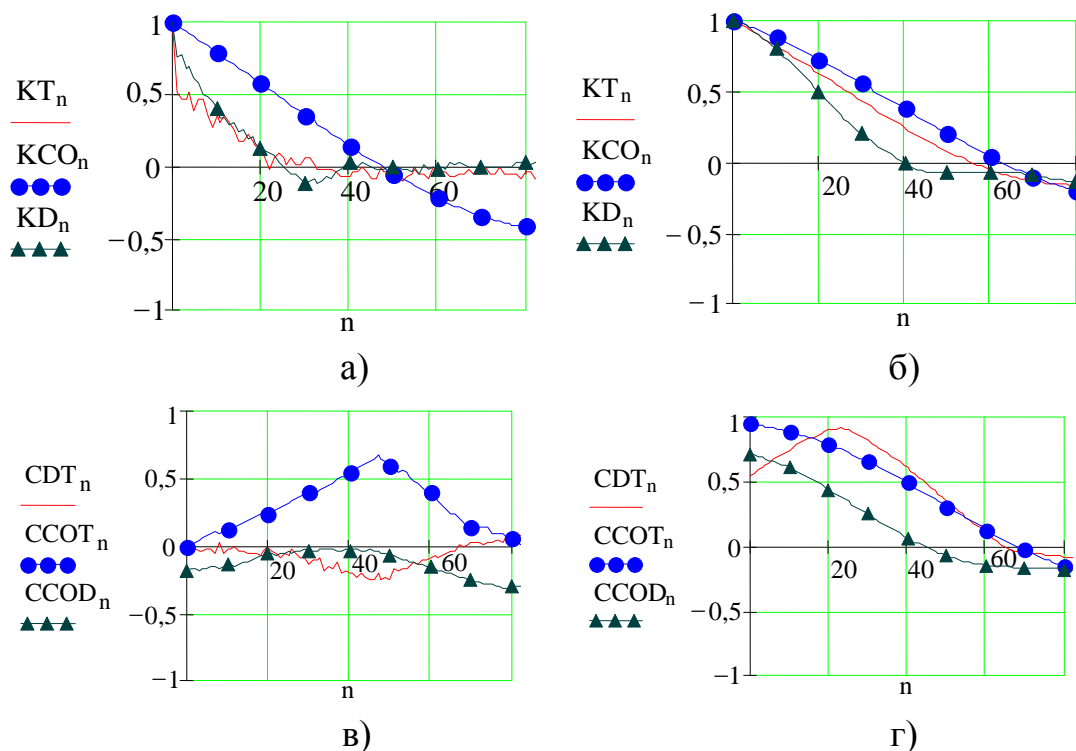


Рис. 5.6 – Кореляційні функції флуктуацій досліджуваних факторів повітряного середовища в камері для двох інтервалів аналізу: а, в – відсутності загоряння; б, г – наявності загоряння спирту в середині інтервалу

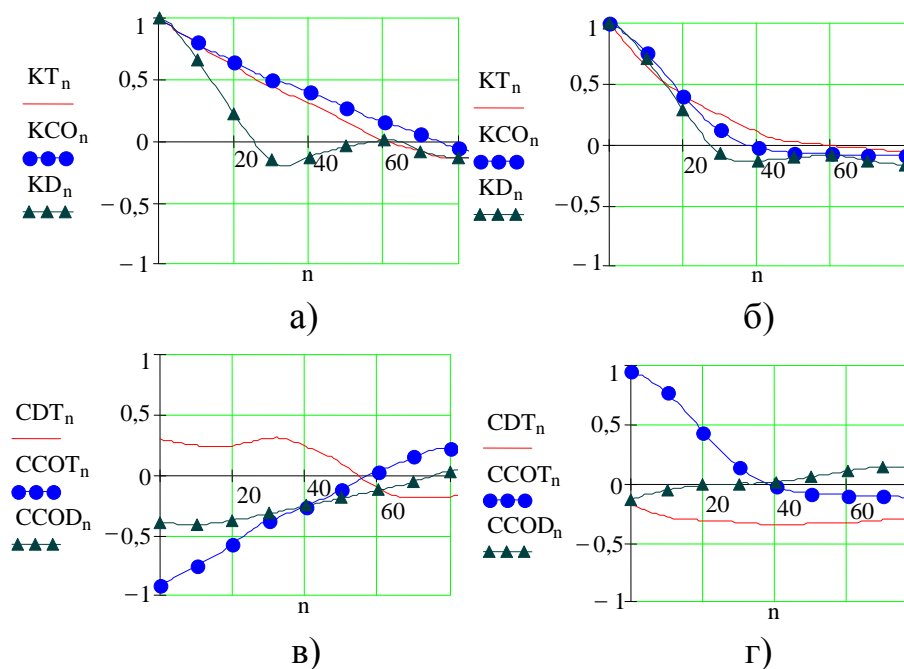


Рис. 5.7 – Кореляційні функції флуктуацій досліджуваних небезпечних факторів повітряного середовища в камері для двох інтервалів аналізу: а, в – відсутності загоряння; б, г – наявності загоряння паперу в середині інтервалу

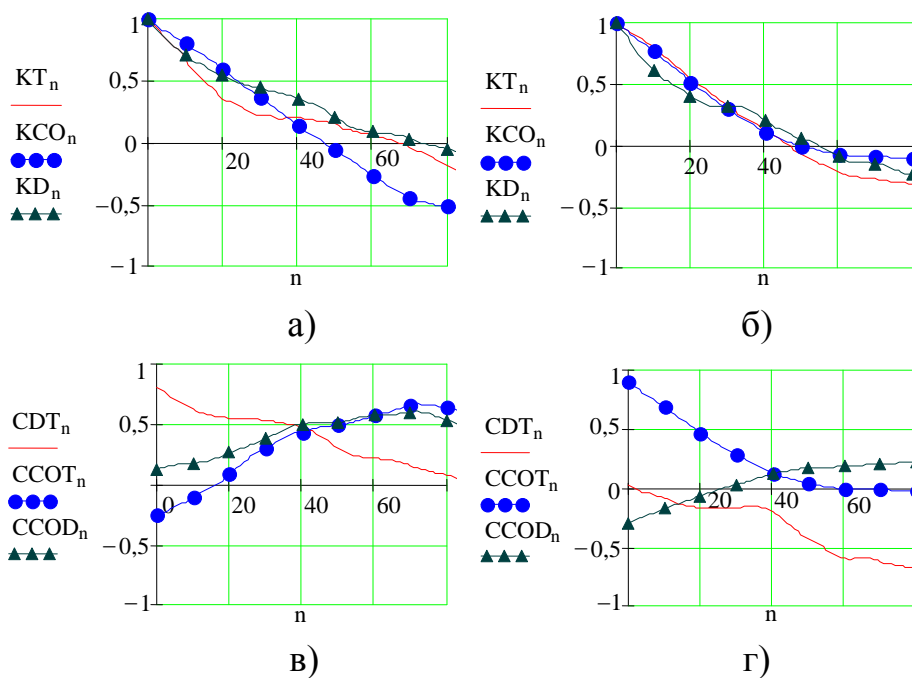


Рис. 5.8 – Кореляційні функції флуктуацій досліджуваних небезпечних факторів повітряного середовища в камері для двох інтервалів аналізу: а, в – відсутності загоряння; б, г – наявності загоряння деревини в середині інтервалу

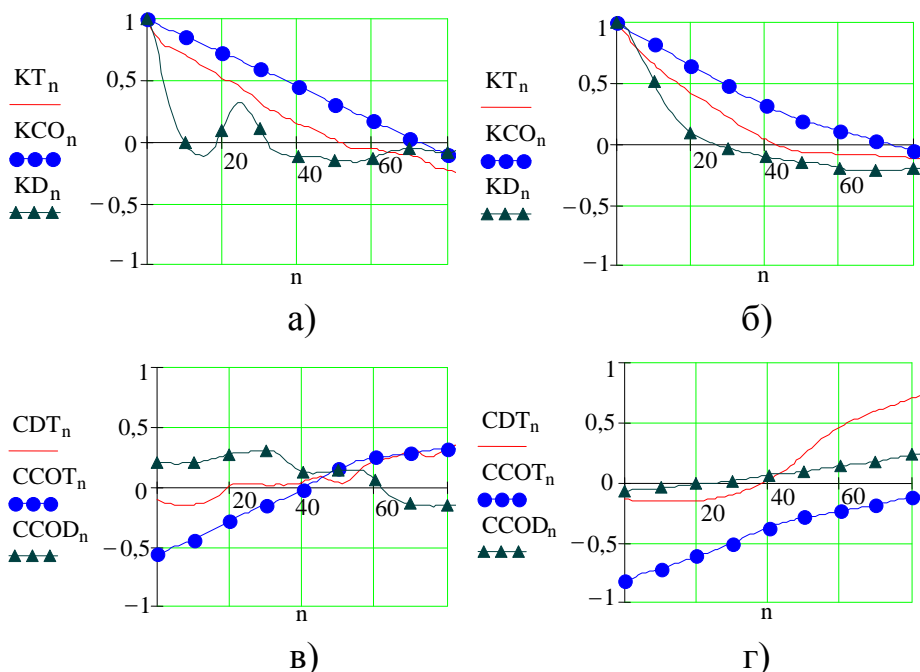


Рис. 5.9. – Кореляційні функції флуктуацій досліджуваних небезпечних факторів повітряного середовища в камері для двох інтервалів аналізу: а, в – відсутності загоряння; б, г – наявності загоряння тканини в середині інтервалу аналізу

Аналіз експериментальних залежностей на рис. 5.6–5.9 свідчить про те, що на інтервалі відсутності загорянь, функції кореляції флуктуацій досліджуваних небезпечних факторів повітряного середовища, виявляються приблизно схожими. Це підтверджує висновок про динамічну стійкість станів повітряного середовища. Ступінь взаємних кореляцій флуктуацій розглянутих небезпечних факторів повітряного середовища в середньому оцінюється як слабка або дуже слабка. За винятком загоряння спирту. В цьому разі ступінь взаємної кореляції концентрації CO та температури повітряного середовища при нульовому лазі оцінюється як дуже висока та негативна.

Аналіз кореляційних функцій показує, що найбільш тісний зв'язок між флуктуаціями для кожного з небезпечних факторів має місце при нульовому лазі. Це означає, що флуктуації кожного з факторів випадкові та не мають циклів. При цьому зі збільшенням величини лага ступінь зв'язку флуктуацій відповідних факторів повітряного середовища зменшується. Динаміка флуктуацій небезпечних факторів повітряного середовища, що характеризується їх постійною часу, чисельно дорівнює часовому лагу, при якому автокореляція стає близькою до нуля.

Наявність загорянь матеріалів у камері призводить до деякого збільшення постійної часу флуктуацій досліджуваних небезпечних факторів повітряного середовища. Однак дана ознака виявляється недостатньо чутливою щодо виявлення ранніх загорянь у приміщеннях ОКІ. У цьому випадку більш інформативною ознакою щодо раннього виявлення загорянь виявляється ступінь взаємної кореляції флуктуацій небезпечних факторів повітряного середовища (рис. 5.6–5.9) при нульовому лазі. При цьому встановлено, що у випадку загоряння спирту додатковою інформативною ознакою може бути величина взаємної кореляції флуктуацій щільності диму та середньої об'ємної температури (рис. 5.6 г) щодо 20 лага (наявність циклічних коливань із періодом 2 с).

Експериментально встановлено, що для всіх тестових горючих матеріалів більш ефективною ознакою раннього виявлення загорянь є

коефіцієнт взаємної кореляції флуктуацій концентрації CO та середньої об'ємної температури при нульовому лазі. При цьому для спирту, паперу та деревини коефіцієнт взаємної кореляції характеризує високий ступінь позитивної кореляції, а щодо текстилю теж високий ступінь але негативної кореляції.

Таким чином, експериментальна перевірка (рис. 5.6–5.9) у цілому підтверджує справедливість запропонованої математичної моделі міри автокореляцій та взаємних кореляцій небезпечних факторів повітряного середовища при ранніх загоряннях у приміщеннях ОКІ на основі використання коефіцієнта кореляції Пірсона але щодо заданого інтервалу спостереження. Тому дана модель обмежується тільки оцінками лінійного взаємозв'язку на заданому інтервалі та за умови розподілів Гауса щодо флуктуацій досліджуваних факторів. У разі флуктуацій, що відрізняються від Гауса, модель оцінює ступінь лінійного взаємозв'язку флуктуацій небезпечних факторів, але перевірка на значимість в цьому випадку втрачає прийнятий зміст.

### **5.1.3 Експериментальна перевірка розробленої математичної моделі для поточних показників фрактальності станів повітряного середовища при загорянні в приміщеннях об'єктів**

Експериментальна перевірка розробленої математичної моделі для поточних показників фрактальності станів повітряного середовища щодо загорянь в приміщеннях ОКІ здійснювалась з використанням лабораторного комплексу. Перевірка зазначеної моделі поточних показників фрактальності станів повітряного середовища включала експериментальну перевірку поточної міри КР (3.6) та поточної міри РС (3.9) при підпалі тестових матеріалів у випробувальній камері лабораторного комплексу.

Стан повітряного середовища у випробувальній камері, обумовлений небезпечними факторами осередку загоряння, вимірювся відповідними сенсорами, розміщеними в лабораторному комплексі. Тестовими горючими

матеріалами були спирт, папір, деревина та тканина. Небезпечні фактори стану повітряного середовища вимірювалися в дискретні моменти часу і з дискретним інтервалом  $\Delta t=0,1$  секунда протягом 300 с. У ході експериментального дослідження дискретні моменти часу і на загальному інтервалі спостереження 300 с були пронумеровані від 0 до N. В експерименті стан повітряного середовища в момент і визначався вектором  $z(t_i)$  у трьох вимірному просторі. При цьому для кожного дискретного моменту і вектору  $z(t_i)=z_i$  станів повітряного середовища визначалася величина прирощення  $x_i=z_i-z_{i+1}$  між поточним і та наступним  $i+1$  станами вектора. Ця величина описувала реальну динаміку вектора прирощень станів щодо повітряного середовища, яке досліджувалося.

Перед кожним підпалом тестових матеріалів здійснювалась вентиляція випробувальної камери протягом 5–7 хвилин з метою видалення наявних небезпечних факторів повітряного середовища, що залишилися після горіння попереднього тестового матеріалу. Примусовий підпал тестових горючих матеріалів у кожному сеансі дослідження здійснювався в районі 200 відліку (20 с) від початку спостереження. В якості сенсорів вимірювання щільності диму, температури повітряного середовища та концентрації чадного газу використалися штатні сенсори, які зазвичай застосовуються в існуючих засобах виявлення пожежі в приміщеннях. Зазначені сенсори розміщувались в зоні конвекційного струменя на висоті 0,8 м над осередком горіння відповідного тестового матеріалу.

### **5.1.3.1 Експериментальна перевірка поточної міри кореляційної розмірності для прирощення станів повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях об'єктів**

На рис. 5.10 наведені результати експериментальної перевірки динаміки КР вектора прирощень станів повітряного середовища при загорянні тестових матеріалів у камері за умови  $r=0,0001$  щодо перших 400 відліків і та значень ширини вікна  $N_w$ , рівних відповідно 20 та 40 відліків [398].

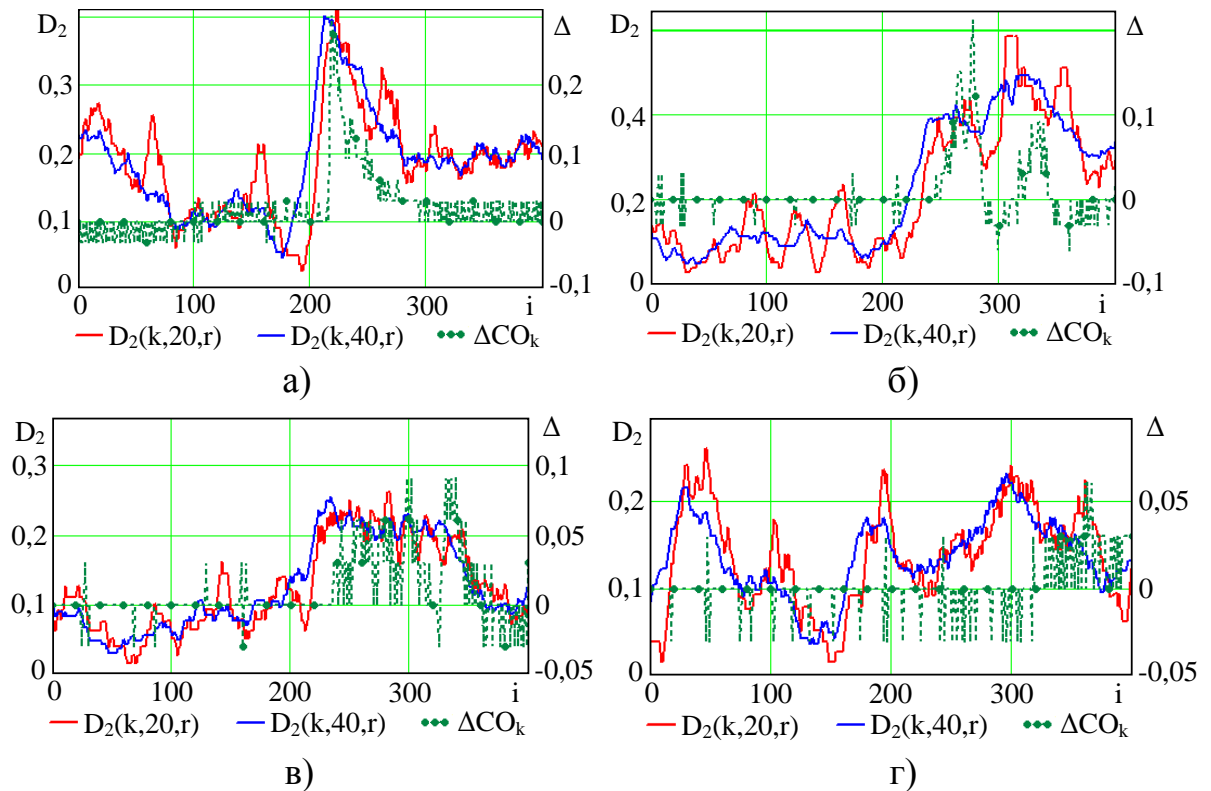


Рис. 5.10 – Динаміка КР вектора прирощень станів повітряного середовища при загорянні різних матеріалів: а – спирту; б – паперу; в – деревини; г – текстилю

На рис. 5.11 представлена динаміка КР вектору прирощень станів повітряного середовища у випадку загоряння текстилю при ширині  $N_w$  ковзного вікна 20 і 200 відліків щодо двох фіксованих значень величини  $r=0,01$  та  $r=0,0001$ .

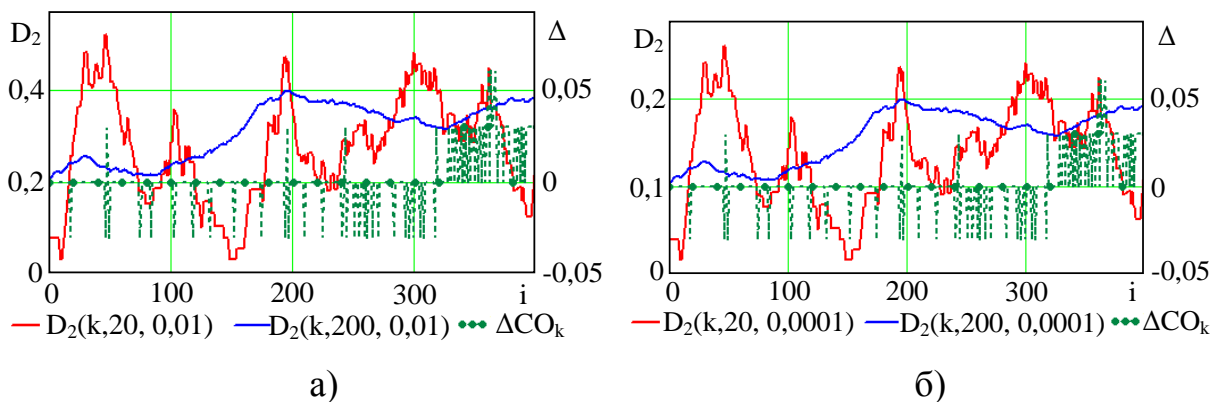


Рис. 5.11 – Динаміка КР вектору прирощень станів повітряного середовища у випадку загоряння текстилю при значеннях: а –  $r=0,01$ ; б –  $r=0,0001$

В якості ілюстрації впливу щодо динаміки КР вектору прирощень станів повітряного середовища збільшення ширини  $N_w$  ковзного вікна та величини  $r$  на рис. 5.12 представлені відповідні експериментальні залежності при загорянні текстилю, як горючого матеріалу з найбільш низьким темпом запалення (такі загоряння складніше всього виявляти та вчасно попереджати про їхнє виникнення).

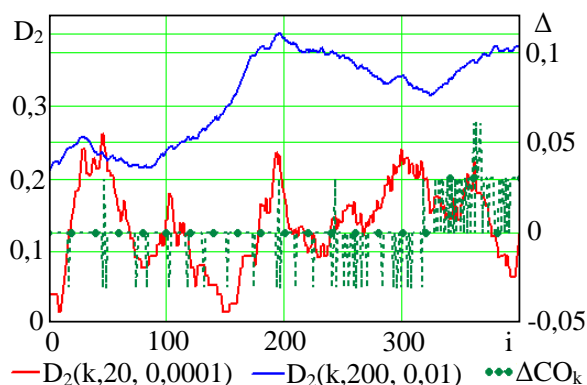


Рис. 5.12 – Динаміка КР вектору прирощень станів повітряного середовища у випадку загоряння текстилю при ширині вікна 20 та 200 відліків і фіксованих величин  $r=0,0001$  та  $r=0,01$  відповідно

На рис. 5.10–5.12 зеленим кольором позначена динаміка для концентрації CO у досліджуваному векторі прирощень станів повітряного середовища для відповідних горючих матеріалів. Наведені експериментальні результати отримані з урахуванням реальних помилок вимірювання відповідних небезпечних факторів повітряного середовища сенсорами в лабораторному комплексі, а також помилок перетворення даних у цифрову форму для їх подальшої обробки. При цьому вважалось, що помилки перетворення вимірів у цифрову форму зневажливо малі в порівнянні з помилками сенсорних вимірювань. Тому в межах методичної похибки, наведені експериментальні результати в цілому достовірно відображають динаміку міри КР вектору прирощень станів досліджуваного повітряного середовища. Враховуючи, що використані в лабораторному комплексі

сенсори застосовуються в реальних засобах виявлення пожежі у приміщеннях, можна вважати, що наведені експериментальні залежності адекватні реальним. Таким чином, запропонована міра КР у достатньому ступені достовірності відображає складні взаємодії в реальному повітряному середовищі щодо ранніх загорянь матеріалів у приміщеннях [398, 470].

Аналіз експериментальної динаміки КР вектору прирощень станів повітряного середовища при загоряннях тестових матеріалів показав, що величина КР не перевищує величину 0,6. Це свідчить щодо фрактальності структури прирощень станів повітряного середовища в камері, а також про їх хаотичну динаміку щодо ранніх загорянь різних матеріалів. При цьому до моменту початку загоряння тестового матеріалу КР вектору прирощень станів повітряного середовища приймає значення, близькі до 0,1. Таке значення КР означає, що імовірність двох близьких значень вектору прирощень станів повітряного середовища дуже мала. Зазначений стан повітряного середовища вважається близьким до випадкового стану. З появою осередку загоряння у випробувальній камері КР збільшується в момент загоряння матеріалу (рис. 5.10, область 200 відліку) у середньому з 0,1 до 0,4. Встановлено, що це явище більшою мірою характерне при підпалі паперу (КР збільшується до 0,6), і в меншій мірі – для текстилю (КР збільшується до 0,3). Пояснюється це властивостями процесів загоряння зазначених матеріалів. В загальному випадку величина КР, що менша за 1, свідчить про наявність деякої стаціонарності вектору прирощень станів повітряного середовища у випробувальній камері та чітко вираженого тренда. При цьому встановлено, що в загальному випадку, джерело загоряння прагне порушити стаціонарність вектору прирощень станів повітряного середовища в камері, що властива відсутності загорянь, та змінити вихідні властивості фрактальності вектору прирощень станів з появою загоряння.

Експериментально встановлене, що збільшення вдвічі розміру вікна не змінює загальну структуру динаміки КР, а призводить лише до її додаткового згладжування (рис. 5.10). При цьому всі характерні риси динаміки вектору



прирощень станів повітряного середовища зберігаються. Однак встановлено, що збільшення розміру вікна на порядок (рис. 5.11), викликає істотне згладжування динаміки КР при одночасному більш чіткому виявленні моменту початку загоряння. Це дозволяє здійснювати раннє виявлення загорянь матеріалів з низьким темпом запалення, наприклад, текстилю (рис. 5.11, область 200 відліку). При цьому збільшення радіуса сфери  $r$  на порядок (рис. 5.11 а) викликає збільшення КР удвічі (з 0,2 до 0,4) не змінюючи тимчасового положення різкого збільшення КР у момент загоряння матеріалу. Характер динаміки КР у цьому випадку не змінюється. Наведені на рис. 5.12 експериментальні залежності динаміки КР підтверджують цей факт. У зв'язку з цим, використання вікна, що рухається, з одночасним збільшенням його ширини та радіуса сфери  $r$  можна розглядати в якості одного з можливих конструктивних способів щодо раннього виявлення загорянь горючих матеріалів з низьким темпом запалення з використанням запропонованої міри КР.

Таким чином, експериментально доведено справедливість використання запропонованої поточної міри КР вектору природжен станів повітряного середовища щодо виявлення ранніх загорянь у приміщеннях ОКІ. Основною перевагою запропонованої міри КР є те, що вона базується на емпіричних даних та особливостях фрактальності складної динаміки щодо вектору природжен станів повітряного середовища у приміщеннях. Це дозволить за допомогою поточної міри КР вектору природжен станів повітряного середовища впевнено виявляти ранні загоряння та попереджати виникнення НС внаслідок пожеж у приміщеннях ОКІ з метою їхнього недопущення або мінімізації наслідків при переростанні загорянь у некеровані пожежі.

До обмежень запропонованої поточної міри КР вектору природжен станів повітряного середовища можна віднести деяку неоднозначність при виборі ширини використовуваного вікна. Однак, дане обмеження може бути зняте після проведення серії додаткових вогневих та натурних випробувань із метою

визначення оптимальної величини ширини вікна, а також розробки практичних рекомендацій з її вибору у засобах попередження відповідних НС.

### 5.1.3.2 Експериментальна перевірка поточної міри рекурентності прирощень станів повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях об'єктів

Перевірка поточної міри РС щодо вектору прирощень станів повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях ОКІ здійснювалася на основі емпіричних даних [404] при загорянні спирту та паперу в лабораторному комплексі [397]. Підпал спирту та паперу у випробувальній камері лабораторного комплексу здійснювався аналогічно попередньому експерименту в районі 200 відліку. На рис. 5.13 наведені RP вектору прирощень станів повітряного середовища, обумовлені  $H(r - \|x_i - x_j\|) = R^{m,r}_{i,j}$  та (3.8), для  $i=0, 1, 2, \dots, 400$  і  $j=0, 1, 2, \dots, 400$  при загорянні спирту у випробувальній камері лабораторного комплексу для експериментального дослідження особливостей динаміки стану небезпечних факторів повітряного середовища в негерметичному приміщенні при ранніх загоряннях, у випадку величини  $\varepsilon=0,01$  [404].

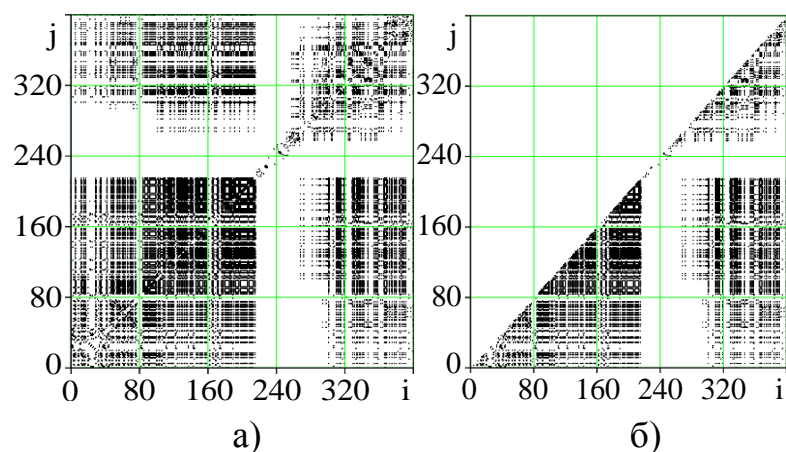


Рис. 5.13. – Рекурентні діаграми вектору прирощень станів повітряного середовища у випробувальній камері при загорянні спирту: а – рекурентні діаграми  $H(r - \|x_i - x_j\|) = R^{m,r}_{i,j}$ ; б – рекурентні діаграми (3.8)

Ілюстрація динаміки числа та оцінки імовірності РС (3.9) щодо вектору прирощень станів повітряного середовища при загорянні спирту в камері у випадку  $\varepsilon=0,01$  наведена на рис. 5.14.

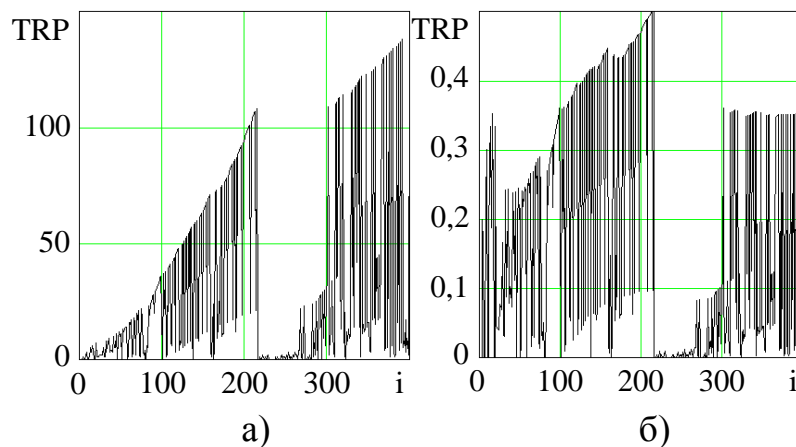


Рис. 5.14 – Динаміка РС щодо вектору прирощень станів повітряного середовища при загорянні спирту у випробувальній камері: а – число РС; б – оцінка імовірності РС, обумовлена мірою (3.9)

Як приклад нарис. 5.15 зображені RP щодо вектору прирощень станів повітряного середовища у випробувальній камері лабораторного комплексу, обумовлені  $H(r - \|x_i - x_j\|) = R^{m,r}_{i,j}$  й (3.8) у випадку загоряння паперу при  $\varepsilon=0,01$ .

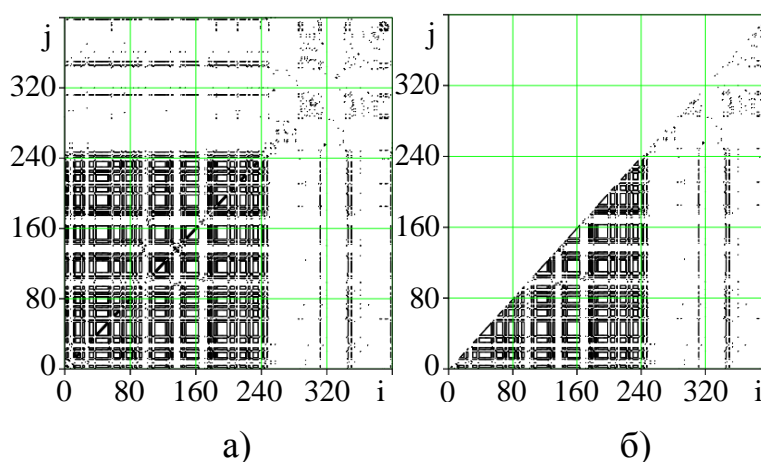


Рис. 5.15. – Рекурентні діаграми щодо вектору прирощень станів повітряного середовища у випробувальній камері при загорянні паперу: а – рекурентні діаграми  $H(r - \|x_i - x_j\|) = R^{m,r}_{i,j}$ ; б – рекурентні діаграми (3.8)

Для цього випадку на рис. 5.16 представлена ілюстрація динаміки числа та оцінки імовірності РС (3.9) щодо вектору прирощень станів повітряного середовища у випадку загоряння паперу в камері при  $\varepsilon=0,01$ .

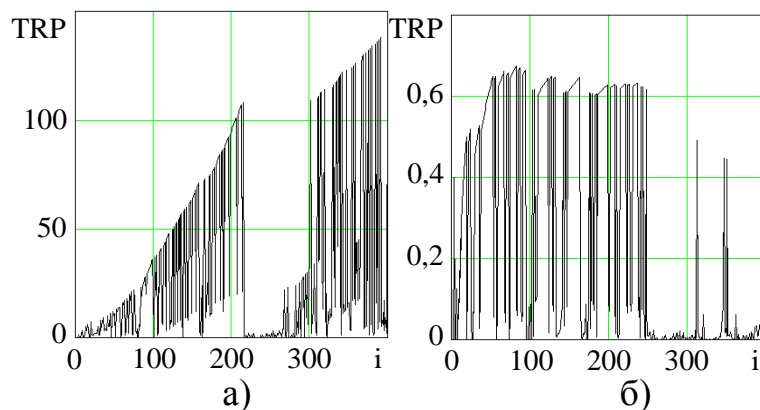


Рис. 5.16 – Динаміка РС щодо вектору прирощень станів повітряного середовища при загорянні паперу у випробувальній камері: а – число РС; б – оцінка імовірності РС, обумовлена мірою (3.9)

Представлені на рис. 5.13–5.16 експериментальні залежності отримані при допущенні, що помилки перетворення в цифрову форму зневажливо малі в порівнянні з помилками вимірювань. Тому в межах методичної похибки можна вважати, що отримані експериментальні дані є достовірними та відповідають реальним умовам. Із аналізу експериментальних RP на рис. 5.13 і рис. 5.15 видно, що динаміка вектору прирощень станів повітряного середовища у випадку загоряння спирту та паперу у випробувальній камері лабораторного комплексу виявляється різною. При цьому до моменту загоряння динаміка вектору прирощень станів виявляється схожою та характеризується різкою зміною стійкості протягом коротких інтервалів часу. Такі зміни характерні для умов динамічної рівноваги в станах повітряного середовища при відсутності загорянь в приміщенні. Деякі відмінності в RP на цьому інтервалі пояснюються тим, що загоряння паперу відбувалося після загоряння спирту та подальшою вентиляцією камери. При цьому в повітряному середовищі могли бути присутнім залишкові явища.

Однак схожий характер діаграм до загоряння свідчить про достатній ступінь вентиляції камери. Білі області на RP свідчать про відсутність рекурентності щодо вектору прирощень станів повітряного середовища [404]. Ці області характеризують втрату стійкості станів повітряного середовища та відповідають моменту загоряння спирту та паперу. Подальша динаміка вектору прирощень станів повітряного середовища має хаотичний характер, пов'язаний з нестійкістю станів повітряного середовища. При цьому на рис. 5.13 і рис. 5.15 чітко фіксуються області появи загорянь (білі області RP). Тому RP щодо вектору прирощень станів повітряного середовища в цілому дозволяють виявляти ранні загоряння. Трикутні форми RP на рис. 5.13 і рис. 5.15 на відміну від традиційних прямокутних форм обумовлені тим, що вони обчислюються в реальному часі вимірювання. Тому трикутна форма RP виявляється оперативною формою подання RP. Використання таких RP для обчислення запропонованої поточної міри РС щодо вектору прирощень станів повітряного середовища (3.9), що чисельно дорівнює поточній оцінці імовірності їхньої повторюваності (рис. 5.14 і рис. 5.16). Це свідчить про можливість використання поточної міри РС щодо виявлення ранніх загорянь та попередження НС внаслідок пожеж у приміщеннях ОКІ.

Таким чином, виконана експериментальна перевірка запропонованої поточної міри РС щодо вектору прирощень станів повітряного середовища, свідчить, що дана міра, на відзнаку від відомих, здатна виявляти ранні загоряння в приміщеннях ОКІ.

#### **5.1.4 Показники достовірності інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища приміщень об'єктів критичної інфраструктури**

Достовірність запропонованого інженерно-технічного методу попередження НС внаслідок пожеж (вибухів) за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища приміщень ОКІ на основі

обчислення в реальному часі запропонованих показників фрактальності щодо вектору прирощень станів повітряного середовища визначається імовірнісними характеристиками виявлення ранніх загорянь. Виявлення загорянь на основі поточних мір КР та РС здійснюється на основі реалізації принципу порогів. Це означає, що показники якості виявлення ранніх загорянь будуть залежати від статистичних характеристик зазначених мір та відповідних порогів.

Експериментально встановлено, що у момент виникнення загорянь поточна величина КР різко збільшується, а поточна величина РС різко зменшується. При цьому виявлення загорянь може здійснюватись незалежно на основі кожної із зазначених мір при відповідному порозі. Тому для розгляду із єдиних позицій показників якості виявлення ранніх загорянь на основі використання поточних мір КР та РС перейдемо від міри  $M_2(i,r)$  до еквівалентної міри  $M_B(i,r)=1-M_2(i,r)$ . З урахуванням центральної граничної теореми можна вважати, що статистичні характеристики мір  $D_2(r,N_w,t)$  та  $M_B(i,r)$  у фіксований момент часу  $t$  будуть описуватися розподілом Гауса. Нехай за гіпотезою  $H_1$  деяка поточна міра, що обумовлена  $D_2(r,N_w,t)$  (або  $M_B(i,r)$ ), при наявності загоряння в приміщенні визначається фіксованою величиною  $\Delta T \neq 0$ . Тоді за гіпотезою  $H_0$  при відсутності загоряння в приміщенні ця величина  $\Delta T=0$ . При цьому відповідні фонові значення для міри  $D_2(r,N_w,t)$  (або  $M_B(i,r)$ ) нехай описуються статистикою  $N(T_f, \sigma_f)$  зі заданими параметрами. Тут  $T_f$  – середнє значення, а  $\sigma_f$  – величина флуктуацій відповідного фону  $n_f$ . При цьому фон для кожної з мір буде описуватися відповідною статистикою  $N(0, \sigma_f)$ . З урахуванням цього гіпотеза  $H_1$  буде відповідати деякому виміру  $\xi = \Delta T + n_f$ , а гіпотеза  $H_0$  – виміру  $\xi = n_f$ .

Для зазначеного виміру  $\xi$  завдання прийняття рішення на користь однієї з гіпотез  $H_1$  або  $H_0$  стає еквівалентним найпростішому бінарному завданню виявлення детермінованого сигналу на фоні випадкового процесу Гауса, що розглянуто, наприклад, в роботі [397]. Це дозволяє для вирішення

завдання щодо раннього виявлення загорянь скористатися відомими результатами.

Будемо вважати, що виявлення загорянь за поточними показниками фрактальності (КР і РС) щодо вектору прирощень станів повітряного середовища здійснюється при однократному відліку виміру  $\xi$  та порівнянні його із заданим порогом. Тоді оптимальне правило щодо виявлення загорянь буде базуватися на обчисленні відношення правдоподібності та порівняння його із заданим порогом. У цьому випадку оптимальне правило може бути представлене у вигляді

$$L = \xi / \sigma_f \begin{matrix} \frac{H_1}{\Delta T} \\ \frac{H_0}{\Delta T} \end{matrix} \ln(\eta) + \frac{\Delta T}{2\sigma_f} = l_p, \quad (5.2)$$

де  $\eta$  – оптимальний поріг, обумовлений апріорною вартістю щодо помилкових та вірних рішень, а також апріорними ймовірностями наявності та відсутності загоряння в приміщенні ОКІ. У випадку гіпотези  $H_0$  величина  $L$ , обумовлена (5.2), буде описуватися статистикою  $N(0,1)$  Гауса, а у випадку справедливості гіпотези  $H_1$  – статистикою  $N(\Delta T / \sigma_f, 1)$  Гауса. Вводячи до розгляду відстань  $d = \Delta T / \sigma_f$  між середніми значеннями відповідних розподілів  $L$  для розглянутих гіпотез, величина  $l_p = \ln(\eta) / d + d / 2$  буде визначати оптимальний поріг для виявлення ранніх загорянь відповідно до запропонованого інженерно-технічного методу попередження НС. З огляду на це, імовірність помилкового виявлення загоряння та відповідно помилкового попередження НС у розглянутих умовах буде визначатися величиною

$$F_S = \int_{l_p}^{\infty} \exp(-x^2 / 2) / \sqrt{2\pi} dx. \quad (5.3)$$

При цьому імовірність вірного виявлення загоряння та відповідно вірного попередження НС буде визначатися величиною:

$$D_s = \int_{l_p}^{\infty} \exp(-(x-d)^2/2)/\sqrt{2\pi} dx. \quad (5.4)$$

Відповідно до процедури (5.2), величина вимірної міри КР (або РС) щодо вектору прирощень станів повітряного середовища, рівень флуктуацій відповідного фону, апіорні імовірності наявності та відсутності загоряння в приміщенні та вартості вірних та помилкових попереджень НС будуть визначати величину оптимального порога  $l_p$  щодо цих умов. При цьому величина  $l_p$ , згідно (5.3) і (5.4), буде визначати відповідне значення імовірності помилкового та вірного виявлення загоряння та попередження НС. Варто відмітити, що величина порога  $l_p$  є загальним аргументом для розглянутих показників якості виявлення загорянь у приміщенні та запропонованого інженерно-технічного методу попередження НС.

Звичайно в реальних умовах апіорні дані про наявність і відсутність загоряння в приміщеннях ОКІ в даний момент часу відсутні, а вартості вірних та помилкових рішень важко формалізувати. У цьому випадку величина оптимального порогу буде визначатися величиною  $l_p'=d/2$ . Тому імовірнісні характеристики виявлення загорянь і показники якості запропонованого інженерно-технічного методу попередження НС у заданих умовах будуть визначатися функцією  $D_s(F_s, \Delta T/\sigma_f)$ . Дану функцію при фіксованому значенні  $\Delta T/\sigma_f$ , виходячи [397], можна називати робочою характеристикою раннього виявлення загорянь у заданих умовах або відповідно робочою характеристикою запропонованого інженерно-технічного методу попередження НС техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища приміщень ОКІ. Відомо, що точного аналітичного виразу щодо



визначення функції  $D_S(F_S, \Delta T/\sigma_f)$  не існує. Тому в інженерній практиці застосовуються різні наближені вирази для цієї функції. У силу наявних обмежень скористатися відомими апроксимаціями в розглянутому випадку не представляється можливим. Тому запропоновано новий підхід щодо визначення аналітичного виразу цієї функції для довільних значень  $F_S$  та  $\Delta T/\sigma_f$ .

Суть запропонованого підходу полягає у використанні відповідної раціональної апроксимації рішення для зворотного рівняння (5.3) та подальшого його використання щодо вирішення рівняння (5.4). Для визначення зворотного рішення при заданій величині імовірності помилкового виявлення  $0 < F_S \leq 0,5$  визначимо раціональну апроксимацію у вигляді:

$$u(F_S, \sigma_f) = \sigma_f t - \frac{\sigma_f(a_0 + a_1 t)}{1 + b_1 t + b_2 t^2} + \varepsilon, \quad t = \sqrt{\ln(F_S^{-2})}, \quad |\varepsilon| < 3 \cdot 10^{-8}, \quad (5.5)$$

де  $a_0 = 2,30753$ ,  $a_1 = 0,27061$ ,  $b_1 = 0,99229$ ,  $b_2 = 0,04481$ .

На рис. 5.17 наведені залежності величини порогу від імовірності помилкового виявлення загорянь у приміщеннях ОКІ при різних рівнях флуктуацій  $\sigma_f$  відповідного фону.

Із аналізу кривих на рис. 5.17 бачимо, що в загальному випадку залежність оптимального порогу від імовірності помилкового виявлення загорянь носить нелінійний характер. При цьому зростання рівня флуктуацій фону (погіршення умов виявлення загоряння в приміщенні на основі відповідного показника фрактальності повітряного середовища) вимагає відповідної нелінійної корекції порогу. Ця корекція повинна здійснюватись з урахуванням середнього значення  $T_f$  відповідного фону під час відсутності загоряння та визначатися величиною  $u(F_S, \sigma_f) + T_f$  відповідно.

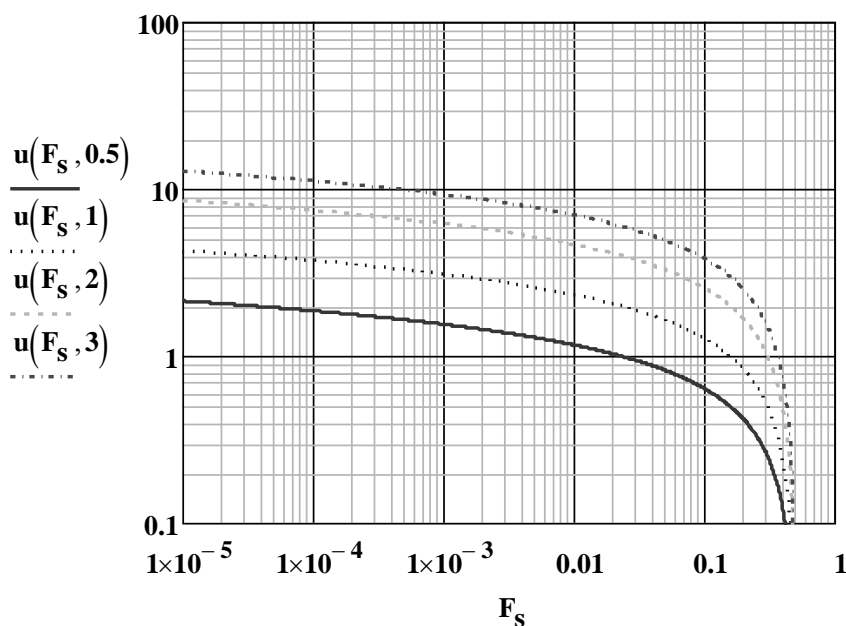


Рис. 5.17 – Залежності порогу для міри КР (або РС) від величини  $F_s$  при фіксованих флуктуаціях  $\sigma_f$  фону, що дорівнюють 0,5, 1, 2 та 3

З урахуванням запропонованої апроксимації (5.5) робочі характеристики виявлення та робочі характеристики інженерно-технічного методу попередження НС внаслідок пожежі в приміщеннях ОКІ в заданих умовах будуть визначатися виразом (5.4), у якому поріг  $l_p'' = u(F_s, \sigma_f) - \Delta T$ .

Відомо, що інтеграл (5.4) може бути обчислений прямим методом або з використанням додаткової функції помилок, таблиці якої відомі. В інженерній практиці часто користуються наближеним рівнянням (5.4) в аналітичній формі у вигляді відповідних залежностей щодо позитивних значень аргументу.

Однак відомі вирази виявляються досить грубими для визначення робочих характеристик щодо виявлення загорянь та відповідного інженерно-технічного методу попередження НС. Більш доцільним у цьому випадку виявляється використання поліноміальної та раціональної апроксимації (5.5), яка визначається у вигляді

$$D_s(x) = \exp(-x^2/2)(m_1 r + m_2 r^2 + m_3 r^3) / \sqrt{2\pi}, \quad r = (1 + 0,33267 x)^{-1}, \quad (5.6)$$

де  $m_1 = 0,4361836$  ,  $m_2 = -0,1201676$  ,  $m_3 = 0,9372980$  .

При цьому (5.5) забезпечує точність апроксимації (5.6), що визначається не гірше  $10^{-5}$ . На рис. 5.18 наведені робочі характеристики виявлення загорянь за допомогою міри КР (або РС) за різних умов (залежності імовірності вірного виявлення загоряння від імовірності помилкового його виявлення для різних значень величини  $d = \Delta T / \sigma_f$ ).

Робочі характеристики чисельно визначають показники достовірності запропонованого інженерно-технічного методу попередження НС у вигляді очікуваних ймовірностей вірного та помилкового попередження (виявлення ранніх загорянь) для конкретних умов виміру КР (або РС) щодо стану повітряного середовища в приміщеннях ОКІ. У загальному випадку робочі характеристики запропонованого інженерно-технічного методу зв'язують між собою основні імовірнісні показники  $D_S$  та  $F_S$  достовірності попередження НС внаслідок пожежі з умовами виміру КР (або РС) щодо вектору прирощень станів повітряного середовища в приміщеннях ОКІ та інших апріорних даних. Так, наприклад, якщо відомі вартості (або умовні ризики)  $C_{00}$  та  $C_{11}$  для вірних та помилкових  $C_{10}$  і  $C_{01}$  попереджень НС, а також імовірності наявності  $p_1$  та відсутності  $p_0 = 1 - p_1$  загоряння в заданий момент часу, то можна обчислити величину порога  $\eta = p_0(C_{10} - C_{00}) / p_1(C_{01} - C_{11})$  апріорно. За величиною  $\eta$  знаходиться відповідна точка ( $\Delta$ ) на кривій (рис. 5.18), яка відповідає прогнозованим умовам спостереження конкретного показника фрактальності щодо вектору прирощень станів повітряного середовища в приміщенні ОКІ. Для даної точки ( $\Delta$ ) оцінюються значення очікуваних показників  $D_S$  та  $F_S$  достовірності інженерно-технічного методу попередження НС. У цьому випадку для фіксованих умов спостереження  $d = \Delta T / \sigma_f$  поріг  $\eta$  розглядається як змінний параметр. Це означає, що для заданих умов  $d$  на відповідній кривій можливо обрати будь-яку точку, обумовлену порогом  $\eta (0 \leq \eta \leq \infty)$ .

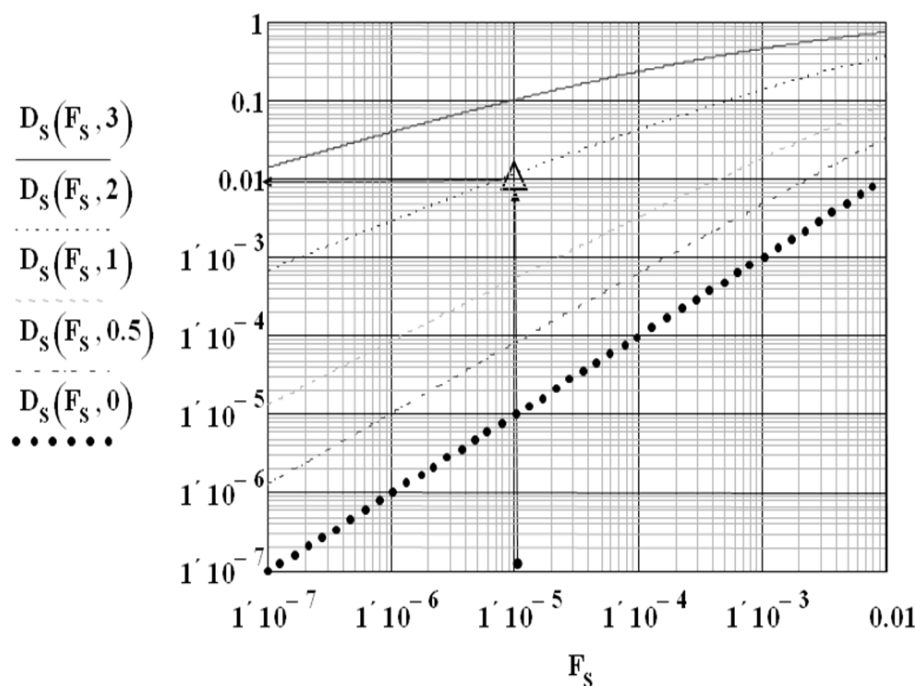


Рис. 5.18 – Робочі характеристики інженерно-технічного методу попередження НС на основі спостереження конкретного показника фрактальності щодо вектору прирощень станів повітряного середовища в умовах, що характеризуються різною величиною  $d$ , яка дорівнює 0, 0,5, 1, 2 та 3

Так, наприклад, у випадку  $\eta = 0$  показники достовірності методу будуть визначатися  $D_s = F_s = 1$ . Це означає, що відповідно до розглянутого інженерно-технічного методу завжди буде здійснюватися попередження НС, навіть при відсутності загорянь у приміщенні ОКІ. При збільшенні порогу  $\eta$  показники достовірності  $D_s$  та  $F_s$  методу будуть знижуватися. У випадку  $\eta = \infty$  запропонований метод попередження НС завжди буде пропускати загоряння та виявляється не здатним виконувати свої функції за призначенням внаслідок пожеж (вибухів) у приміщеннях ОКІ. При цьому показники достовірності методу визначаються  $D_s = F_s = 0$ .

У загальному випадку, відповідно до рис. 5.18, достовірність

відповідного інженерно-технічного методу попередження НС (імовірність вірного попередження) буде збільшуватися з ростом величини  $d = \Delta T / \sigma_f$  – поліпшенням умов визначення КР (або РС) щодо вектору прирощень станів повітряного середовища при ранніх загоряннях в приміщеннях ОКІ.

Важливою властивістю робочих характеристик запропонованого інженерно-технічного методу попередження НС є те, що тангенс кута нахилу дотичної у деякій точці ( $\Delta$ ) кривої визначає необхідну величину порогу  $\eta$  в (5.2), необхідну для досягнення заданих значень показників достовірності  $D_s$  та  $F_s$  методу в цій точці. Знаючи значення  $\eta$ , відповідно до (5.2) можна обчислити необхідне значення  $l_p$ .

У реальних умовах дані про вартість вірного та помилкового виявлення загорянь на основі конкретного показника фрактальності, а також про імовірність наявності та відсутності загоряння в заданий момент часу звичайно невідомі. У цьому випадку апріорні імовірності наявності та відсутності загоряння в приміщеннях ОКІ покладаються однаковими, а ці події вважаються, що мають рівні ймовірності. При цьому вартості щодо вірних та помилкових виявлень загорянь на основі конкретного показника фрактальності приймаються одиничними та нульовими відповідно. Тоді робочі характеристики виявлення загорянь, а відповідно й методу попередження НС що пропонується можна представити в іншому виді. А саме аргументом розглядати величину  $d$ , а параметром визначати  $F_s$ . Зазначені характеристики за аналогією з [397] можна називати характеристиками виявлення загорянь або характеристиками достовірності запропонованого інженерно-технічного методу попередження НС внаслідок пожежі в приміщеннях ОКІ.

На рис. 5.19 представлені зазначені характеристики, розраховані для різних значень  $F_s$ , рівних  $10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$  і  $10^{-7}$  відповідно. Зазначені характеристики дозволяють оцінювати достовірність вірного виявлення

загорянь при заданій імовірності помилкового виявлення щодо різних умов спостереження  $d$  конкретного показника фрактальності щодо вектору прирощень станів повітряного середовища в приміщенні ОКІ.

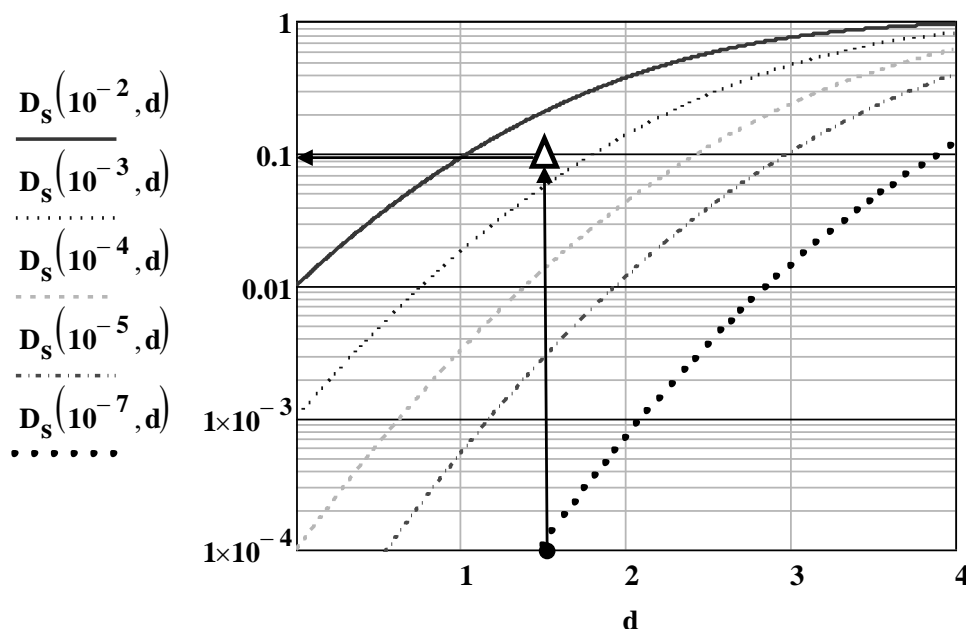


Рис. 5.19 – Характеристики достовірності виявлення загорянь і попередження НС на основі показників фрактальності щодо вектору прирощень станів повітряного середовища в приміщеннях ОКІ при різних значеннях  $F_S$

Такі ж характеристики визначають і достовірність запропонованого інженерно-технічного методу попередження НС при різних ймовірностях помилкового попередження НС та умовах спостереження конкретного показника фрактальності щодо вектору прирощень станів повітряного середовища в приміщенні ОКІ. При цьому задана імовірність помилкового виявлення загорянь та попередження НС буде визначати відповідний поріг, який необхідно застосовувати щодо забезпечення необхідних показників достовірності  $D_S$  та  $F_S$  розглянутого інженерно-технічного методу попередження НС.

Розглянуті імовірнісні характеристики виявлення загорянь у вигляді робочих характеристик та характеристик виявлення загорянь свідчать про те, що забезпечення одночасно високої імовірності вірного та низької імовірності помилкового виявлення загорянь на основі одного з запропонованих показників фрактальності щодо вектору прирощень станів повітряного середовища в приміщеннях ОКІ представляється ускладненим. Забезпечити виконання зазначених вимог можливо тільки в окремому випадку дуже малого рівня флуктуацій відповідного фону та істотного перевищення конкретним показником фрактальності середнього значення відповідного фону. Тому для забезпечення більшої імовірності вірного та одночасно низької імовірності помилкового виявлення загоряння необхідно в якості показника фрактальності повітряного середовища обирати такий, для якого має місце менший рівень флуктуацій фону, а при загорянні – більше перевищення щодо середнього значення відповідного фону.

Аналогічні висновки залишаються справедливими і до запропонованого інженерно-технічного методу попередження НС внаслідок пожежі в приміщеннях ОКІ. У цьому випадку розглянуті імовірнісні характеристики виявлення загорянь у вигляді робочих характеристик та характеристик виявлення загорянь будуть характеризувати й відповідні показники достовірності попередження НС. При цьому забезпечити одночасно високу достовірність попередження НС і малу імовірність помилкового попередження НС при використанні лише одного з показників фрактальності, що пропонуються, щодо вектору прирощень станів повітряного середовища в приміщеннях ОКІ важко. Тому для підвищення достовірності попередження НС пропонується використовувати одночасно два показники фрактальності щодо вектору прирощень станів повітряного середовища та попередження НС здійснювати на основі одночасного перевищення вказаними показниками фрактальності відповідних порогів.

Таким чином, отримані співвідношення, які дозволяють визначати показники достовірності розробленого інженерно-технічного методу

попередження НС техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища в приміщеннях ОКІ шляхом обчислення кореляційної розмірності та рекурентності щодо вектору прирощень станів повітряного середовища. При цьому показники достовірності запропонованого методу оцінюються відповідними робочими характеристиками та характеристиками виявлення загорянь. На основі використання поліноміальної та раціональної апроксимації розроблений інженерний метод визначення робочих характеристик і характеристик виявлення загорянь. Точність запропонованого методу виявляється істотно вище відомих методів, які звичайно застосовуються у теорії виявлення. Встановлено, що забезпечення одночасно високої достовірності інженерно-технічного методу попередження НС та низької імовірності помилок можливо тільки у випадку незначних флуктуацій відповідного фону та істотного перевищення контрольованим показником фрактальності середнього значення щодо цього фону. Для забезпечення високої достовірності розробленого інженерно-технічного методу попередження НС у різних умовах застосування пропонується використовувати одночасно два розглянутих показники фрактальності щодо вектору прирощень станів повітряного середовища. У цьому випадку попередження НС внаслідок пожеж в приміщеннях ОКІ здійснювати на основі одночасного перевищення зазначеними показниками фрактальності відповідних порогів.

## **5.2 Експериментальна перевірка розробленої математичної моделі та інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури**

Спочатку дамо опис особливостей експериментальних досліджень концентрацій шкідливих речовин в атмосферному повітрі на



території (поблизу) ОКІ. Потім призведемо експериментальну перевірку запропонованих методів визначення  $RP$  динаміки станів забруднення атмосферного повітря за поточними вимірами концентрації забруднень. Далі виконаємо експериментальну перевірку запропонованих чисельних мір  $PC$  забрудненого атмосферного повітря на основі  $RP$  та функції невизначеності. Виконаємо експериментальну перевірку величини ризику негайних ефектів та хронічної інтоксикації, обумовлених концентраціями шкідливих речовин, що забруднюють атмосферне повітря на території (поблизу) ОКІ.

Після чого здійснюємо перевірку достовірності інженерно-технічного методу попередження НС техногенного характеру, обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) ОКІ. На завершення призведемо валідацію запропонованих двох точкової та багато точкової комунікативних моделей бездротового середовища необхідних щодо реалізації запропонованих інженерно-технічних методів попередження НС на основі різних БПРП.

### **5.2.1 Опис особливостей експериментальних досліджень концентрацій шкідливих речовин в атмосферному повітрі на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури**

Експериментальні дослідження концентрацій атмосферних забруднень на території (поблизу) ОКІ виконувались на прикладі вимірювань реальних концентрацій шкідливих речовин в атмосферному повітрі міст. Виміри концентрацій шкідливих речовин в атмосферному повітрі здійснювались на трьох маршрутних постах для типової міської конфігурації, атмосфера якої забруднювалась традиційними стаціонарними та мобільними джерелами. У якості типової розглядалася міська конфігурація, для якої значення індексу забруднення атмосфери становило порядку 6,8 од. Зазначений індекс забруднення атмосфери вважається середнім щодо міст України та є характерним для більшості міст світу з помірно розвиненою критичною інфраструктурою.

Виміри концентрацій забруднень атмосфери на маршрутних постах виконувалися за допомогою портативного газоаналізатора DRÄGER PAC 7000 (Німеччина). Газоаналізатор, побудований на основі використання сучасних сенсорів Dräger XXS, забезпечує короткий час відгуку (до 20 с) та високу достовірність результатів вимірів. Прилад здатний вимірювати концентрації  $H_2S$ ,  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $Cl_2$ ,  $HCN$ ,  $NH_3$ ,  $NO_2$ ,  $NO$ ,  $PH_3$ ,  $SO_2$  та інших шкідливих речовин в атмосферному повітрі. Концентрація забруднень атмосферного повітря вимірялася з урахуванням вимог Державного стандарту 17.2.3.01-86 «Охорона природи. Атмосфера. Правила контролю якості повітря населених пунктів».

При дослідженні враховувалася сучасна стратегія багатьох країн, яка пов'язана з контролем обмеженого набору найважливіших забруднювачів атмосфери, які є індикаторами наявності більш широкого спектра забруднюючих речовин, що входять до складу реальних викидів ОКІ. Згідно цієї стратегії до найважливіших забруднювачів відносять: зважені речовини ( $PM_{10}$  та  $PM_{2.5}$ ), оксиди азоту ( $NO_x$ ), оксиди сірки  $SO_2$  та озон ( $O_3$ ). Контроль зважених речовин пов'язаний з обов'язковим спостереженням концентрацій таких газоподібних забруднювачів, як  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ ,  $CO$ . При цьому моніторинг концентрацій  $O_3$  звичайно пов'язаний з контролем концентрацій  $NO$ ,  $NO_2$  та NMVOC (летучих органічних сполук не метанового ряду). З огляду на особливу небезпеку для людини та навколишнього середовища, у якості експериментальних забруднювачів атмосферного повітря розглядалися  $NO_2$ ,  $NH_3$ ,  $CO$  та формальдегід. Відомо, що формальдегід є токсичним газом, який негативно впливає не тільки на центральну нервову систему людини, а й на генетичний матеріал, шкірний покрив, репродуктивні органи і т.д.

Експеримент проводився протягом одного місяця (31 день). Вимірювалися концентрації зазначених забруднювачів атмосферного повітря в трьох місцях (А, В та С) розглянутої типової міської конфігурації. Координати місць вимірів позиціонувалися з використанням GPS (А:

49.446361,32.053106; В: 49.407947,32.093376; С: 49.421643,32.021621). Концентрації забруднювачів атмосферного повітря в трьох місцях вимірялися в  $\text{мг/м}^3$ . Виміри концентрації забруднювачів у місцях А, В та С здійснювались 4 рази на добу (01:00, 07:00, 13:00, 19:00). В експерименті дискретному моменту часу  $i=0$  відповідало значення реального часу виміру 01:00 першого дня експерименту. При цьому умовному моменту часу  $i=120$  відповідало значення реального часу 01:00 31-го дня експерименту.

Для експериментальної перевірки використовувались поточні значення концентрацій забруднювачів атмосферного повітря. Крім того для перевірки достовірності моделей та методів використовувалась апріорі достовірна небезпечна подія, яка пов'язана із небезпечним забрудненням атмосфери в районі зазначених місць контролю. Тому для перевірки вибирався тестовий часовий інтервал що визначався з 01:00 4-го дня ( $i=12$ ) по 01:00 13-го дня ( $i=48$ ) експерименту. Вибір тестового інтервалу був пов'язаний з наявністю на цьому інтервалі небезпечних перевищень концентраціями досліджуваних шкідливих речовин ГДК та наявності апріорі достовірної небезпечної події, яка пов'язана з раптовою та тривалою втратою нормативних показників здоров'я для понад 50 людей різного віку. Наявність цієї реальної небезпечної події обиралася у якості перевірки достовірності та можливостей запропонованих моделей та методів.

### **5.2.2 Експериментальна перевірка розробленої математичної моделі чисельних мір аналізу рекурентних діаграм динаміки станів забруднення атмосферного повітря та ризику здоров'ю людей**

Експериментальна перевірка розробленої математичної моделі чисельних мір аналізу RP динаміки станів забрудненої атмосфери та ризику здоров'ю населення здійснювались наступним чином. По-перше, здійснювалася експериментальна перевірка запропонованих методів визначення RP динаміки станів забрудненої атмосфери щодо поточних вимірів концентрації атмосферних забруднень. По-друге, виконувалася експериментальна перевірка запропонованих чисельних мір PC забрудненої

атмосфери на основі запропонованих методів визначення РР. По-третє, здійснювалась експериментальна перевірка запропонованих чисельних мір РС забрудненої атмосфери на основі використання функції невизначеності.

### 5.2.2.1 Експериментальна перевірка запропонованих методів визначення рекурентних діаграм динаміки станів забруднення атмосферного повітря за поточними вимірами концентрації забруднень

Експериментальна перевірка запропонованих методів визначення РР динаміки станів забрудненої атмосфери здійснювалась на основі поточних вимірів концентрації атмосферних забруднень у вигляді двоокису азоту в пунктах контролю А, В та С протягом 31 доби [403]. Результати одержаних вимірів (RÄGER PAC 7000) поточних концентрацій двоокису азоту в пунктах контролю А, В та С протягом 31 доби, а також ГДК щодо двоокису азоту ( $0,04 \text{ мг/м}^3$ ) наведені на рис. 5.20. Виміри проводилися 4 рази на добу. При цьому через обмеження організаційного характеру протягом деяких діб виміри не проводилися. Однак для збереження непевності часової шкали концентрації двоокису азоту, які не вимірялися протягом певної доби в пунктах контролю, приймалися фіксованими та значно меншими рівня фону. Це дозволило їх враховувати при подальшій обробці вимірюваних даних.

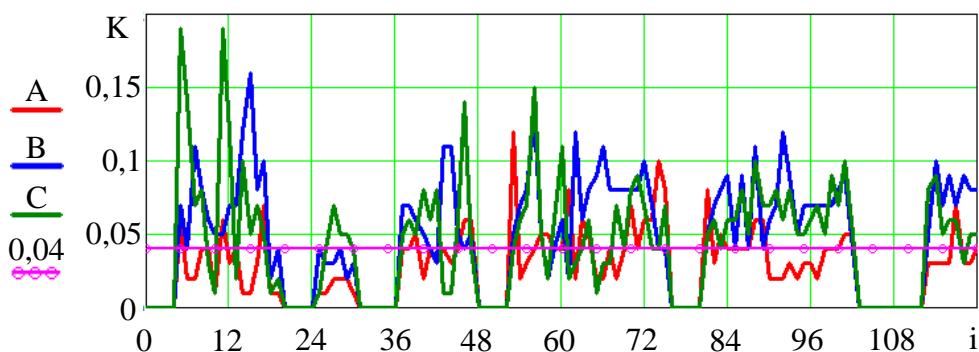


Рис. 5.20 – Значення вимірюваної концентрації ( $\text{мг/м}^3$ )  $\text{NO}_2$  в атмосферному повітрі в місцях контролю А, В та С

Аналіз концентрації  $\text{NO}_2$  в атмосферному повітрі в заданих пунктах

контролю (рис. 5.20) свідчить про наявність безлічі небезпечних ситуацій перевищення забрудненнями відповідної ГДК. На рис. 5.21 наведені ілюстрації класичного визначення RP (4.2) щодо розміру  $\epsilon=0,01$  для вимірюваних концентрацій двоокису азоту в атмосферному повітрі (рис. 5.20). Зазначені RP відображають кластери чорних та білих точок, які описують характерні властивості динаміки станів розглянутих забруднень атмосфери. При цьому обчислення RP не є оперативним засобом відображення динаміки стану забруднення атмосферного повітря оскільки для їх обчислення потрібно мати весь набір вимірів на відповідному інтервалі спостереження.

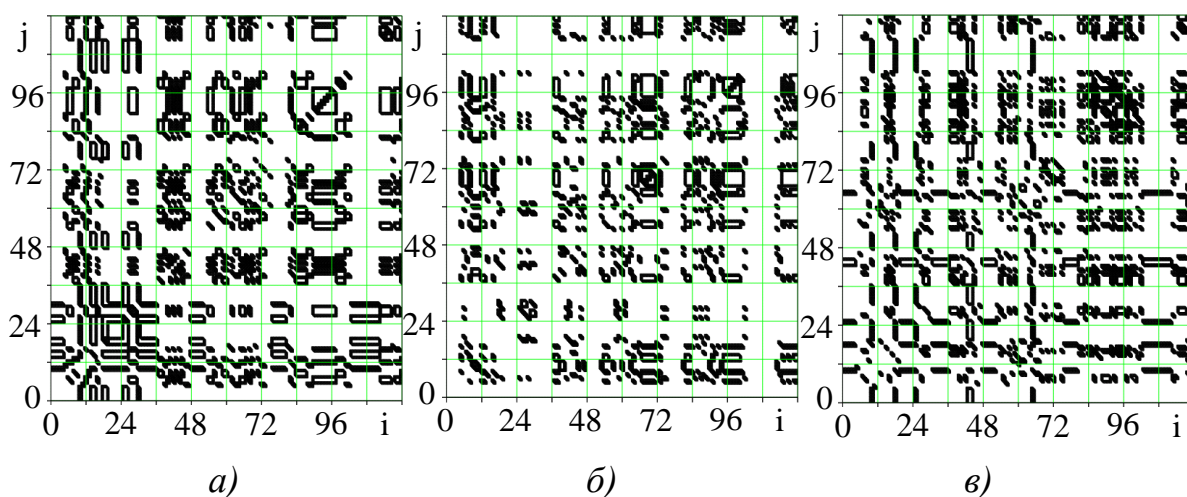


Рис. 5.21 – RP (4.2) для концентрації  $\text{NO}_2$  в атмосферному повітрі в місцях контролю: *а* – А; *б* – В; *в* – С

У розділі 4 відзначалося, що для попередження НС внаслідок атмосферних забруднень замість (4.2) потрібне оперативне обчислення RP тільки на основі поточних вимірів, що доступні у момент  $i$  та попередніх до нього моментів (тобто в реальному темпі вимірювання) [410]. Як ілюстрація на рис. 5.22 наведені запропоновані RP (4.3) у вигляді відповідних кластерів чорних та білих точок щодо вимірюваних концентрацій  $\text{CH}_2\text{O}$  (формальдегіду) в атмосферному повітрі в пункті С щодо двох розмірів околиці  $\epsilon=0,0025$  та  $\epsilon=0,0015$  на інтервалі між 12 та 48 відліком.

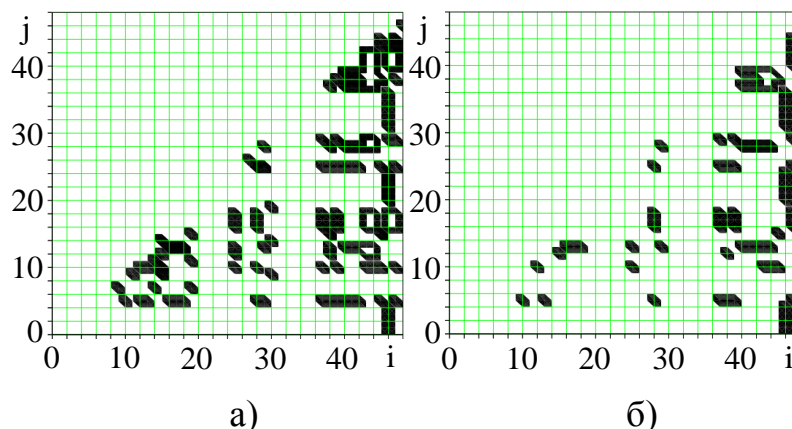


Рис. 5.22 – RP (4.3) для концентрації (мг/м<sup>3</sup>) CH<sub>2</sub>O в атмосферному повітрі при різних розмірах околиці: а) –  $\varepsilon=0,0025$ ; б) –  $\varepsilon=0,0015$

Відображення на рис. 5.21 та рис. 5.22 відповідають RP динаміки різних, але поодиноких забруднювачів атмосферного повітря. Тому подальша експериментальна перевірка здійснювалася щодо запропонованого самонастроювального методу обчислення RP (4.3) на прикладі динаміки вектора станів (щодо заданої сукупності забруднювачів) забрудненої атмосфери. При виборі забруднювачів враховувалось, що головними джерелами забруднень міської атмосфери є автотранспорт [427], пожежі [428, 429] та аварії на ОКІ [402]. Крім того враховувалося, що глобальні забруднення атмосфери пов'язані з парниковим ефектом, появою кислотних дощів [471] та забрудненням різних водоносних шарів [430]. Тому для перевірки запропонованого самонастроювального методу обчислення RP у якості вимірюваних складових вектора стану забруднень атмосфери вибиралися концентрації формальдегіду, аміаку та двоокису азоту.

Методика експериментальних досліджень забруднень атмосфери в цьому випадку в цілому аналогічна вище вказаної та докладніше описана в [403]. При перевірці запропонованого самонастроювального методу розглядалися результати вимірів концентрацій зазначених забруднювачів атмосфери у травні 2018 року, починаючи з 480 відліку та закінчуючи 604 відліком. З метою порівняння результатів [412] у якості тестового для

перевірки обирався той же інтервал, починаючи з 13:00 3 травня 2018 року ( $i=490$ ) по 01:00 11 травня 2018 року ( $i=520$ ). Протягом цього інтервалу аналізувалися результати поточних вимірів з урахуванням перевищень забруднювачами відповідних ГДК [423].

В якості ілюстрації на рис. 5.23 зображені RP, обчислені відповідно до відомого методу у випадку евклідової метрики при різному фіксованому розмірі  $\varepsilon$ , а також відповідно до запропонованого самонастроювального методу при величині граничного кута  $\theta_\varepsilon=1^\circ$ .

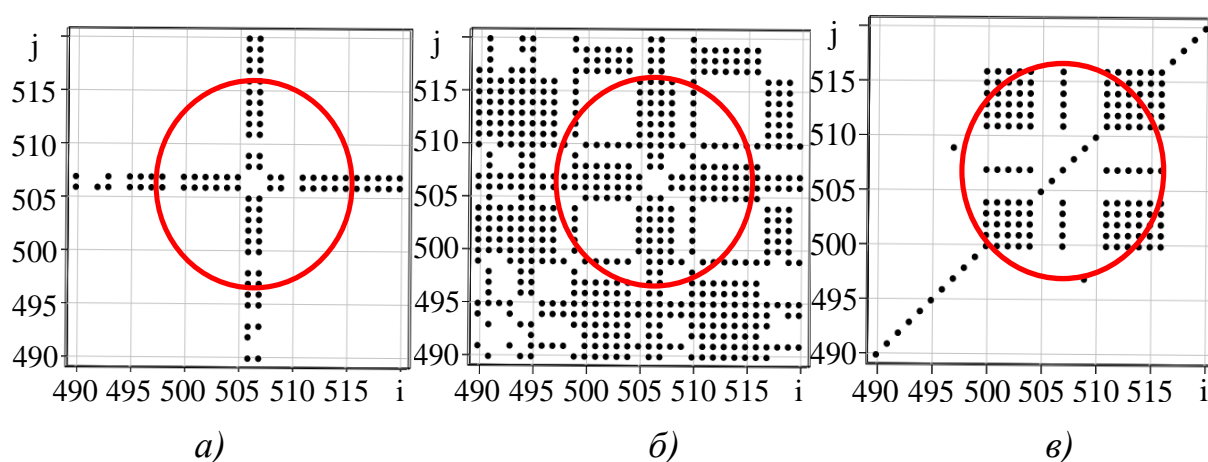


Рис. 5.23 – RP щодо вектора станів забруднень атмосфери на тестовому інтервалі: а – відомий метод, евклідова метрика, розмір  $\varepsilon=2$ ; б – відомий метод, евклідова метрика, розмір  $\varepsilon=8$ ; в – самонастроювальний метод, величина граничного кута  $\theta_\varepsilon=1^\circ$ .

Тут і далі під відомим методом розуміється метод обчислення RP, описуваний (4.2) при евклідовій метриці. На рис. 5.23 червоним кольором позначена область RP, яка відповідає апріорі достовірному небезпечному стану забруднень атмосфери в проміжку між 504 та 511 відліком. Слід відмітити, що протягом усього тестового інтервалу значення вимірюваних концентрацій забруднювачів перевищували їх ГДК. При цьому у відзначених червоним кольором областях на рис. 5.23 структура RP відображається по-різному, хоча перевищення мають однаковий характер.

У якості ілюстрації важливої ознаки запропонованого самонастроювального методу обчислення RP на рис. 5.24 представлені поверхні, що описують динаміку адаптивного порогу при значенні граничного кута  $\theta_\varepsilon = 5^\circ$  для чотирьох тестових інтервалів з різним рівнем перевищення концентрацій розглянутих забруднювачів.

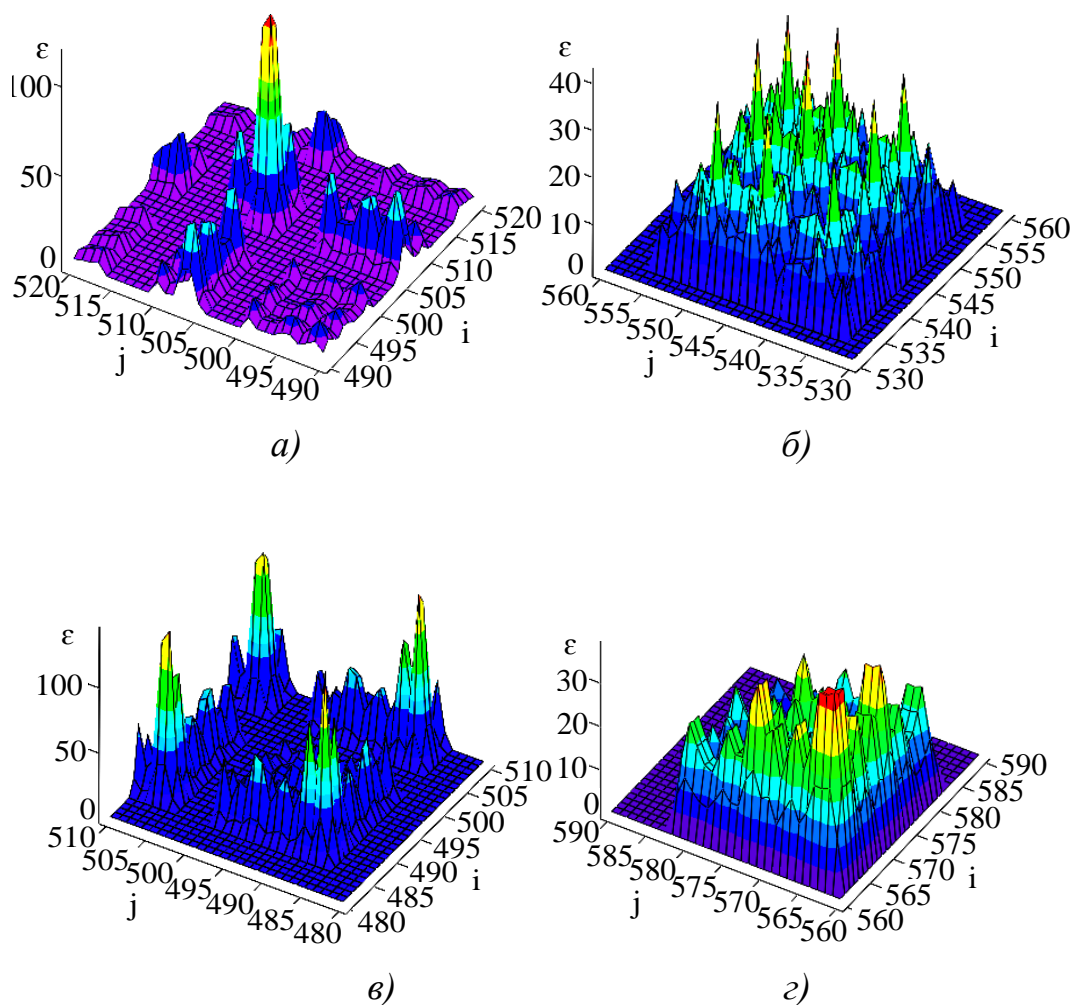


Рис. 5.24 – Поверхні динаміки для адаптивного порогу в запропонованому методі на різних інтервалах відліків: а – 490 – 520; б – 530 – 560; в – 480 – 510; г – 560 – 590

Обчислені RP відповідно до запропонованого самонастроювального методу для векторів станів атмосферних забруднень, вимірюваних для тестового інтервалу при двох різних значеннях граничного кута  $\theta_\varepsilon$ , рівних  $10^\circ$  та  $20^\circ$  відповідно представлені на рис. 5.25.



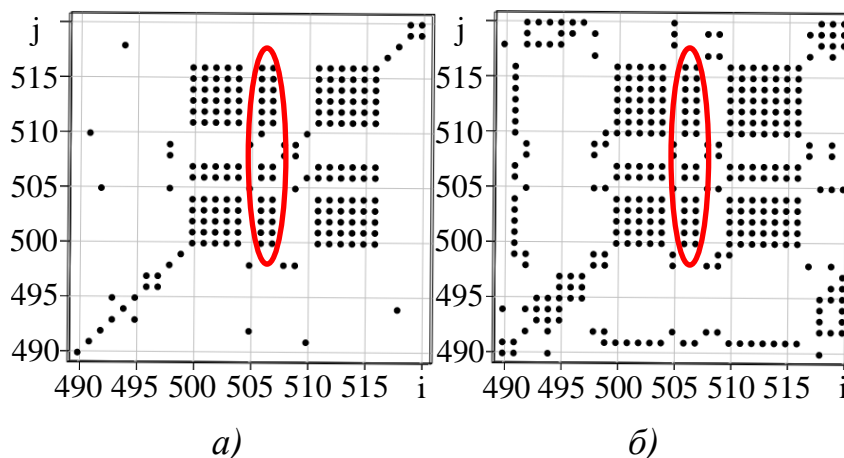


Рис. 5.25 – RP щодо вектора станів забруднень атмосфери на тестовому інтервалі, що обчислені на основі самонастроювального методу для різних значень граничного кута  $\theta_0$ : а  $-10^\circ$ ; б  $-20^\circ$

На рис. 5.25 овалом червоного кольору позначена область рекурентності щодо наявності достовірних небезпечних станів забрудненої атмосфери, які відповідають перевищенню ГДК в 10 разів по формальдегіду, в 1–2 рази – по аміаку та в 1–4 рази – по двоокису азоту.

Встановлено, що RP, які обчислені на основі відомого методу для евклідової метрики при різних значеннях фіксованого розміру  $\varepsilon$  (ілюстрації на рис. 5.23, а, б) не являються точними та адекватними відображенню реальній системі атмосферних забруднень, що спостерігалась. Тому достовірно виявити небезпечний стан атмосферних забруднень за такими RP виявляється проблематичним. При цьому видно, що відображення RP для евклідової метрики суттєво залежить від величини розміру  $\varepsilon$ . Виходячи з RP на рис. 5.23, а, б, щодо адекватного відображення RP при евклідовій метриці в певних умовах необхідно здійснювати підбір найкращої величини  $\varepsilon$ . Однак при зміні вимірюваних даних потрібно здійснювати такий підбір заново.

Застосування запропонованого самонастроювального методу обчислення RP на відміну від відомого методу при різних метриках дозволяє забезпечувати надійне відображення та виявлення небезпечних станів

атмосферних забруднень поза залежністю від умов вимірів. З аналізу характеру поверхонь, що описують динаміку порога при  $\theta_e=5^\circ$  для різних інтервалів, наведених на рис. 5.24, бачимо, що в самонастроювальному методі обчислення RP здійснюється при порозі, що автоматично настроюється за вимірами, відслідковуючи їх динаміку.

Вплив значень граничного кута  $\theta_e$  конуса рекурентності на структуру RP, що обчислюються (рис. 5.25), свідчить про те, що зі збільшенням його величини селективні властивості RP знижуються, з'являються помилкові чорні точки, а горизонтальні та вертикальні лінійні кластери чорних точок розширюються (збільшується загальна кількість точок PC). Встановлено, що робочими значеннями кута  $\theta_e$  варто вважати  $10^\circ$  та менше. При таких значеннях кута структура RP залишається адекватною PC реальних систем. Наявність білих точок або кластерів білих точок на RP характеризує відсутність рекурентності в заданому конусі для вимірюваних векторів станів забруднювачів атмосфери. Це може бути обумовлене як можливою втратою рекурентності, так і відмовою засобів вимірювання.

Результати експериментальної перевірки, наведені на рис. 5.23–5.25, свідчать про те, що у порівнянні з відомими методами запропонований метод обчислення RP є більш інформативним, точним та адекватним щодо відображення PC. Крім того метод здатний чітко виявляти небезпечні стани в системах у вигляді появи вертикальних та горизонтальних кластерів чорних точок. Наявність прямокутних кластерів чорних точок на RP (рис. 5.23, в, рис. 5.25) виявляються помилковими. Оскільки вони обумовлені методикою попередньої обробки результатів вимірів, відповідно до якої в моменти відсутності вимірів їх значення дорівнювались величині  $10^{-5}$ . Це дозволило у відображенні RP ідентифікувати моменти відсутності вимірів.

Експериментальна перевірка запропонованого методу підтвердила його важливу прикладну властивість, яка пов'язана з подоланням існуючої метрико-граничної невизначеності, що є характерною для відомих методів. Крім того метод забезпечує інваріантність структури відображення RP щодо

характеру вимірювань та їх нерегулярності або відсутності вимірів. Відображені РС за допомогою запропонованого методу обчислення RP виявляються адекватними реальним системам.

Експериментально підтверджено, що RP дозволяють виявляти дрібномасштабні структури, які утворені із простих чорних точок, діагональних, горизонтальних та вертикальних ліній. Комбінації вертикальних і горизонтальних ліній формують прямокутні кластери рекурентних точок. Вертикальні та горизонтальні лінії на RP виділяють проміжки часу, у які концентрація забруднювача в атмосферному повітрі не змінюється або змінюється в незначній мірі (атмосферні забруднення як би «заморожуються» у ці проміжки часу). Це є типовим при ламінарних станах в атмосфері. У таких станах відсутнє перемішування між сусідніми шарами повітря або відсутнє розсіювання забруднювачів в атмосфері. Це призводить до збереження або збільшення концентрації забруднювача. Зазначені стани є індикаторами можливих прихованих небезпек забруднення атмосфери.

Експериментальна перевірка запропонованого самонастроювального методу обчислення RP для вектора концентрацій обраних газових забруднювачів атмосферного повітря, вимірюваних у травні 2018 року підтверджує підвищену точність та адекватність відображення РС атмосферних забруднень, а також інваріантність відображення відносно характеру вимірів та їх регулярності.

Встановлено, що на точність методу відображення РС впливають апріорі задані граничні кутові розміри конуса рекурентності. Показано, що зі зменшенням величини граничних кутів точність відображення станів динамічних систем в RP підвищується за рахунок виключення помилкових РС. Експериментально встановлено, що достатня точність і адекватність щодо візуального та автоматичного виявлення небезпечних станів атмосферного забруднення забезпечується для граничного кутового розміру конуса рекурентності, який не перевищує  $10^\circ$ . Слід зауважити, що наведені результати перевірки запропонованого самонастроювального методу

обчислення  $RP$  базуються на всіх результатах виміру вектора стану забрудненої атмосфери на інтервалі, що досліджується. Однак усі наведені результати залишаються справедливими і у випадку, обчислення  $RP$  (4.14). При цьому відображення  $RP$  на рис. 5.23-5.25 будуть мати нижню трикутну форму чорних та білих точок аналогічної топології.

### 5.2.2.2 Експериментальна перевірка запропонованих чисельних мір рекурентних станів забруднення атмосферного повітря на основі рекурентних діаграм

Експериментальна перевірка запропонованих в підрозділі 4.1.2 чисельних мір  $PC$  здійснювалась на прикладі вимірів концентрації двоокису азоту в пунктах контролю А, В и С протягом 31 доби, а також формальдегіду в пункті С на тестовому інтервалі між 01:00 години 4-го дня ( $i=12$ ) по 01:00 годині 13-го дня ( $i=48$ ) експерименту [403, 426].

Експериментальна динаміка запропонованої міри  $M_1$   $PC$  (4.19) для концентрації двоокису азоту в атмосферному повітрі в трьох пунктах контролю ілюструється на рис. 5.26. При цьому суцільні криві відповідають розміру околиці  $\varepsilon=0,01$ , а точкові –  $\varepsilon=0,001$  [426].

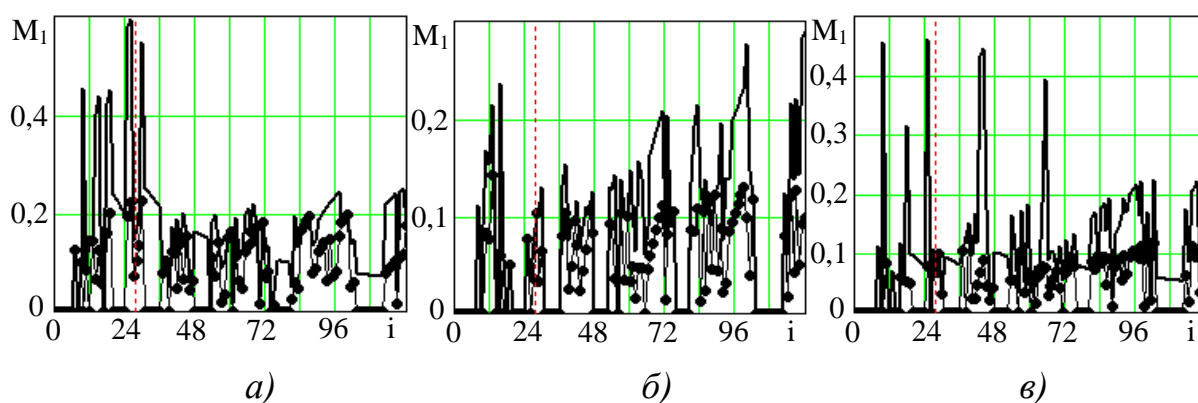


Рис. 5.26 – Динаміка міри  $M_1$   $PC$  для концентрації  $NO_2$  в атмосферному повітрі в місцях контролю:  $a$  – А;  $b$  – В;  $c$  – С

Аналогічні залежності динаміки міри  $M_2$   $PC$  (4.20) для концентрації

двоокису азоту в атмосферному повітрі в трьох пунктах контролю при використанні вікна усереднення розміром 12 відліків, що рухається у часі представлені на рис. 5.27.

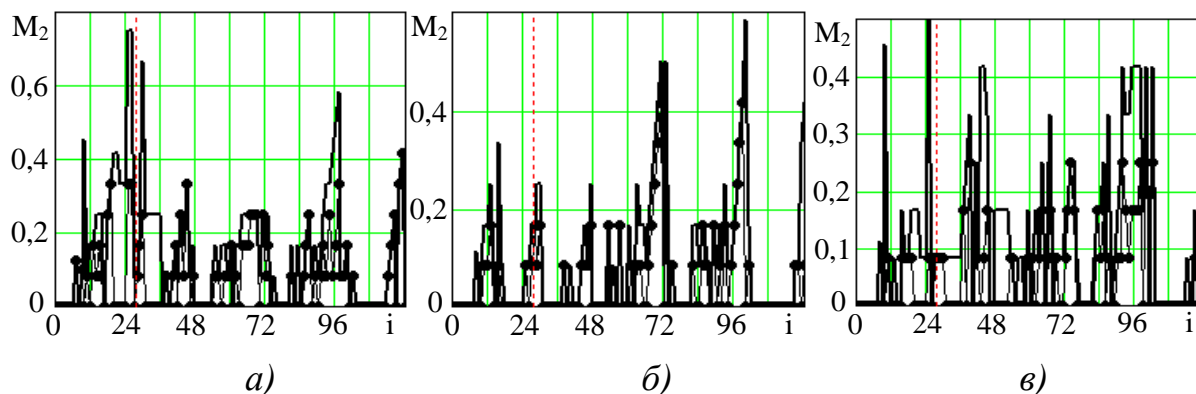


Рис. 5.27 – Динаміка міри  $M_2$  РС для концентрації  $\text{NO}_2$  в атмосферному повітрі в місцях контролю: *a* – А; *б* – В; *в* – С

На рис. 5.28 представлені гістограми для вимірюваних концентрацій двоокису азоту в атмосферному повітрі. На рис. 5.28 через  $K$  позначена концентрація двоокису азоту в  $\text{мг}/\text{м}^3$ , а через  $N$  – кількість відповідних концентрацій в пунктах контролю. На гістограмах також показана величина  $\text{ГДК}_{\text{с.д.}}$  ( $0,04 \text{ мг}/\text{м}^3$ ) та  $\text{ГДК}_{\text{м.р.}}$  ( $0,085 \text{ мг}/\text{м}^3$ ) щодо  $\text{NO}_2$ .

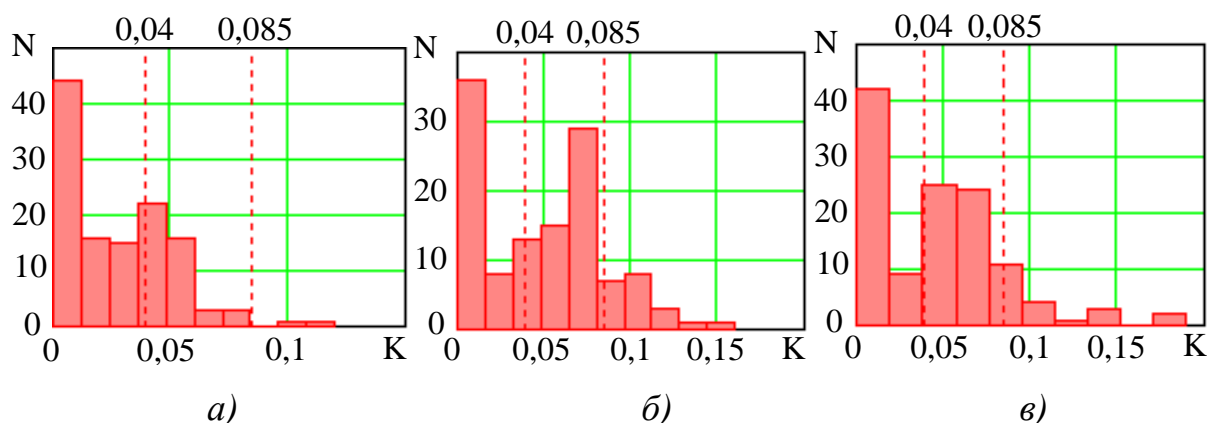


Рис. 5.28 – Гістограми концентрацій  $\text{NO}_2$  в атмосферному повітрі для різних пунктів контролю: *a* – А; *б* – В; *в* – С

Для порівняння на рис. 5.29 представлена динаміка запропонованих мір  $M_1$  та  $M_2$  РС щодо концентрації  $\text{NO}_2$  при розмірі околиці  $\epsilon=0,01$ , а також динаміка вимірюваної концентрації  $\text{NO}_2$  в атмосферному повітрі К для розглянутих пунктів контролю та ГДК<sub>с.д.</sub> для  $\text{NO}_2$  у  $\text{мг/м}^3$ .

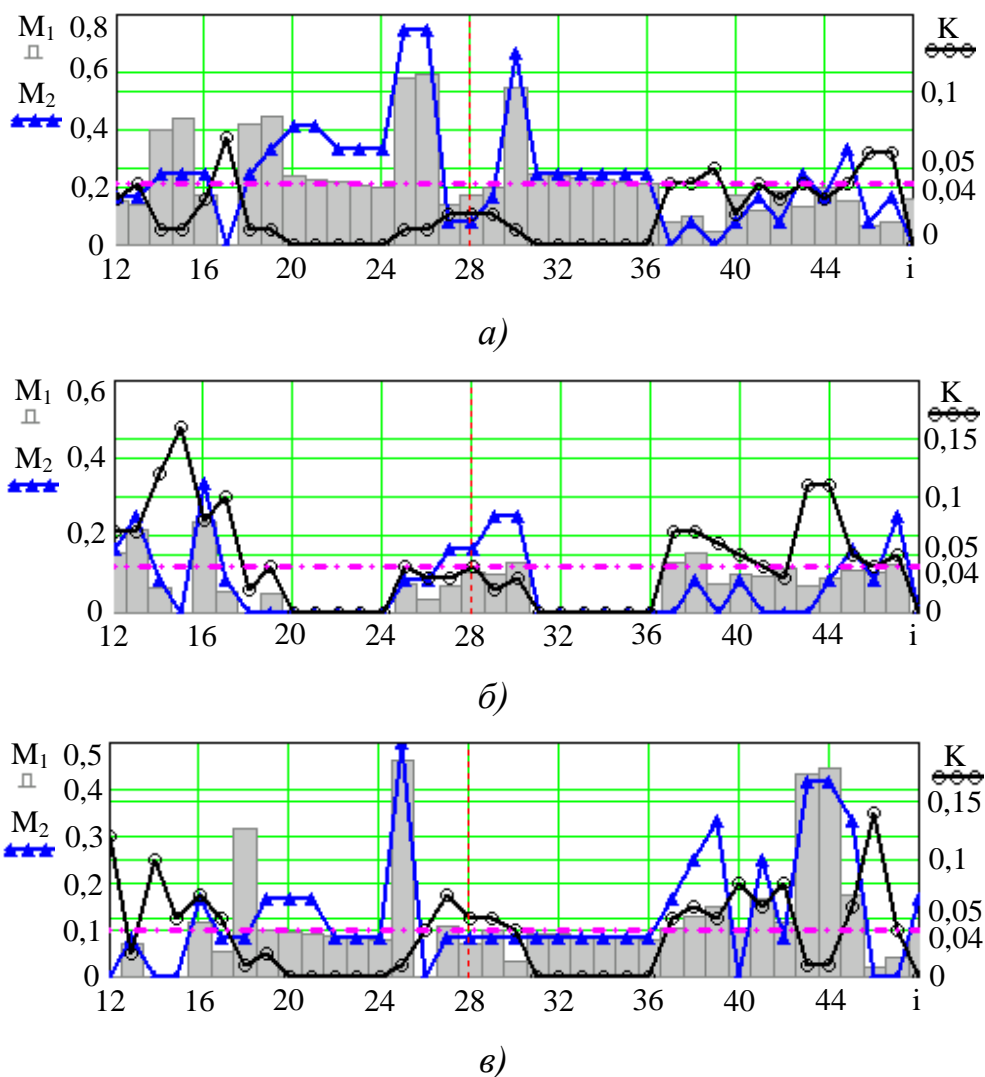


Рис. 5.29 – Порівняльна динаміка мір  $M_1$  і  $M_2$  РС для концентрації  $\text{NO}_2$  в атмосферному повітрі, а також динаміка вимірюваної концентрації  $\text{NO}_2$  та величина ГДК<sub>с.д.</sub> для пунктів контролю: *a* – А; *б* – В; *в* – С

На рис. 5.29 додатково позначений умовний відлік під номером  $i=28$ , який відповідає реальному часу 01:00 8-ої доби експерименту. Аналіз динаміки міри  $M_1$  РС для концентрації двоокису азоту в атмосферному повітрі в пунктах контролю (рис. 5.26) свідчить про максимальну величину

даної міри на інтервалі 12–36 відлік щодо пунктів контролю А та С, яка дорівнює 0,6 та 0,48 відповідно. Аналогічна ситуація спостерігається і для міри  $M_2$  (рис. 5.27). У цьому випадку максимальна величина міри РС становить величину 0,78 та 0,5 для пунктів контролю А та С відповідно. При цьому в пункті контролю В значення міри РС для концентрації забруднення  $\text{NO}_2$  у зазначеному інтервалі не перевищує 0,3. Досить високе значення міри РС для концентрацій забруднення атмосфери  $\text{NO}_2$  у пунктах контролю А та С свідчить про наявність значної кореляції концентрацій забруднення. Мале значення міри РС для концентрації  $\text{NO}_2$  у пункті контролю В означає меншу кореляцію концентрацій забруднення. Аналіз представлених на рис. 5.28 гістограм показав, що у всіх пунктах контролю поточні значення концентрацій  $\text{NO}_2$  перевищують  $\text{ГДК}_{\text{с.д.}}$  від 2,75 до 4,5 разів. При цьому  $\text{ГДК}_{\text{м.р.}}$  перевищені в 1,3-2,1 рази. У ході експерименту встановлено, що розподіл концентрацій забруднень на досліджуваному інтервалі відрізняється від Гауса (рис. 5.28). У цьому зв'язку, використання середніх значень концентрацій забруднень за місяць для порівняння із  $\text{ГДК}_{\text{с.д.}}$  є не зовсім коректним.

Порівняльна динаміка запропонованих мір  $M_1$ ,  $M_2$  РС для вимірюваної концентрації  $\text{NO}_2$  в атмосферному повітрі (рис. 5.29) у пунктах контролю показує, що перед 28 відліком має місце високе значення (0,6; 0,78 та 0,48; 0,5) мір РС для пунктів контролю А та С відповідно, які потім різко зменшуються. При цьому зазначені міри для пункту контролю С приймали нульові значення в момент 26 відліку. Для пункту контролю А має місце відмінне від нульового значення (близьке до 0,1) зазначених мір, що відповідало 28 відліку. Така динаміка мір РС для концентрації забруднення пояснюється різким переходом від ламінарного стану атмосферного забруднення  $\text{NO}_2$  (високе значення РС) до стану, пов'язаному із втратою цього стану та переходу в нестійкий стан (низьке значення РС). Такий перехід станів може становити певну небезпеку щодо забруднення атмосферного повітря. При цьому варто відмітити, що з погляду часової

локалізації небезпечних подій щодо факту різкого зниження величини запропонованих мір РС краще використовувати міру  $M_2$ , що має більші можливості щодо виявлення зазначених небезпек забруднення атмосфери.

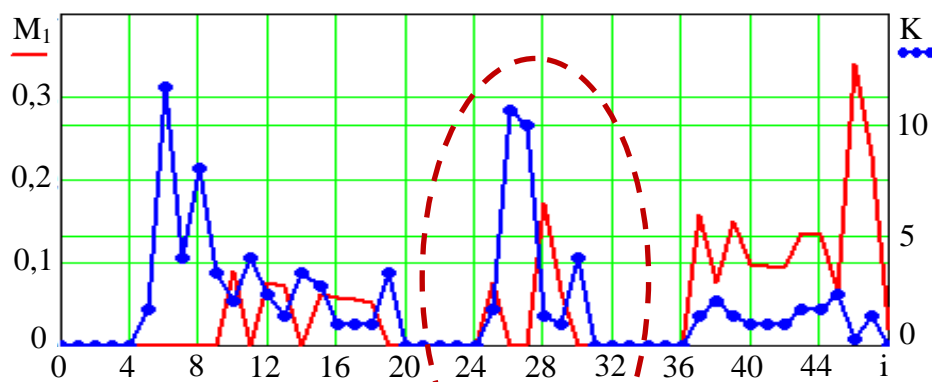
Відмічається, що формальдегід є токсичним газом для людини, який негативно впливає не тільки на центральну нервову систему, а й на генетичний матеріал, шкіру, репродуктивні органи і т.п. Тому поряд із двоокисом азоту як токсичний забруднювач атмосферного повітря для типової міської конфігурації в експерименті розглядався формальдегід ( $\text{CH}_2\text{O}$ ). ГДК<sub>м.р.</sub> формальдегіду в атмосферному повітрі становить  $0,035 \text{ мг/м}^3$ , а ГДК<sub>с.д.</sub> –  $0,003 \text{ мг/м}^3$ .

Експериментальна динаміка запропонованої міри  $M_1 = M_1(\varepsilon, i)$  РС для концентрації  $\text{CH}_2\text{O}$  в атмосферному повітрі для трьох фіксованих розмірів  $\varepsilon = 0,0015$ ,  $\varepsilon = 0,0025$  та  $\varepsilon = 0,008$  ілюструється на рис. 5.30. Для порівняння на рис. 5.30 представлена також експериментальна нормована до середньої добової ГДК динаміка поточної концентрації (К)  $\text{CH}_2\text{O}$  на тестовому інтервалі часу. Позначена на рис. 5.30 область (штрихова лінія) характеризує небезпечний рівень забруднення  $\text{CH}_2\text{O}$  атмосферного повітря (понад 10 ГДК), зумовлений викидами та атмосферними умовами на інтервалі між 23 та 32 вимірами.

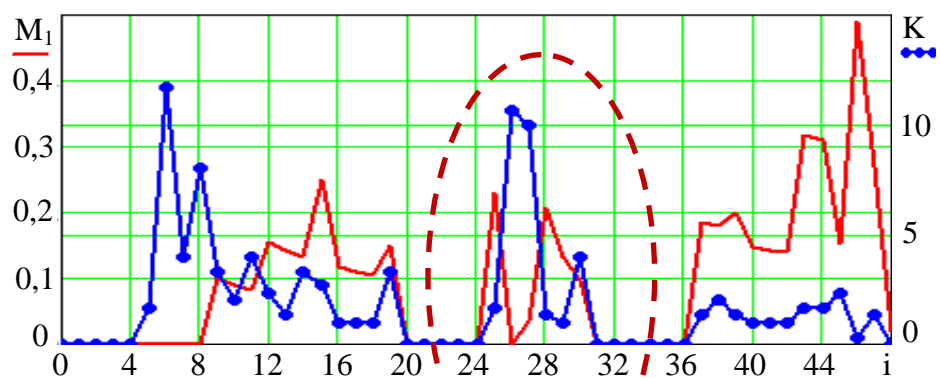
На рис. 5.31 в якості ілюстрації наведені залежності міри РС  $M_1$  від розміру  $\varepsilon$  для чотирьох фіксованих моментів 24, 25, 26 і 28 виміру концентрації  $\text{CH}_2\text{O}$  в атмосферному повітрі. Там же вертикальними маркерами (пунктирні лінії) відзначені фіксовані значення розміру околиці  $\varepsilon$ , яка дорівнюють  $0,0015$  та  $0,008$  відповідно рис. 5.30 а, в.

Виходячи з п. 4.2.1, міра  $M_1$  є оцінкою поточної імовірності РС концентрацій  $\text{CH}_2\text{O}$  в атмосферному повітрі. Тому залежності на рис. 5.31, по суті, ілюструють залежність поточної імовірності РС концентрацій формальдегіду для фіксованих моментів часу вимірів від величини розміру  $\varepsilon$ .

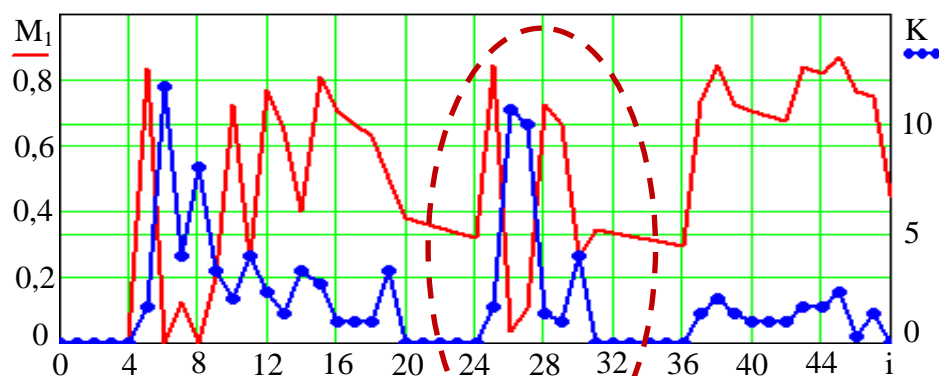




а)



б)



в)

Рис. 5.30 – Динаміка міри  $M_1$  РС для концентрації  $\text{CH}_2\text{O}$  в атмосферному повітрі при різних розмірах  $\varepsilon$ : а –  $\varepsilon=0,0015$ ; б –  $\varepsilon=0,0025$ ; в –  $\varepsilon=0,008$ .

Аналіз експериментальної динаміки міри  $M_1$  РС для концентрації  $\text{CH}_2\text{O}$  в атмосферному повітрі (рис. 5.30) протягом тестового інтервалу спостереження свідчить про її нерівномірність. Так, максимальна величина міри змінюється в інтервалі від 0,35 до 0,8. При цьому варто відмітити, що

максимальні значення міри протягом інтервалу спостереження залежать від розміру  $\varepsilon$ . Зі збільшенням розміру  $\varepsilon$  має місце збільшення максимальних значень міри. Однак характер динаміки міри протягом інтервалу залишається схожим. Важливим є характер динаміки міри в інтервалі 23–32 відлік (на рис. 5.30 зазначена область виділена штриховою лінією). Подібний характер динаміки міри характерний і для інших інтервалів, що належать базовому інтервалу спостереження (рис. 5.30). При цьому максимуму концентрацій  $\text{CH}_2\text{O}$  в атмосферному повітрі в пункті контролю відповідають мінімуми значень міри  $M_1$  (близькі до нуля). Тому, нульові значення міри можуть розглядатися як індикатори для попередження НС внаслідок наявності шкідливих речовин в атмосферному повітрі або порушень технологічних процесів на ОКІ, пов'язаних зі збільшенням рівня викидів небезпечних речовин в атмосферне повітря.

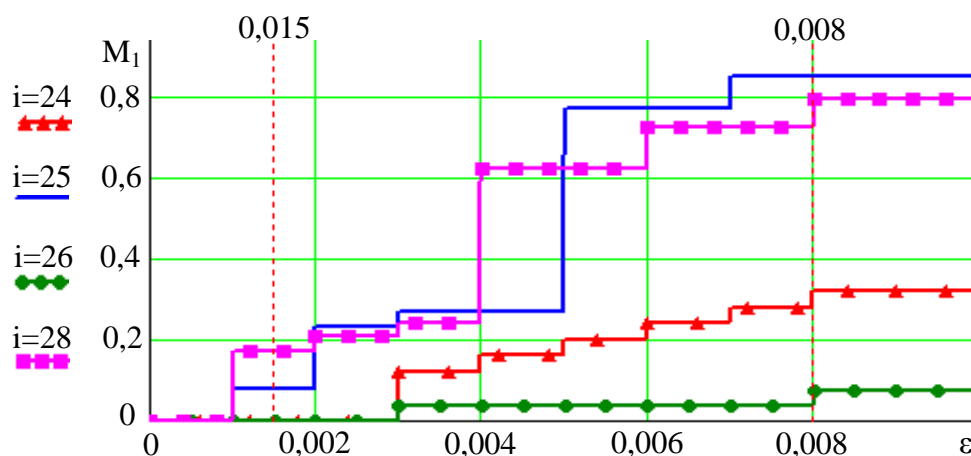


Рис. 5.31 – Залежності міри  $M_1$  від розміру  $\varepsilon$  для різних фіксованих моментів  $i$  часу вимірювання

Особливий характер динаміки міри РС на рис. 5.30 показує, що перед початком небезпечного стану (28 відлік) має місце високе значення РС, що різко зменшується в момент 28 відліку до нуля або близького до нуля значення. Після чого має різке збільшення величини міри. Поява небезпечного стану пов'язана з різким переходом від РС концентрації

забруднення атмосфери до втрати рекурентності з подальшим відновленням колишньої РС. При цьому моменти часу появи високих значень міри РС для концентрації забруднень атмосферного повітря можна розглядати як провісників виникнення небезпечних станів на об'єктах, пов'язаних зі значними викидами в атмосферу. Наявність високих значень міри РС забруднень атмосфери в моменти, що передують їх максимальній концентрації, дозволяють попереджати НС на ОКІ шляхом прийняття адекватних управлінських рішень на самому об'єкті.

Залежності міри РС  $M_1$  від розміру  $\epsilon$  для різних моментів вимірювання (рис. 5.31) показують, що кращими щодо попередження НС на ОКІ є розміри  $\epsilon$ , які належать інтервалу від 0,0015 до 0,008 (від 0,5 ГДК до 2,7 ГДК для формальдегіду).

Таким чином, експериментальна перевірка на прикладі динаміки концентрацій двоокису азоту та формальдегіду підтвердила можливість використання запропонованих чисельних мір РС забрудненої атмосфери на основі RP для виявлення небезпечних станів забрудненої атмосфери та попередження НС внаслідок наявності шкідливих речовин в атмосферному повітрі понад ГДК. Підтверджено, що можливості попередження НС на основі запропонованих чисельних мір залежать від розміру області РС, яку необхідно задавати апріорно.

### **5.2.2.3 Експериментальна перевірка запропонованих чисельних мір рекурентних станів забруднення атмосферного повітря на основі функції невизначеності**

Експериментальна перевірка здійснювалася на основі виміру реальних перевищень концентраціями забруднюючих атмосферне повітря речовин їх ГДК<sub>с.д.</sub>. В якості прикладу забруднюючих речовин, розглядалися формальдегід, аміак та оксид вуглецю. За для перевірки обиралися виміри концентрацій, які належать обмеженому інтервалу від 490 до 520 відліку, де мала місце достовірна небезпечна подія (506 відлік) щодо стану забруднення

атмосферного повітря [432]. На рис. 5.32, а, б наведені результати обчислення ФН (4.23) у площині час-затримка для різного числа відліків у вікні усереднення, які дорівнювали відповідно дві (8 відліків) та одну (4 відліку) добу.

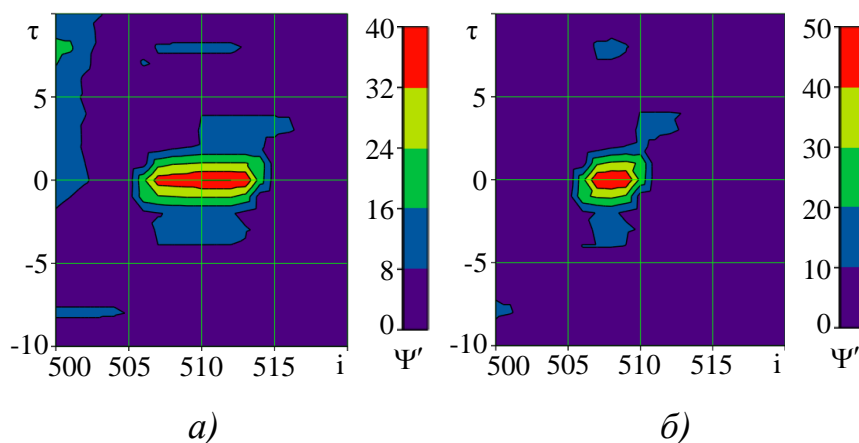


Рис. 5.32 – Вплив величини вікна усереднення при обчисленні ФН (4.23) у площині час – затримка: а – 8 відліків; б – 4 відліки

Аналогічні результати, але в площині час – масштаб часу наведені на рис. 5.33.

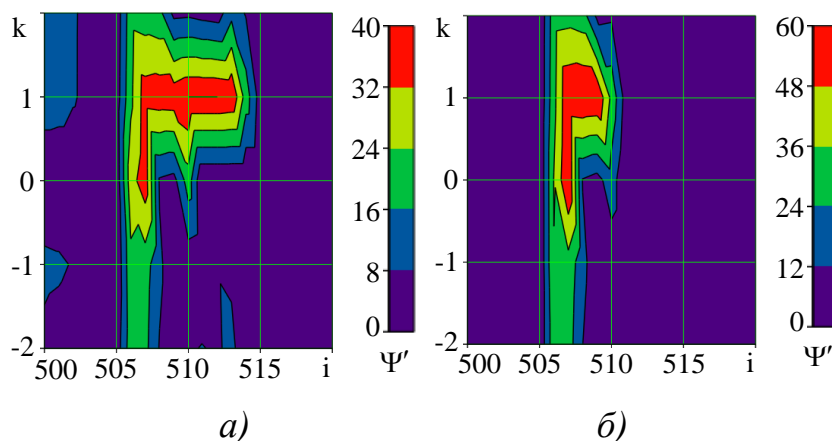


Рис. 5.33 – Вплив величини вікна усереднення при обчисленні ФН (4.23) у площині час – масштаб часу: а – 8 відліків; б – 4 відліку

На рис. 5.34, а, б наведені результати обчислення ФН (4.23) у площині затримка – масштаб часу для різної кількості відліків у вікні усереднення для

дискретного моменту часу  $i=506$ .

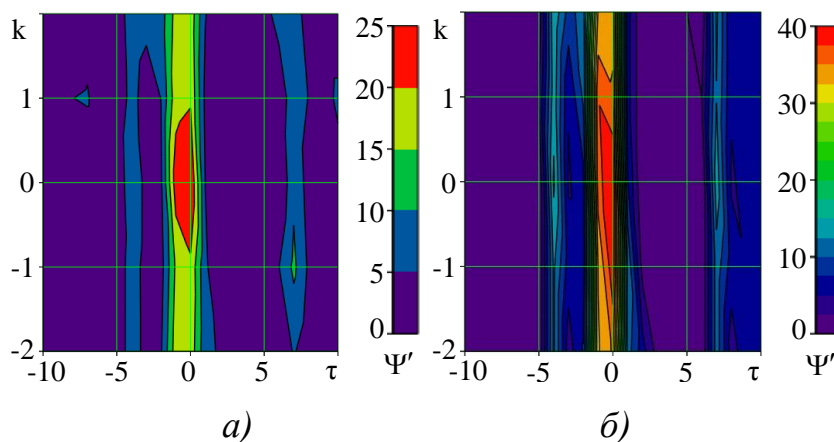


Рис. 5.34 – Вплив величини вікна усереднення при обчисленні ФН (4.23) у площині затримка – масштаб часу: а – 8 відліків; б – 4 відліку

Ілюстрація динаміки ФН, що визначається (4.24), у площинні час – затримка та час – масштаб часу при фіксованій величині вікна усереднення в одну добу (4 відліку) для різних параметрів, які характеризуються нульовою радіальною швидкістю  $V$  забруднення атмосферного повітря ( $k=1$ ) та нульовою затримкою, наведена на рис. 5.35, а, б відповідно.

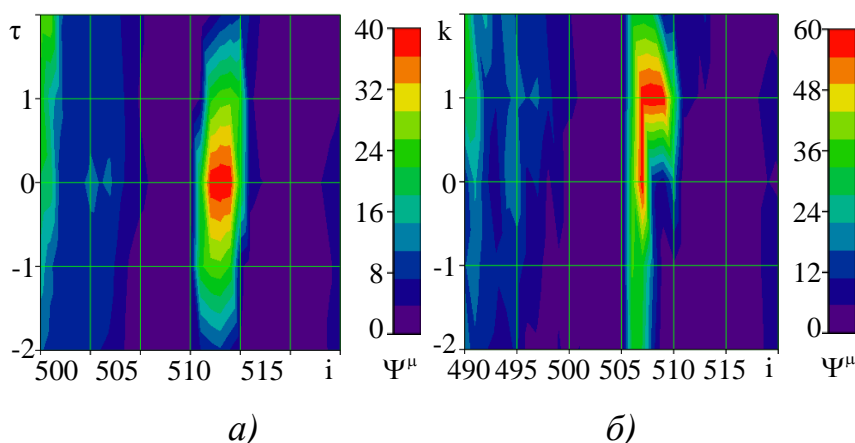


Рис. 5.35 – Динаміка ФН (4.24) станів атмосферних забруднень у вікні усереднення, яка дорівнює 4 відлікам для різних параметрів: а – нульова радіальна швидкість  $V$  забруднень ( $k=1$ ); б – нульова затримка

На рис. 5.36 наведений вид поточної ФН (4.24) у традиційних

координатах затримка – масштаб часу щодо фіксованого дискретного моменту часу  $i=506$  при різних значеннях величини вікна усереднення, який дорівнюють двом добам (8 відліків) та одній добі (4 відліки) відповідно.

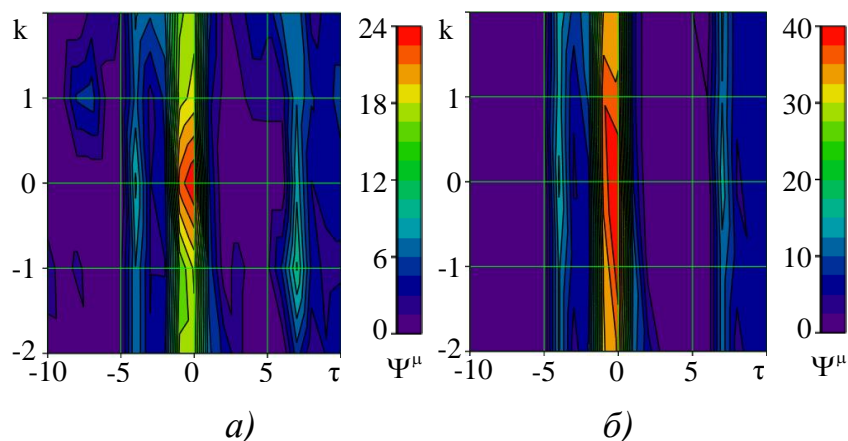


Рис. 5.36 – Вид поточної ФН (4.24) атмосферних забруднень у координатах затримка – масштаб часу щодо дискретного моменту часу  $i=506$  при значеннях величини вікна усереднення: а – 8 відліків; б – 4 відліки

З аналізу даних на рис. 5.36 слідує, що визначення ФН атмосферних забруднень в координатах затримка – масштаб часу для дискретного моменту часу властиві деякі переваги щодо вибору широких вікон усереднення. Разом з тим, результати, що наведені на рис. 5.32, свідчать в цілому про вплив ширини вікна усереднення при обчисленні ФН, яка визначається (4.23), на можливості виявлення та локалізації небезпечних станів забруднення атмосферного повітря. Для найкращої локалізації небезпечних станів забруднення атмосферного повітря у часі з використанням ФН необхідно застосовувати вузькі вікна, тривалість яких не перевищує однієї доби. Якщо тривалість вікна усереднення становить дві доби, то перетин ФН розширюється та зміщується у бік попередніх моментів часу. При цьому оптимальні значення локалізації у часі досягаються для нульової затримки при визначенні ФН. Аналогічні вимоги щодо ширини вікна залишаються справедливими щодо обчислення (4.23) також у випадку використання масштабу часу (рис. 5.33). Величина масштабу часу при цьому не тільки

забезпечує локалізацію небезпечних станів атмосферних забруднень у часі, але й дозволяє виявляти причини їх виникнення, зумовлені радіальними швидкостями переміщення забруднень неоднорідною атмосферою. З аналізу даних, наведених на рис. 5.34, бачимо, що ФН (4.23) для дискретного моменту часу  $i=506$  у площині затримка – масштаб часу слабо залежить від затримки для різної кількості відліків у вікні усереднення. Однак, значення ФН щодо осі масштаб часу істотно залежить від ширини вікна усереднення. При цьому для ширини вікна 8 відліків локалізація небезпечних забруднень щодо осі масштаб часу виявляється вдвічі кращим в порівнянні із шириною вікна у випадку 4 відліків.

Ілюстрація динаміки ФН, що визначається (4.24), у площині час – затримка та час – масштаб часу при фіксованому вікні усереднення в 4 відліки для різних параметрів, які характеризуються нульовою радіальною швидкістю  $V$  забруднення атмосферного повітря та нульовою затримкою (рис. 5.35) свідчать про переваги використання ФН щодо виявлення небезпечних станів забруднення атмосферного повітря. Зазначені переваги визначають можливості використання ФН щодо виявлення небезпечних станів забруднення атмосферного повітря за допомогою енергетичних та швидкісних параметрів. При цьому метеорологічна інформація про поточний стан атмосфери не використовується. Вид ФН (4.24), наведений на рис. 5.36, у площині затримка – масштаб часу для дискретного моменту часу  $i=506$  показує деякі переваги вибору широких вікон усереднення. Ці результати перевірки не суперечать можливостям, представленим на рис. 5.34.

Результати перевірки свідчать про те, що використання ФН забезпечує оперативне та надійне виявлення небезпечних станів забруднення атмосферного повітря. При цьому не потрібна поточна метеорологічна інформація в районі контролю забруднення атмосферного повітря. Це істотно підвищує ефективність оперативного виявлення небезпечних станів при забрудненні атмосферного повітря.

Отримані результати можуть бути покладені в основу модернізації

існуючих методик оцінювання атмосферних забруднень, які засновані на обчисленні тільки середньорічних ГДК. Відомо, що середні значення ГДК є досить грубою оцінкою забруднення атмосферного повітря. Часто на практиці використання усереднених ГДК не дозволяють оперативно виявляти небезпечні стани забруднення атмосферного повітря, що спричиняють негативний вплив на людину та навколишнє середовище. Застосування ФН дозволить за поточними концентраціями, вимірюваних на існуючих стаціонарних постах контролю забруднень атмосфери виявляти небезпечні стани для будь-якої сукупності забруднювачів у реальному часі. Обчислення ФН щодо вимірюваних концентрацій забруднювачів не представляє особливих труднощів. Розрахунки, з використанням наведених алгоритмів, можна здійснювати на будь-якому середнього рівня персональних комп'ютерах. Можливість одночасного виявлення ламінарних станів в атмосфері дозволяє прогнозувати зростання концентрацій забруднювачів атмосфери. Результати прогнозування можна використовувати, наприклад, для розробки оперативних ефективних управлінських рішень щодо зниження рівня шкідливих викидів в атмосферне повітря. Це дозволить не допустити накопичення забруднювачів в атмосферному повітрі та попереджати виникнення небезпечних станів (НС), які є шкідливими для людини та навколишнього середовища.

До обмежень розглянутих результатів можна віднести досить великий інтервал дискретного вимірювання даних про концентрацію забруднень, що визначається 6 годинами (вимога керівних документів для стаціонарних постів контролю). Це в деякій мірі звужує можливості запропонованого підходу до виявлення та прогнозування небезпечних станів на основі радіальної швидкості руху забруднень відносно пункту контролю.

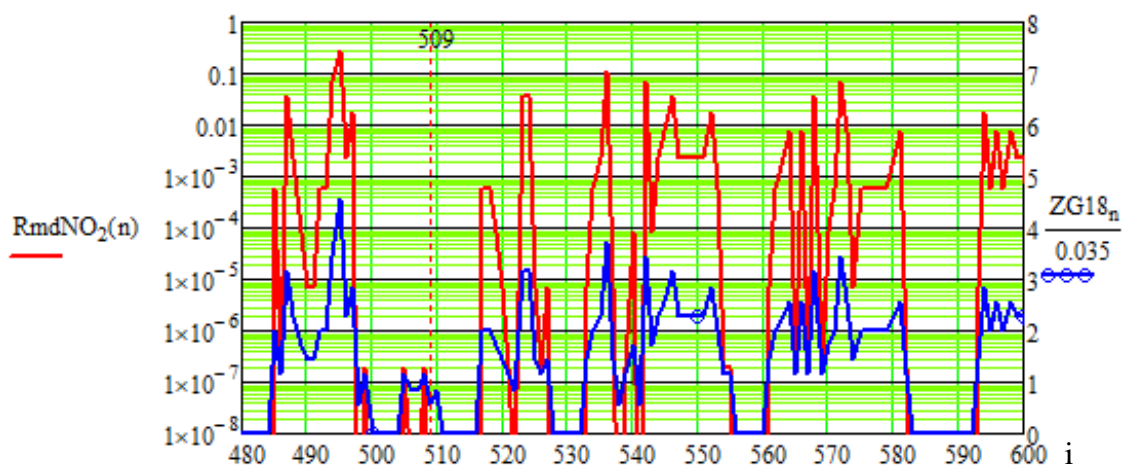
Таким чином, експериментально підтверджена можливість застосування ФН для оперативного виявлення небезпечних станів атмосферних забруднень. Отримані результати свідчать про переваги використання ФН щодо поточних вимірюваних концентрацій атмосферних



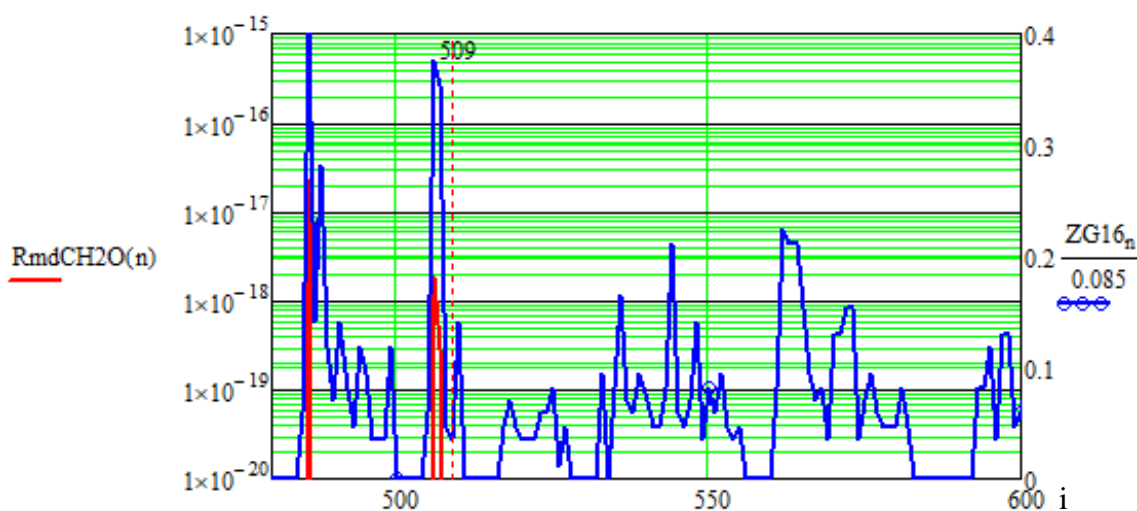
забруднень з метою виявлення небезпечних станів забруднень на підставі їх сумісних енергетичних та швидкісних властивостей. Експериментально встановлено, що ширина вікна усереднення для вимірюваних концентрацій забруднювачів не повинна перевищувати величину від 4 до 8 відліків (від доби до двох діб) щодо регламентованої програми контролю атмосферних забруднень на стаціонарних постах.

#### **5.2.2.4 Експериментальна перевірка залежностей ризику негайних ефектів і хронічної інтоксикації від концентрацій шкідливих речовин, що забруднюють атмосферне повітря на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури**

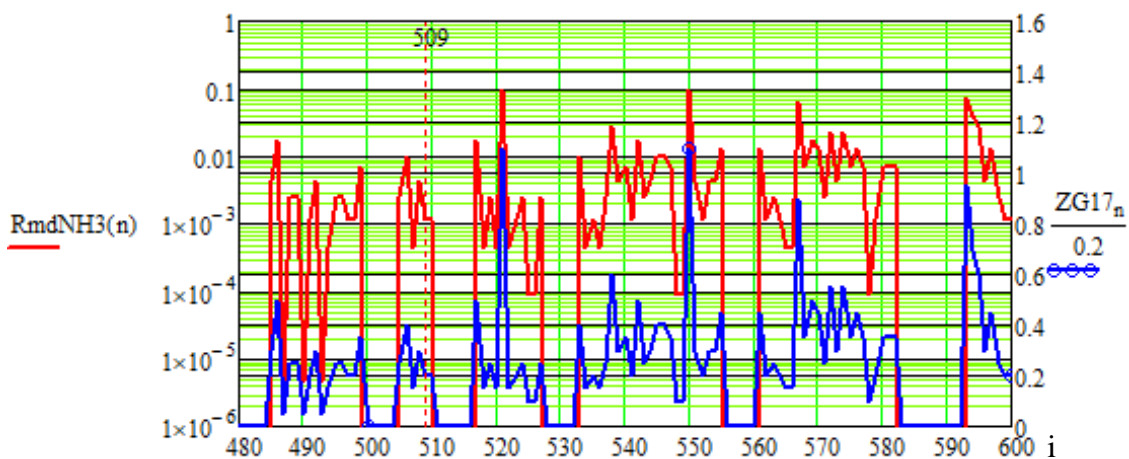
У розділі 4 було показано, що сьома та восьма залежності у запропонованій математичній моделі забрудненої атмосфери населених місць дозволяють визначати ризик негайних токсичних ефектів та ризик хронічної інтоксикації, обумовлених шкідливими для людини забруднювачами атмосферного повітря. Для експериментальної перевірки вказаних залежностей ризику розглядалися експериментальні дані щодо концентрацій двоокису азоту (2 клас безпеки), формальдегіду (2 клас безпеки) та аміаку (4 клас безпеки). Концентрації зазначених забруднювачів вимірювались на одному з маршрутних постів протягом травня 2018 року (інтервал дискретних вимірів визначався від  $i=480$  до  $i=600$  відліку). Щодоби здійснювались по 4 виміри концентрацій кожного із зазначених шкідливих забруднювачів атмосферного повітря [403]. На рис. 5.37 наведені експериментальні залежності ризику негайних токсичних ефектів для двоокису азоту, формальдегіду та аміаку в атмосферному повітрі для вимірюваних значень.



а)



б)



в)

Рис. 5.37 – Експериментальні залежності ризику негайних токсичних ефектів для різних забруднювачів атмосферного повітря: а – двоокис азоту; б – формальдегід; в – аміак

Межі перехідної зони щодо прийнятного індивідуального ризику в

цьому випадку будуть визначатися відповідно  $5,708 \cdot 10^{-8}$  та  $5,708 \cdot 10^{-11}$ .

Аналіз залежностей на рис. 5.37 з урахуванням зазначених меж перехідної зони прийняттого індивідуального ризику свідчить, що тільки для формальдегіду ризик негайних токсичних ефектів виявляється нижче нижньої границі перехідної зони. Це означає, що концентрація формальдегіду в атмосферному повітрі на вимірюваному інтервалі з урахуванням ризику негайних токсичних ефектів для людини виявляється допустимою.

На рис. 5.37 маркером позначений відлік  $i=509$ , який належить до інтервалу наявності небезпечного для людини забруднення атмосфери (червоний колір). Тому концентрації двоокису азоту та аміаку потрапили в зону недопустимого індивідуального ризику негайних токсичних ефектів для людини.

На рис. 5.38 представлена експериментальна динаміка ризику хронічної інтоксикації для розглянутих вище забруднювачів атмосферного повітря. Зазначений ризик відповідає ризику хронічної інтоксикації протягом 1 року. Тому його можна порівнювати із загальноприйнятими світовими показниками прийняттого індивідуального ризику. Величина цього ризику розраховується для поточної середньої добової концентрації забруднювачів.

З урахуванням границь щодо недопустимого індивідуального ризику для людини понад  $10^{-3}$ , експериментальна величина ризику хронічної інтоксикації від розглянутих забруднювачів атмосферного повітря виявляється недопустимою (рис. 5.38). Це не суперечить результатам, отриманим вище для розглянутого тестового інтервалу, який включає 509 відлік.

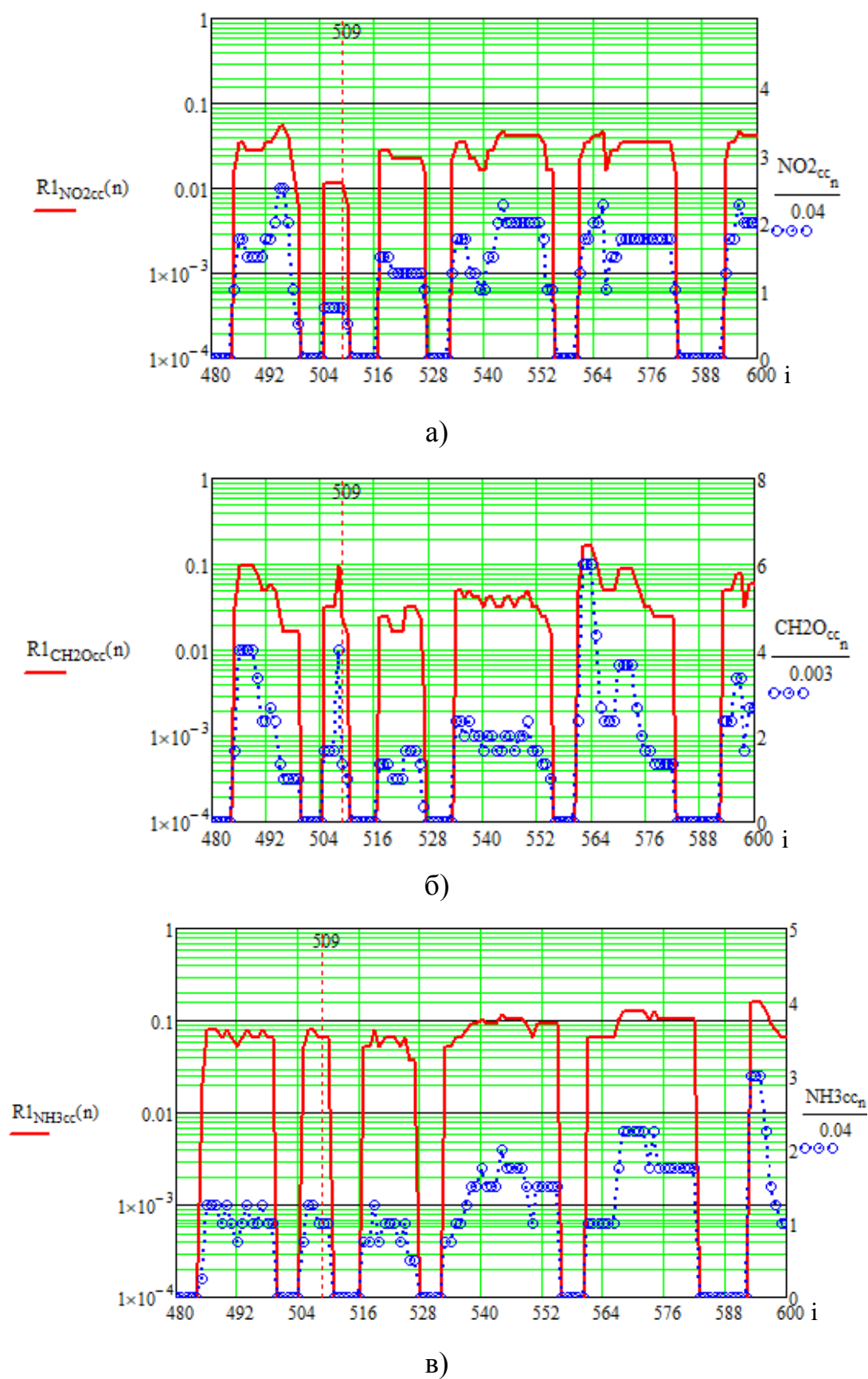


Рис. 5.38 – Експериментальні залежності ризику хронічної інтоксикації для різних забруднювачів атмосферного повітря: а – двоокис азоту; б – формальдегід; в – аміак

Таким чином, експериментально підтверджено ефективність використання сьомої та восьмої залежностей у запропонованій моделі визначення ризику негайних ефектів та хронічної інтоксикації для людини від концентрацій розглянутих шкідливих речовин, що забруднюють атмосферу населених місць. Отримані залежності ризику для людини від атмосферних забруднень дозволяють чисельно визначати небезпеку впливу забруднень для населених місць із метою прийняття відповідних оперативних управлінських рішень, спрямованих на попередження можливих НС внаслідок наявності шкідливих речовин в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) ОКІ понад ГДК з точки зору життєдіяльності людини.

### **5.2.3 Перевірка достовірності інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури**

Перевірка достовірності розробленого інженерно-технічного методу попередження НС внаслідок наявності в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) ОКІ здійснювалася на прикладі реальних вимірів концентрації забруднень атмосферного повітря в період достовірної надзвичайної події, яка трапилась 8 травня 2018 року в м. Черкасах. Під час ранкової лінійки в школі №8 з нагоди Дня пам'яті та примирення учні 2–9 класів почали втрачати свідомість. У результаті було госпіталізовано два вчителі та 53 школяра. Відзначалося, що в потерпілих спостерігалися нудота, блювота, запаморочення та головний біль.

Слід зазначити, що згідно з даними Черкаського обласного центра гідрометеорології в період із січня по червень 2018 року мало місце перевищення забруднення атмосферного повітря аміаком, двоокисом азоту та формальдегідом понад ГДК (аміак (0,75-1,3) ГДК, двоокис азоту (0,75-4,0) ГДК, формальдегід (2,0-2,7) ГДК). Найбільші концентрації домішок

відзначалися в Дніпровському мікрорайоні (пост №3) та центрі міста (пост №2). Враховуючи те, що формальдегід є алергеном та канцерогеном, може спричиняти виникнення онкологічних захворювань та здійснює на організм людини загальну токсичну дію, дослідження його вмісту в повітрі (особливо густозаселених районів), основних джерел надходження та фотохімічних реакцій за його участю набувають особливої актуальності, адже, знання цих особливостей дадуть змогу наблизитися до вирішення проблеми прогнозування та зниження концентрацій цієї домішки в повітрі з метою попередження НС внаслідок наявності в атмосферному повітрі шкідливих речовин понад ГДК.

Відповідно до документів, що регламентують вміст забруднюючих речовин в атмосферному повітрі населених місць України, формальдегід – це токсична речовина II класу небезпеки, для якої  $\text{ГДК}_{\text{с.д.}}$  дорівнює  $0,003 \text{ мг/м}^3$ , а  $\text{ГДК}_{\text{м.р.}}$  –  $0,035 \text{ мг/м}^3$ . В [472] зазначається, що оскільки формальдегід належить до реакційно-здатних сумішей, його вміст в атмосфері формується як результат динамічної рівноваги між джерелами та стоками. Тривалість перебування в атмосфері визначається процесами фоторозкладу та взаємодією з реакційно здатними частинками. Тривалість перебування формальдегіду значною мірою визначається інтенсивністю сонячної радіації (яка залежить від географічної широти місцевості та висоти Сонця над горизонтом) і може суттєво відрізнятись в різні сезони та частини доби.

Утворення формальдегіду в реакційній суміші в концентраціях близьких до атмосферних зафіксовано в процесах фотохімічного окислення метану, етану, ізопрену, етилену, 1-бутену, пропілену, ізопрену, толуолу, алкенів C5-C8, метанолу, диметилсульфіду, стиролу, окремих ацетиленових вуглеводнів [51]. За наявності в повітрі оксидів азоту утворення формальдегіду з органічних домішок відбувається за участі атомів кисню та озону, що утворюються в результаті фотолізу  $\text{NO}_2$ . Ці процеси відбуваються в безвітряну ясну сонячну погоду – за метеорологічних умов, що сприяють накопиченню домішок та подальшим їх трансформаціям.

Отже, у великих містах надходження формальдегіду в атмосферне повітря формується за рахунок первинних джерел (тобто – безпосередньо з джерел викидів) та вторинних (утворення цієї забруднювальної домішки з прекурсорів за сприятливих умов внаслідок фотохімічних реакцій в атмосфері).

Достовірність розробленого інженерно-технічного методу попередження НС техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) ОКІ оцінювалася на основі реальних вимірів концентрації аміаку, двоокису азоту та формальдегіду в атмосферному повітрі на трьох стаціонарних постах контролю, розташованих навколо школи №8 у місті Черкаси (рис. 5.39). Вимірювання здійснювались в інтервалі часу, що охоплює момент виникнення розглянутої вище достовірної небезпечної події.

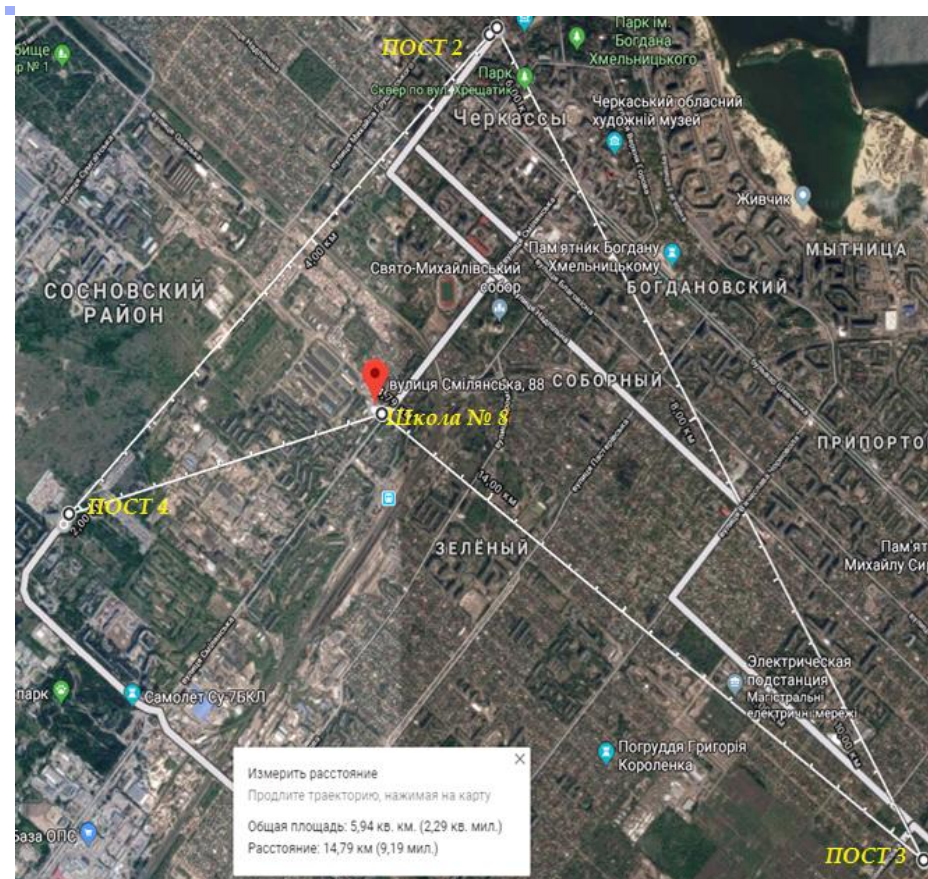


Рис. 5.39 – Схема розташування стаціонарних постів та школи № 8

Використовувались реальні виміри щодо перевищення концентраціями двоокису азоту (2 клас небезпеки), формальдегіду (2 клас небезпеки) та аміаку (4 клас небезпеки) ГДК протягом вказаного інтервалу часу, що пов'язаний з достовірною небезпечною подією у травні 2018 року (умовний інтервал дискретних вимірів від 480 до 600 відліку). Щодоби шість разів у неділю на кожному з постів здійснювалось по 4 (1.00, 7.00, 13.00, 19.00) вимірювання концентрацій відповідних забруднювачів атмосферного повітря. Варто відмітити, що концентрації формальдегіду контролювалися тільки постом № 3. На рис. 5.40 наведені вимірювані перевищення ГДК для поста № 3.

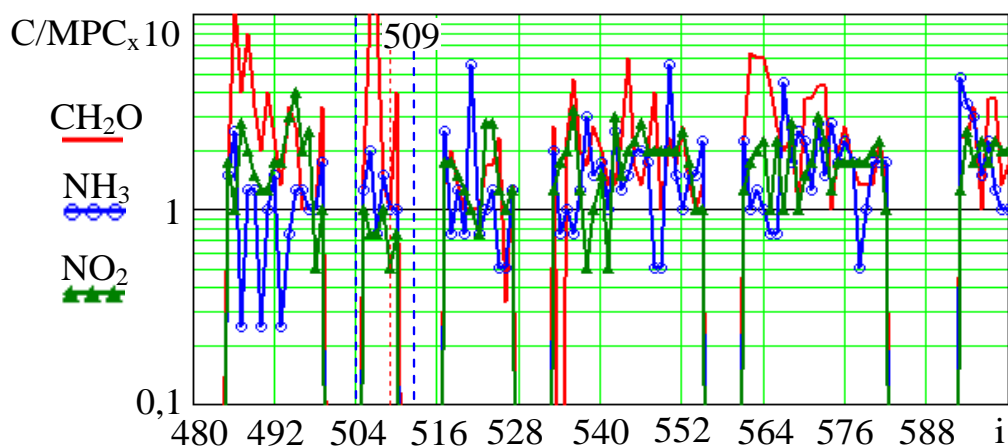


Рис. 5.40 – Експериментальні вимірювання перевищень концентраціями двоокису азоту, формальдегіду та аміаку відповідних ГДК ( $MPC_x$ )

Інтервал розглянутої небезпечної події, на рис. 5.40 позначений пунктирними лініями синього кольору. Відповідно до запропонованого інженерно-технічного методу та математичної моделі забрудненої атмосфери населених місць (п. 4.1.6) вимірялися концентрації відповідних забруднювачів атмосферного повітря. За цими вимірюваннями визначалися поточні РС забруднень, а також поточні ризики хронічної та миттєвої дії на людину. При цьому достовірність запропонованого методу визначалась його здатністю щодо виявлення факту цієї небезпечної події, пов'язаною із



забрудненням атмосферного повітря, на основі поточної імовірності РС щодо окремих забруднювачів та відповідним перевищенням поточними ризиками хронічної та миттєвої дії забруднень на здоров'я людини, понад рівень недопустимого індивідуального ризику.

В якості ілюстрації на рис. 5.41 наведені вимірювані перевищення концентраціями відповідних забруднювачів атмосферного повітря відповідних ГДК, поточні імовірності РС забруднювачів та ризики хронічної дії на здоров'я людини щодо розглянутого інтервалу появи небезпечної події для поста №3 (рис. 5.40).

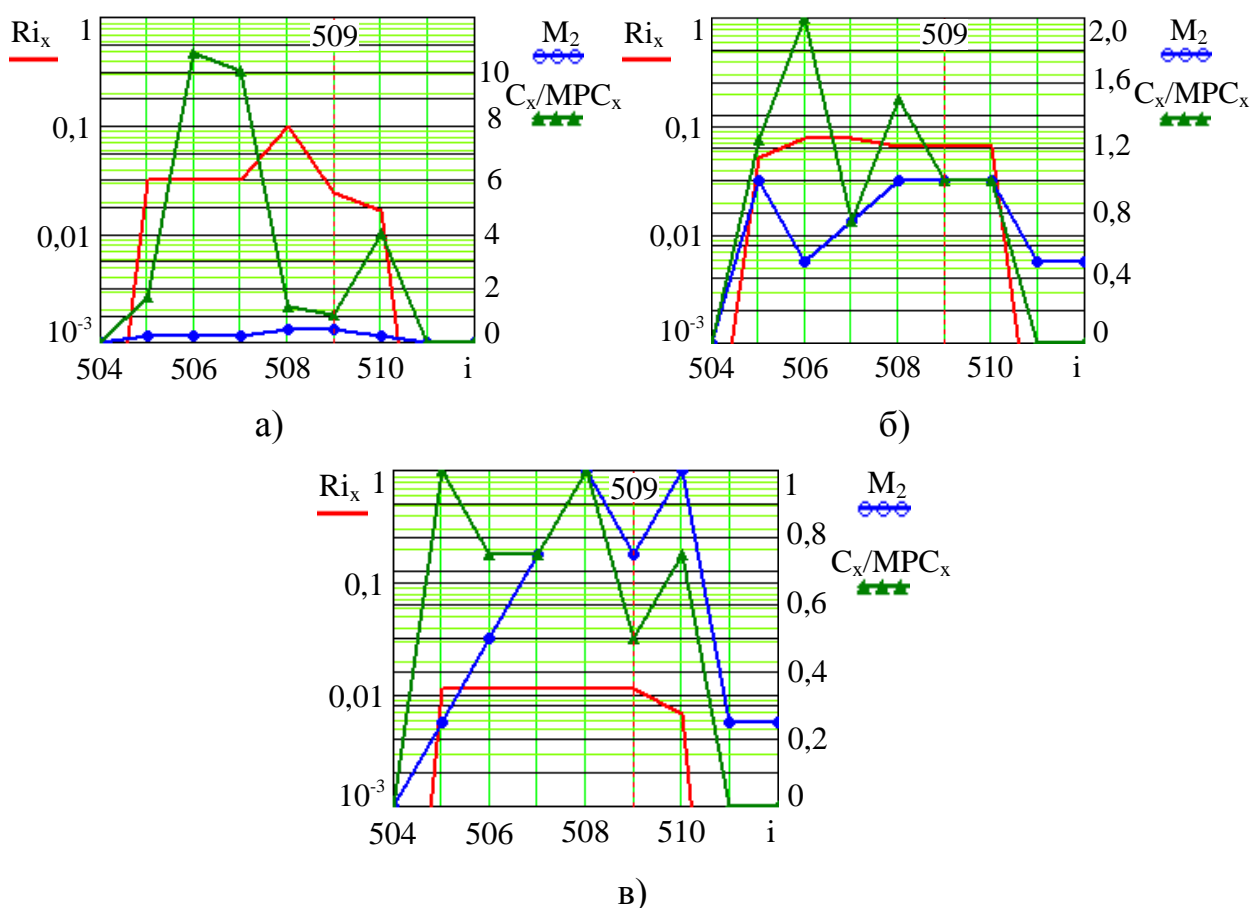
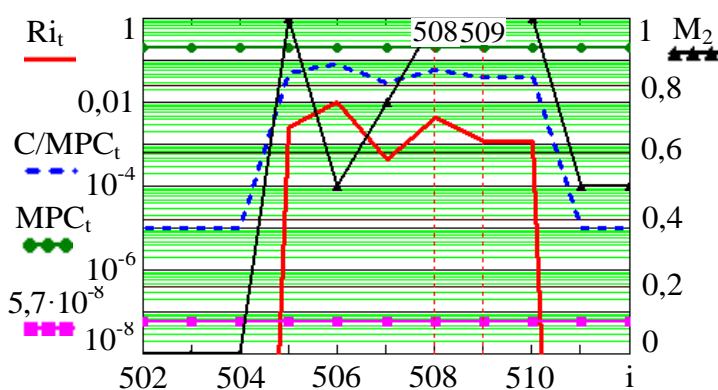


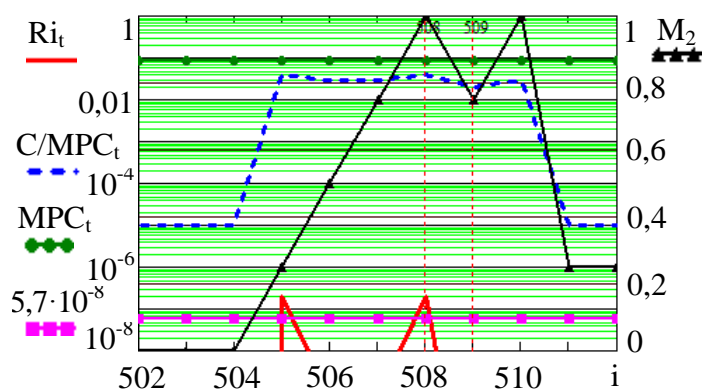
Рис. 5.41 – Динаміка ризиків хронічної дії, вимірюваних перевищень концентраціями забруднювачів атмосферного повітря відповідних ГДК, а також поточних ймовірностей РС забруднювачів: а – формальдегід; б – аміак; в – двоокис азоту

За результатами експериментальних вимірювань перевищень концентраціями формальдегіду ПДК встановлено, що ризик миттєвої дії на здоров'я людини на розглянутому інтервалі виявився нижче рівня прийняттого індивідуального ризику. Тому надалі для перевірки запропонованого інженерно-технічного методу розглядалися на всіх постах контролю тільки концентрації аміаку та двоокису азоту.

На рис. 5.42 наведена динаміка ризику миттєвої дії, концентрації аміаку та двоокису азоту, а також імовірності РС щодо зазначених забруднювачів атмосферного повітря на вказаному інтервалі для поста №3. Крім цього на рис. 5.42 наведені значення відповідних  $\Gamma\text{ДК}_{\text{м.р.}}$  та перерахованої границі щодо неприйняттого індивідуального ризику.



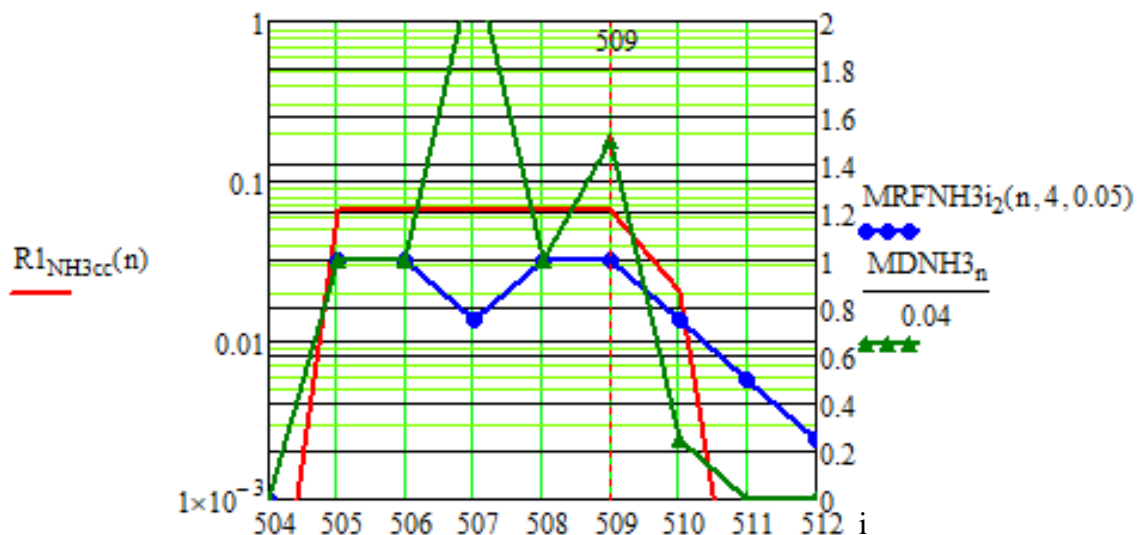
а)



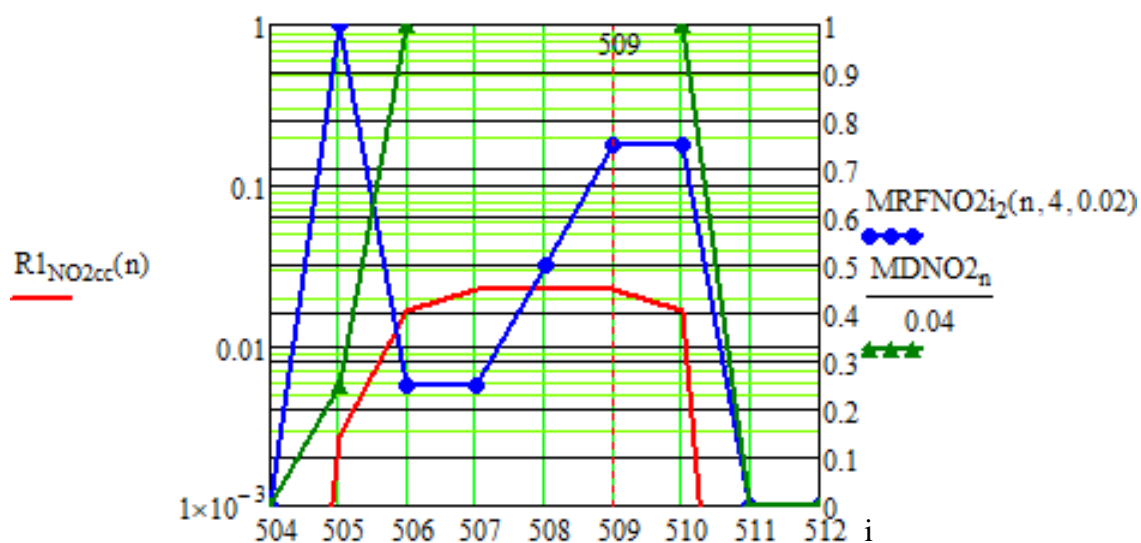
б)

Рис. 5.42 – Динаміка ризику миттєвої дії, вимірюваних концентрацій забруднювачів атмосферного повітря, а також ймовірностей РС забруднювачів: а – аміак; б – двоокис азоту

Динаміка ризику хронічної дії, вимірюваних перевищень концентраціями забруднювачів атмосферного повітря (аміак та двоокис азоту) відповідних ГДК та ймовірностей РС забруднювачів (пост №2) наведені на рис. 5.43.



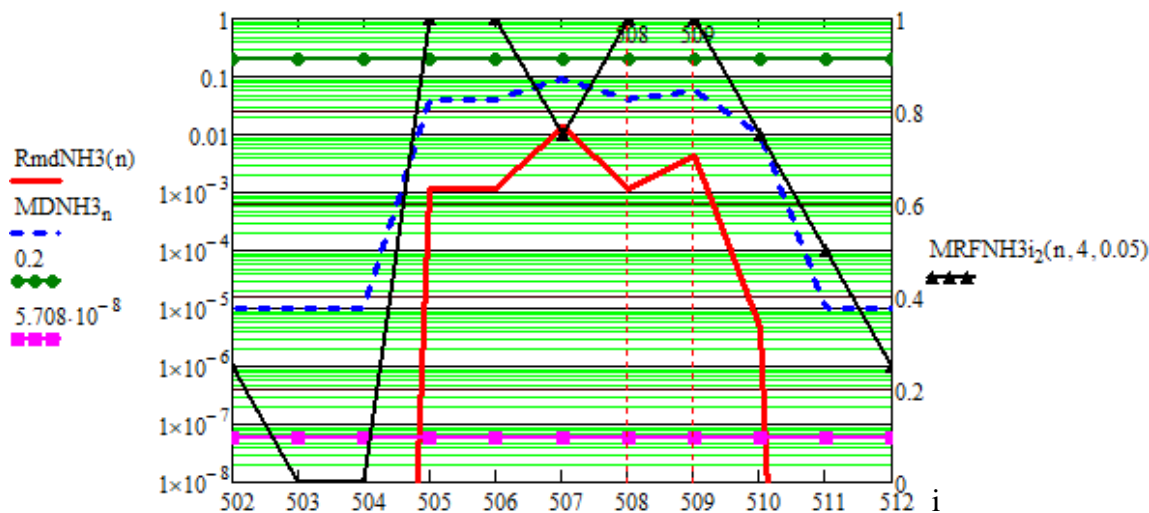
а)



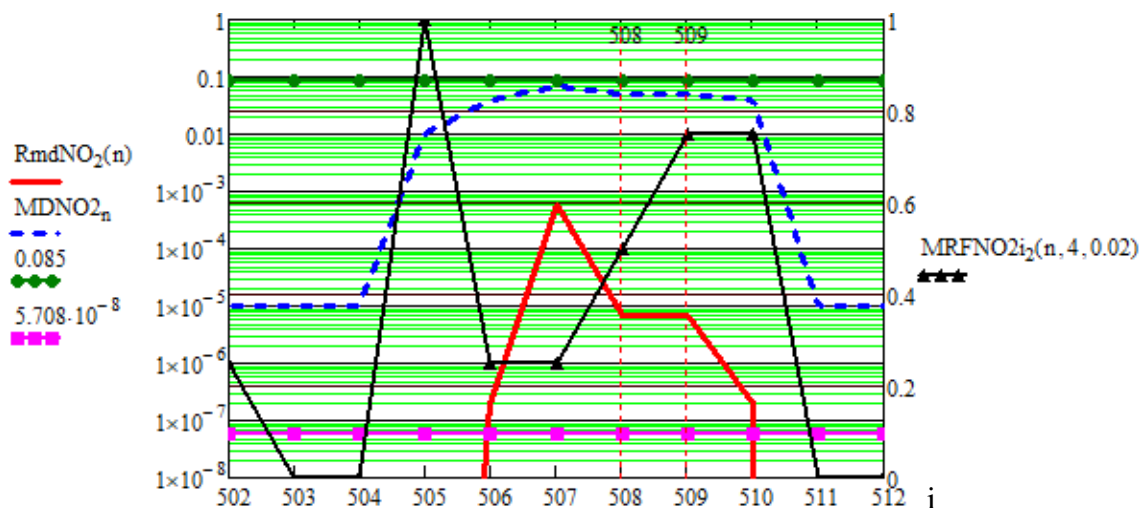
б)

Рис. 5.43 – Динаміка ризику хронічної дії, вимірюваних перевищень концентраціями забруднювачів атмосферного повітря відповідних ГДК, а також ймовірностей РС забруднювачів: а – аміак; б – двоокис азоту

Динаміка ризику миттєвої дії, вимірюваних концентрацій забруднювачів атмосферного повітря (аміак та двоокис азоту), ймовірностей РС забруднювачів та відповідних ГДК і перерахованої границі недопустимого індивідуального ризику (пост №3) наведені на рис. 5.44.



а)

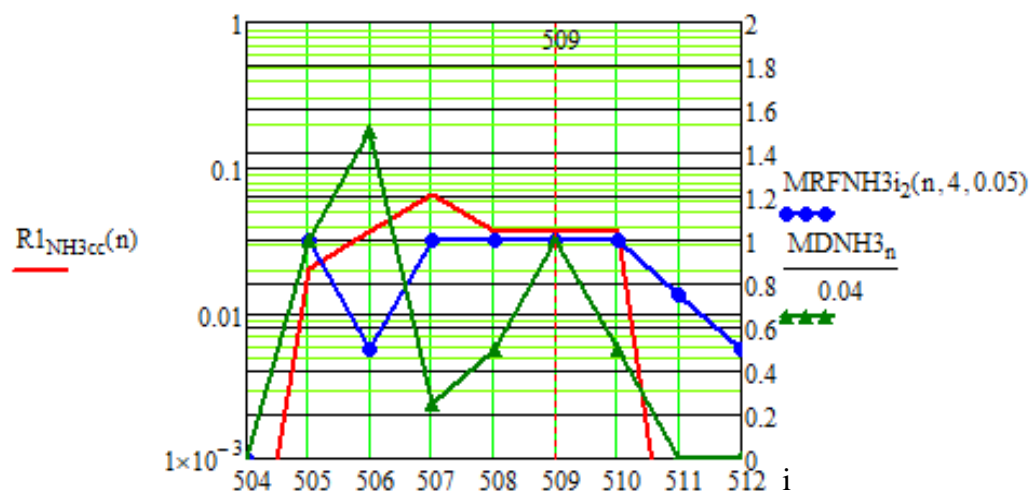


б)

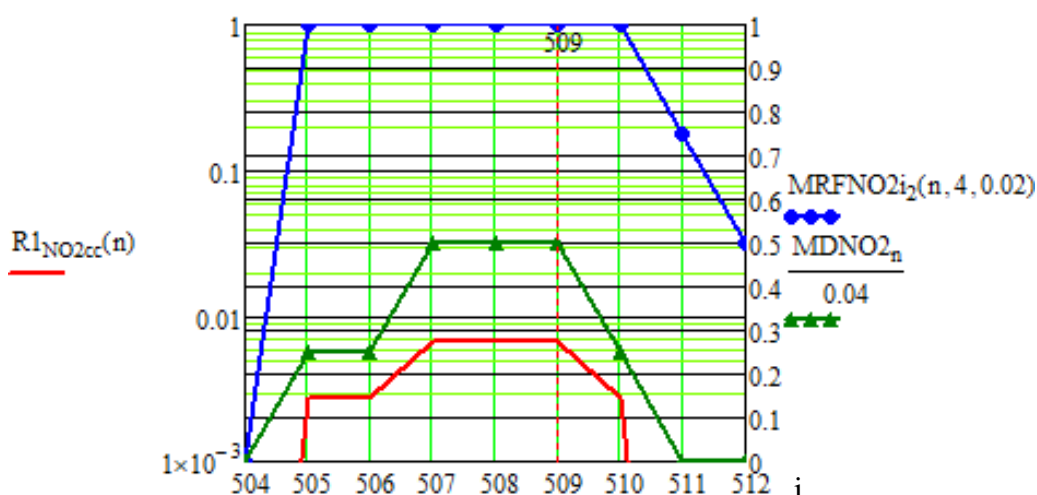
Рис. 5.44 – Динаміка ризику миттєвої дії, вимірюваних концентрацій забруднювачів атмосферного повітря, а також ймовірностей РС забруднювачів: а – аміак; б – двоокис азоту

Залежності динаміки ризику хронічної дії, вимірюваних перевищень

концентраціями забруднювачів атмосферного повітря (аміак та двоокис азоту) відповідних ГДК, ймовірностей РС забруднювачів (пост №4) наведені на рис. 5.45.



а)



б)

Рис. 5.45 – Динаміка ризику хронічної дії, вимірюваних перевищень концентраціями забруднювачів атмосферного повітря відповідних ГДК, а також ймовірностей РС забруднювачів: а – аміак; б – двоокис азоту

Динаміка ризику миттєвої дії, вимірюваних концентрацій забруднювачів атмосферного повітря (аміак та двоокис азоту), відповідних ГДК, ймовірностей РС забруднювачів (пост №4) та перерахованої границі недопустимого індивідуального ризику наведені на рис. 5.46.

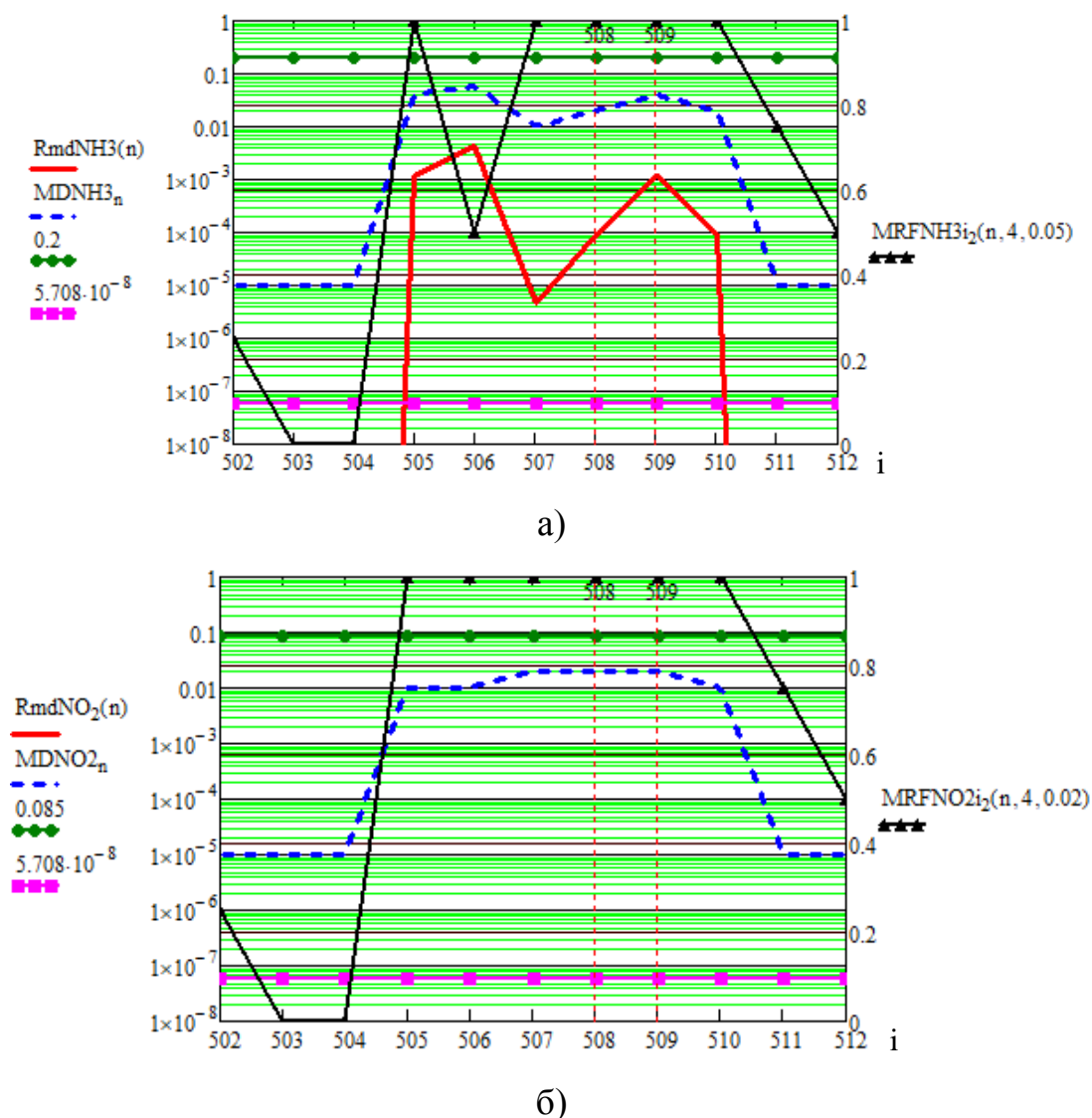


Рис. 5.46 – Динаміка ризику миттєвої дії, вимірюваних концентрацій забруднювачів атмосферного повітря, відповідних ГДК та ймовірностей РС забруднювачів: а – аміак; б – двоокис азоту

Варто зауважити, що на рис. 5.46, б динаміка ризику миттєвої дії відсутня, оскільки вона перебуває значно нижче границі неприйняттого індивідуального ризику. Так, для 509 відліку ризик становить величину  $1,148 \cdot 10^{-13}$ . Крім цього при експериментальній перевірці метеорологічна інформація на постах контролю протягом розглянутого інтервалу часу не використовувалась. Вихідною інформацією були лише вимірювані

концентрації забруднювачів атмосферного повітря.

Через швидкість прояву розглянутої небезпечної події важливим щодо перевірки достовірності запропонованого інженерно-технічного методу попередження НС є результати досліджень ризику саме миттєвої дії забруднювачів на здоров'я людини. Так, наприклад, вимірювані концентрації аміаку (пост №3) на розглянутому інтервалі викликають ризик миттєвої дії, що значно перевищує границю неприйняттого індивідуального ризику (рис. 5.42, а). Двоокис азоту при цьому лише короткочасно та незначно виявляється вище границі неприйняттого індивідуального ризику (рис. 5.42, б). Аналогічні результати спостерігаються і щодо поста №2. Тільки в цьому випадку концентрації двоокису азоту викликають ризик миттєвої дії, що значно перевищує границю неприйняттого індивідуального ризику (рис. 5.44, б). Для поста №4 тільки концентрації аміаку викликають ризик миттєвої дії, що значно перевищує границю неприйняттого індивідуального ризику (рис. 5.46, а).

Таким чином, перевірка запропонованого інженерно-технічного методу попередження НС свідчить про достовірність виявлення значного перевищення (на розглянутому інтервалі появи небезпечної події) ризиком миттєвої дії внаслідок забруднення атмосферного повітря аміаком на всіх постах контролю границі неприйняттого індивідуального ризику. При цьому експериментально встановлено, що динаміка імовірності РС забруднень дозволяє на 6–12 годин раніше виявляти зростання ризику миттєвої дії від забруднення атмосферного повітря понад границю неприйняттого індивідуального ризику. Це дозволяє розпочати попереджувачі дії щодо прийняття відповідних управлінських рішень, спрямованих на недопущення появи небезпечних подій, пов'язаних із забрудненням атмосферного повітря на території (поблизу) ОКІ.

Використання для виявлення небезпечних моментів відсутності розсіювання або слабкого розсіювання забруднень в атмосфері та подій, пов'язаних з накопленням забруднень у повітрі, величини поточної

імовірності РС щодо забрудненої атмосфери дозволяє з різним ступенем достовірності (імовірністю) попереджувати виникнення можливих небезпечних подій та НС. При цьому показано, що попереджати появу небезпечних подій та НС на основі традиційного перевищення поточними концентраціями забруднювачів атмосфери відповідних ГДК<sub>м.р.</sub> не представляється можливим (рис. 5.42, рис. 5.44 і рис. 5.46).

За ознаками, які відзначалися у відкритих публікаціях, можна стверджувати, що розлад здоров'я школярів під час зазначеної вище події відбувся через наявність в атмосферному повітрі аміаку та особливі метеорологічні умови, які сприяли слабкому розсіюванню забруднювачів в атмосфері. Однак відомо, що перші та головні ознаки отруєння аміаком можуть виявитися вже через кілька хвилин після його потрапляння в організм. Погіршення стану людини настає згодом. Чим більше часу проходить, тим гірше себе почуває індивідуум. При цьому може спостерігатися біль в області грудної клітки, нудота і блювота, відчуття гострої нестачі повітря та інші симптоми.

### **5.3 Валідація двох точкової та багато точкової променевих комунікативних моделей бездротового середовища для тестових умов надзвичайних ситуацій**

Валідація моделей бездротового середовища (БС) здійснювалась щодо функцій загасання та розсіювання радіохвиль у променях виду  $a(\text{utd}, \text{urd}, t)$ , яка визначалась випадковим процесом Релея із середньоквадратичним відхиленням 0,98. Такий процес характерний для глибоких завмирань у променях, які частіше мають місце в умовах реальних НС. Модельні значення початкових напрямків щодо променів передачі та прийому в БС визначалися  $\text{utd} = -30^\circ$  та  $\text{urd} = 60^\circ$  відповідно. Ширина променів передачі та прийому дорівнювала величині  $\Delta\theta = 25^\circ$  [463].

Поточні комунікативні можливості одно точкового БС у випадку



одного променя представлені на рис. 5.47 а, а у випадку восьми променів – на рис. 5.47 б. Дані, що наведені на рис. 5.47 б, відповідають випадку дискретних зрушень напрямків, а саме щодо  $k$ -го передавального  $utd_k = utd - \Delta t(k-1)$  та прийомного  $urd_k = urd - \Delta r(k-1)$  променів. При цьому дискретний крок зрушень щодо передавального променя визначався  $\Delta t = 12^\circ$ , а щодо прийомного променя  $\Delta r = -5^\circ$ .

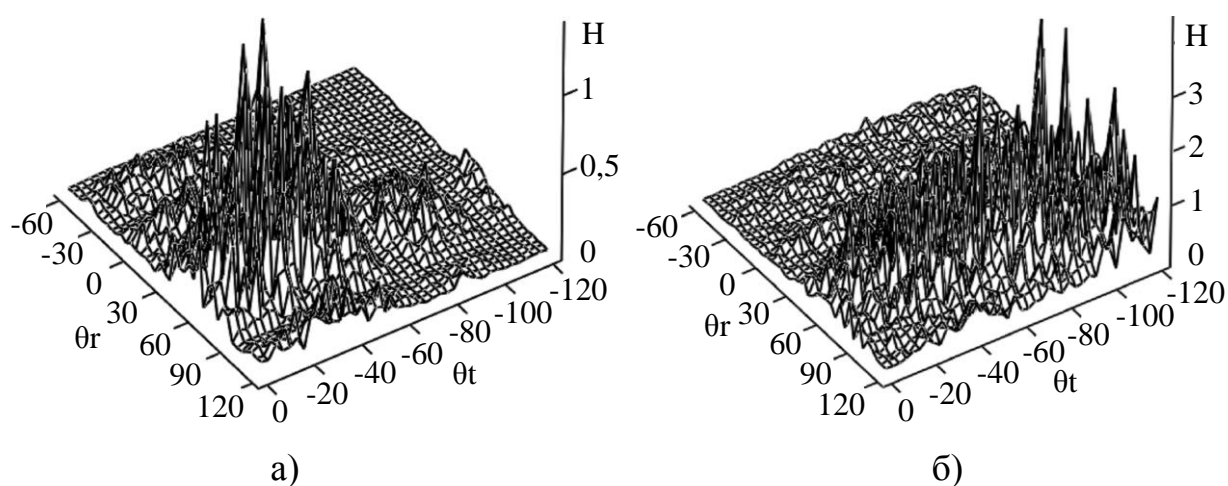


Рис. 5.47 – Комунікативні можливості одно точкового бездротового середовища: а – у випадку одного променя; б – у випадку восьми різних променів

З урахуванням використання спрямованої передавальної та приймальної антен у розглянутих точках БС її комунікативні властивості ілюструються на рис. 5.48 щодо модельного випадку  $\beta_t = -30^\circ$ ,  $\Delta \gamma_t = 14^\circ$  та  $\beta_r = 60^\circ$ ,  $\Delta \gamma_r = 14^\circ$ . Цей випадок відповідає ситуації, у якій напрямки передавальної та приймальної антен збігаються з початковими напрямками передавальних та прийомного променів. При цьому ширина характеристик спрямованості передавальної та приймальної антен однакова та дорівнює приблизно половині ширини променів у БС.

На рис. 5.48 сірим кольором ілюструються комунікативні можливості власних БС, а чорним кольором – комунікативні можливості з урахуванням застосування передавальної та приймальної антен.

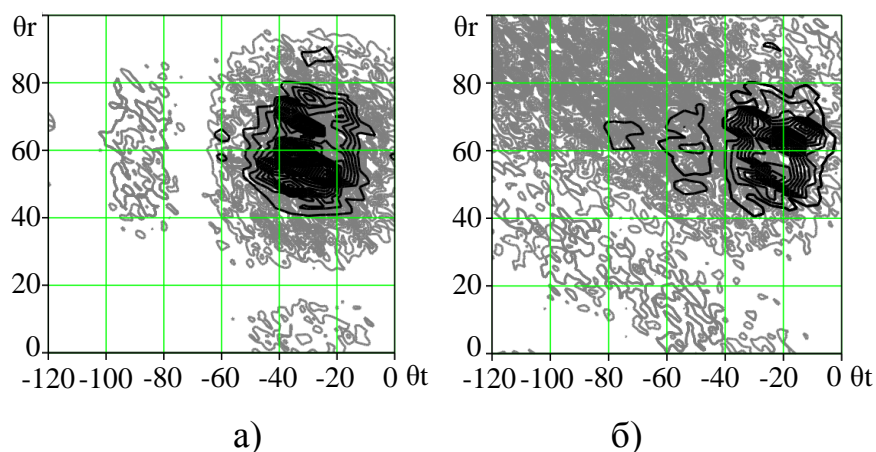


Рис. 5.48 – Комунікативні можливості одно точкового бездротового середовища, як самостійного, так і з урахуванням використання спрямованих антен на передавальній та приймальній сторонах: а – у випадку одного променя; б – у випадку восьми різних променів

Верифікація багато точкових променевих комунікативних моделей БС в умовах НС здійснювалась для окремої моделі БС із двома точками випромінювання та двома точками прийому, що описана в розділі 4. Вихідні дані щодо модельного променевого середовища наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для бездротового середовища

Напрямок променів у точці	Початкові напрямки променів випромінювання	Початкові напрямки променів прийому	Ширина променя випромінювання	Ширина променя прийому
1-1	$-30^{\circ}$	$60^{\circ}$	$5^{\circ}$	$1^{\circ}$
1-2	$-10^{\circ}$	$20^{\circ}$	$10^{\circ}$	$10^{\circ}$
2-1	$0^{\circ}$	$10^{\circ}$	$10^{\circ}$	$10^{\circ}$
2-2	$-40^{\circ}$	$-10^{\circ}$	$5^{\circ}$	$3^{\circ}$

Відповідно до даних табл. 5.1 на рис. 5.49 наведені поточні комунікативні можливості для багато точкового БС у випадку одного та восьми променів.

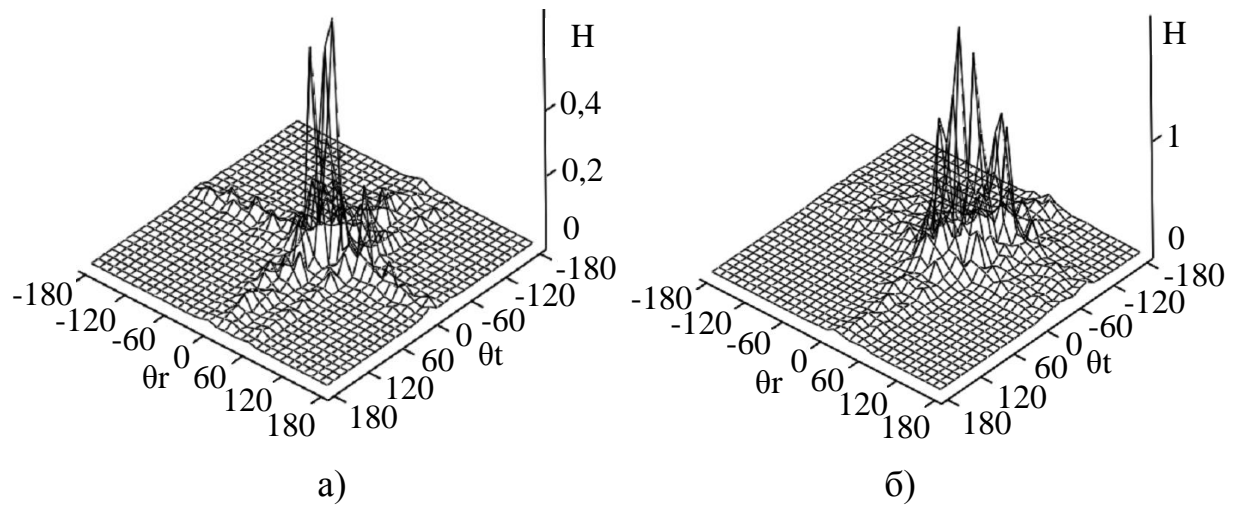


Рис. 5.49 – Комунікативні можливості багато точкового бездротового середовища: а – у випадку одного променя; б – у випадку восьми різних променів

Порівняння комунікативних можливостей багато точкової однопроменевого, восьмипроменевого та ізотропного БС при використанні на передавальній та приймальній сторонах антенних решіток з різними характеристиками спрямованості антенних елементів ілюструється на рис. 5.50.

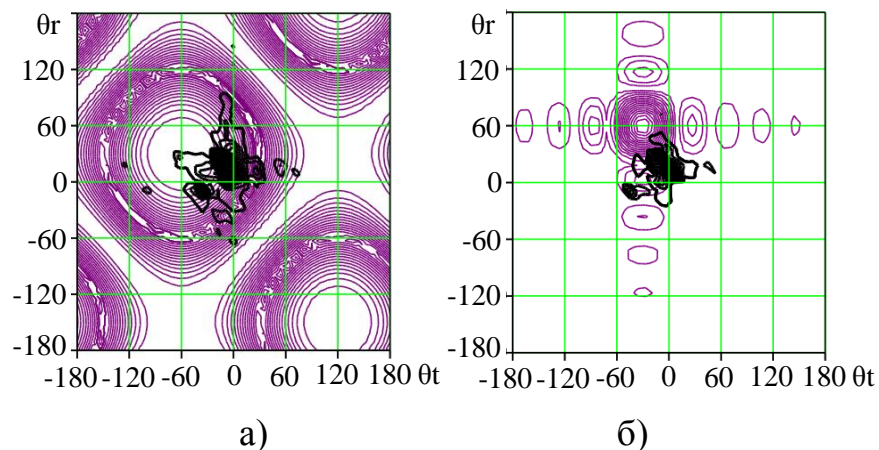


Рис. 5.50 – Порівняння комунікативних можливостей багато точкового однопроменевого та ізотропного бездротового середовища при використанні антенних решіток на передавальній та приймальній сторонах: а – ізотропні антенні елементи; б – спрямовані антенні елементи

На рис. 5.50 чорним кольором показані поточні комунікативні можливості для багато точкового одного променевого та восьми променевого середовища. Бузковим кольором на рис. 5.50 показані поточні комунікативні можливості для ізотропного середовища при використанні на передавальній та приймальній сторонах антенних решіток з різними характеристиками спрямованості елементів. У якості прикладу впливу спрямованих властивостей антенних решіток на передавальній та приймальній сторонах на комунікативні можливості багато точкового БС представлені ілюстрації на рис. 5.51.

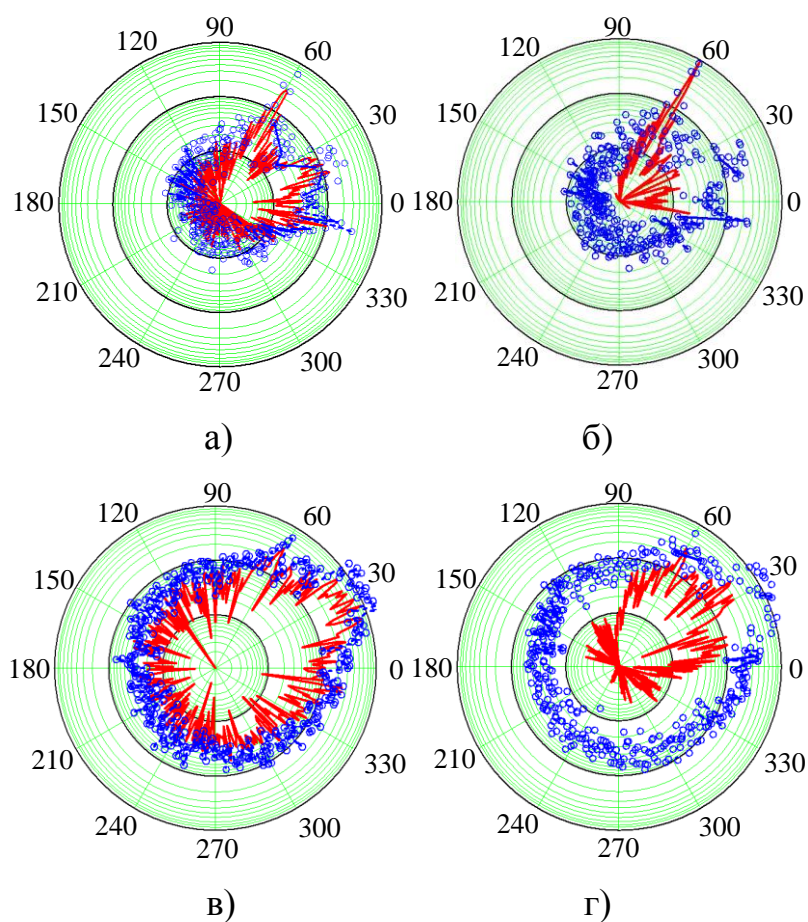


Рис. 5.51 – Поточні діаграми комунікативних можливостей багато точкового одного (а, б) та восьми променевого (в, г) БС для різних напрямків прийому при заданому напрямку променя випромінювання  $-30^\circ$  та у випадку використання антенних решіток на передавальній і приймальній сторонах: а, в – ізотропні антенні елементи; б, г – спрямовані антенні елементи

Синім кольором на рис. 5.51 позначені поточні діаграми комунікативних можливостей для багато точкового БС, а червоним кольором – діаграми з урахуванням використання на передавальній і приймальній сторонах антенних решіток з ізотропними та спрямованими характеристиками антенних елементів.

Наведені на рис. 5.47–5.51 результати свідчать про валідацію запропонованих двох точкової та багато точкової променевих комунікативних моделей БС. Комунікативні можливості одно точкового БС у випадку одного та восьми променів (рис. 5.47), свідчать про те, що зі збільшенням ширини променів випромінювання та прийому, а також числа променів комунікативні можливості БС розширюються – збільшується зона допустимих комунікаційних напрямків ефективного зв'язку. Найгірші комунікативні можливості має БС із одним вузьким променем. У випадку використання спрямованих антен на передавальній та приймальній сторонах БС (рис. 5.48) комунікативні можливості знижуються в міру зменшення ширини спрямованості антен. Цим пояснюється низька ефективність відомих технологій бездротового зв'язку в складних умовах, які мають місце при реальних НС. При цьому збільшення ширини спрямованості антен не може забезпечити підвищення комунікативних можливостей понад тих, які надаються самим БС.

З аналізу даних на рис. 5.49 слідує, що комунікативні можливості багато точкового БС також зростають при збільшенні числа променів і залежать від параметрів цих променів в умовах НС. На основі запропонованих моделей можна розробляти окремі моделі щодо різних типів багато точкового БС, характерних для конкретних умов НС. Комунікативні можливості багато точкового однопроменевого, восьми променевого та ізотропного БС при використанні передавальної та приймальної антенних решіток ілюструються на рис. 5.50. Порівняльний аналіз зазначених комунікативних можливостей свідчить про те, що вони обмежуються

середовищем та посиленням використовуваних антенних решіток у напрямках променів випромінювання та прийому. При цьому у випадку ізотропного БС та ізотропних характеристик спрямованості антенних елементів у решітках істотно знижується перешкодозахищеність реалізованих комунікативних можливостей в умовах НС.

Аналогічна ситуація відмічається у випадку багато точкового восьми променевого БС та використання аналогічних антенних решіток на передавальній та приймальній сторонах. При цьому поточні комунікативні можливості багато точкового восьми променевого БС при використанні антенних решіток на передавальній та приймальній сторонах обмежуються комунікативними можливостями БС і посиленням антенних решіток у напрямках променів випромінювання та прийому. У випадку ізотропних антенних елементів передавальної та приймальної антенних решіток перешкодозахищеність реалізованих комунікативних можливостей залишається низькою. При використанні спрямованих елементів в антенних решіток має місце висока перешкодозахищеність комунікативних можливостей.

Поточні діаграми комунікативних можливостей багато точкової одно променевого та восьми променевого БС для різних напрямків прийому при заданому напрямку променя випромінювання (рис. 5.51) у випадку використання антенних решіток зі спрямованими антенними елементами на прийомній стороні свідчать про високий рівень перешкодозахищеності комунікативних можливостей БС. При цьому використання спрямованих антенних елементів у передавальній та приймальній антенних решітках у цілому забезпечують більш високий рівень перешкодозахищеності комунікативних можливостей БС у порівнянні з використанням антенних решіток зі спрямованими антенними елементами тільки на прийомній стороні.

Таким чином, результати валідації двох точкових та багато точкових комунікативних моделей БС у тестових ситуаціях, які характерні для умов

НС, свідчать про їх працездатність. При цьому встановлено, що використання спрямованих антен на передавальній та приймальній сторонах у БС зі значними перешкоджаючими конструкціями, що затінюють та розсіюють радіохвилі, дозволяє істотно підвищити перешкодозахищеність комунікативних можливостей в складних умовах, що діють в БС.

## Висновки розділу 5

1. Здійснено експериментальну перевірку запропонованої моделі міри автокореляцій та взаємних кореляцій небезпечних факторів повітряного середовища при ранніх загорянь у приміщеннях ОКІ на основі коефіцієнта кореляції Пірсона, обчисленого щодо заданого інтервалу стаціонарності. Встановлено, що запропонована міра обмежується оцінками лінійного взаємозв'язку на інтервалах за умови флуктуацій досліджуваних небезпечних факторів, що відповідають розподілу Гауса. У випадку розподілів флуктуацій, що відрізняються від Гауса, запропонована модель міри, яка як і раніше оцінює ступінь лінійного взаємозв'язку флуктуацій небезпечних факторів, але перевірка на значимість у цьому випадку втрачає зміст.

2. Експериментально перевірено працездатність запропонованої моделі у вигляді поточної міри КР для вектору прирощень станів повітряного середовища при ранніх загоряннях у приміщеннях ОКІ. Достоїнством запропонованої моделі у вигляді міри КР є те, що вона залишається справедливою щодо змодельованих та реальних вхідних даних. Крім того модель базується на особливостях фрактальної структури прирощень станів нелінійної динамічної системи, яка описує небезпечні фактори повітряного середовища при загоряннях. Це дозволяє впевнено виявляти загоряння на ранніх етапах та попереджати виникнення НС внаслідок пожеж у приміщеннях ОКІ з метою їхнього недопущення або мінімізації наслідків при переростанні загорянь у некеровані пожежі.

3. Проведено експериментальну перевірку запропонованої поточної

міри РС щодо вектору прирощень станів повітряного середовища. Встановлено, що використання даної міри дозволяє виявляти ранні загоряння у різних типах приміщень ОКІ.

4. Вперше отримані співвідношення щодо показників достовірності інженерно-технічного методу попередження НС техногенного характеру внаслідок пожеж у приміщеннях ОКІ за допомогою контролю кореляційної розмірності та рекурентності щодо вектору прирощень станів повітряного середовища. Показники достовірності запропоновано оцінювати робочими характеристиками та характеристиками виявлення загорянь. Розроблено новий інженерний метод апроксимацій щодо визначення робочих характеристик та характеристик виявлення загорянь у приміщеннях ОКІ.

Встановлено, що забезпечення одночасно високої достовірності та низької імовірності помилки попередження НС можливо тільки у випадку істотного перевищення контрольованим показником фрактальності середнього значення фону. Для забезпечення високої достовірності методу попередження НС щодо різних умов запропоновано використовувати одночасно два показники фрактальності для вектору прирощень станів повітряного середовища. Попередження НС у цьому випадку пропонується здійснювати на основі одночасного перевищення вказаними показниками фрактальності встановлених порогів.

5. Експериментально встановлено, що динаміка стану концентрації двоокису азоту та формальдегіду в атмосферному повітрі щодо типової міської конфігурації виявляється хаотичною та має фрактальні властивості. При цьому фрактальні властивості характеризуються різною топологією та текстурою РС, що залежить від поста контролю. Встановлено, що для властивостей фрактальності станів характерні елементи періодичної та екстремальної топології з різкими змінами динаміки концентрацій забруднювачів атмосферного повітря.

Експериментально підтверджено, що для виявлення дрібномасштабних структур, які складаються із простих точок, діагональних, горизонтальних та



вертикальних ліній точок можуть використовуватися RP. При цьому вертикальні та горизонтальні лінії точок дозволяють виділяти проміжки часу, протягом яких концентрація забруднювача в атмосферному повітрі не змінюється або змінюється в незначній мірі (концентрації забруднювачів як би «заморожуються» у ці проміжки часу). Такі проміжки часу характеризуються відсутністю перемішування між сусідніми шарами повітря, що призводить до відсутності розсіювання забруднювача атмосферою. Це є причиною збереження або збільшення концентрації забруднювача в атмосферному повітрі. Такі стани запропоновано використовувати як індикатори можливих прихованих небезпек забруднення атмосфери.

6. Проведено експериментальну перевірку запропонованого самонастроювального методу обчислення RP щодо вектора концентрацій основних газових забруднювачів атмосферного повітря для типового району промислового міста, що підтвердила підвищену точність та адекватність відображення рекурентності динаміки станів атмосферних забруднень поза залежністю від характеру вимірюваних даних. Експериментально встановлено, що потрібна точність та адекватність щодо автоматичного виявлення небезпечних станів атмосферного забруднення забезпечується для граничного кутового розміру конуса рекурентності, який дорівнює  $10^\circ$  та менше.

7. Експериментальна перевірка запропонованих чисельних мір РС забрудненої атмосфери на основі динаміки концентрацій двоокису азоту та формальдегіду підтвердила можливість їх використання для виявлення небезпечних станів забрудненої атмосфери та попередження НС внаслідок наявності шкідливих речовин в атмосферному повітрі понад ГДК. Встановлено, що якість попередження НС на основі запропонованих чисельних мір залежить від розміру області РС, які повиненні апріорно задаватися.

8. Експериментально підтверджена можливість використання функції невизначеності для оперативного виявлення небезпечних станів атмосферних забруднень на території (поблизу) ОКІ. Результати перевірки свідчать про

переваги використання функції невизначеності для вимірюваних концентрацій атмосферних забруднень із метою надійного виявлення небезпечних станів забрудненої атмосфери на основі сумісного використання їх енергетичних та швидкісних властивостей. Встановлено, що в цьому випадку ширини вікна усереднення для вимірюваних концентрацій забруднювачів повинна становити від 4 до 8 відліків, що є еквівалентом від однієї до двох діб при умові регламентованої на даний час програми контролю атмосферних забруднень на стаціонарних постах контролю в Україні.

9. Експериментально підтверджена можливість використання запропонованих моделей для визначення ризику негайних ефектів та хронічної інтоксикації для людини від концентрацій шкідливих речовин, що забруднюють атмосферне повітря населених місць. Моделі ризиків впливу атмосферних забруднень на здоров'я людини дозволяють чисельно визначати поточну небезпеку забруднень для населення місць із метою прийняття відповідних оперативних управлінських рішень щодо попередження НС внаслідок наявності шкідливих речовин в атмосферному повітрі на території (поблизу) ОКІ понад ГДК.

10. Експериментальна перевірка достовірності запропонованого інженерно-технічного методу попередження НС здійснювалась на здатності методу щодо виявлення апіорі достовірної небезпечної події. Результати перевірки свідчать про те, що на інтервалі прояву небезпечної події мало місце значне перевищення поточним ризиком миттєвої дії від забруднення атмосферного повітря аміаком (на всіх постах контролю) рівня неприйняттого індивідуального ризику. Це дозволяє вважати версію про масове отруєння людей під час зазначеної події забрудненим аміаком атмосферного повітря правдоподібною. Експериментально встановлено, що динаміка запропонованої оцінки імовірності РС забруднень дозволяє на 6–12 годин раніше виявляти зростання ризику миттєвої дії від забруднення атмосферного повітря. Це дозволяє приймати попереджуючі управлінські

рішення щодо недопущення небезпечних подій, пов'язаних із забрудненням атмосферного повітря в містах. Дотримуючись ознак, які відзначалися в відкритих публікаціях, можна з великою впевненістю стверджувати, що отруєння людей відбулося через наявність в атмосферному повітрі аміаку та наявності на досліджуваному інтервалі особливих метеорологічних умов, які сприяли слабкому розсіюванню аміаку в атмосферному повітрі.

11. Підтверджено експериментальними даними, що величина оцінки поточної імовірності РС забрудненої атмосфери дозволяє з різним ступенем достовірності (імовірністю) попереджувати появу можливих небезпечних подій. При цьому встановлено, що попереджати появу небезпечних подій на основі перевищення поточними концентраціями забруднювачів атмосфери відповідних максимально разових ГДК не представляється можливим.

12. Результати дослідження щодо двох точкових та багато точкових комунікативних моделей БС при характерних для НС тестових ситуаціях свідчать про валідацію запропонованих моделей. Встановлено, що використання спрямованих антен на передавальній та приймальній сторонах БС, у якому є значні перешкоджаючі конструкції, які затінюють та розсіюють радіохвилі, дозволяє істотно підвищити перешкодозахищеність комунікативних можливостей таких БС.

## РОЗДІЛ 6

### **ВАРІАНТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИХ МЕТОДІВ**

Вирішення четвертого наукового завдання передбачає пропозиції щодо впровадження розроблених математичних моделей та інженерно-технічних методів попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) об'єктів шляхом розробки комплексна система оперативного контролю та управління станом повітряного середовища, яка включає систему поточного вимірювання стану повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) об'єктів, систему підтримки прийняття оперативних рішень та систему виконання управлінських рішень.

#### **6.1 Комплексна система оперативного контролю та управління станом повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури**

Як наголошувалось раніше порушення умов нормального функціонування ОКІ спричиняє серйозну загрозу національній безпеці держави. При цьому, для забезпечення цивільного захисту населення і територій від небезпечного впливу забруднення повітря шкідливими речовинами, що викидаються ОКІ в штатному та аварійному режимах функціонування і можуть призвести до виникнення НС техногенного характеру, пов'язаних з порушенням нормальних умов життєдіяльності людей (обслуговуючого персоналу та проживаючого поряд населення) та

оточуючого середовища. Тому оперативний контроль та управління станом повітряного в приміщеннях та на території (поблизу) ОКІ розглядається в якості конструктивного підходу щодо своєчасного попередження НС техногенного характеру внаслідок пожеж та наявності в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) об'єктів [473].

З огляду на це, в дисертаційній роботі розроблені основи створення комплексної системи оперативного контролю та управління станом повітряного середовища в приміщеннях ОКІ та атмосферному повітрі як на території об'єктів, так і поблизу них [448, 449]. Така система включає систему підтримки прийняття оперативного рішення, яка базується на комплексі математичних інструментів щодо виявлення небезпечних станів повітряного середовища на основі розроблених у роботі інженерно-технічних методів попередження НС техногенного характеру, та системи виконання управлінських рішень, яка передбачає формалізацію реалізації управлінського рішення, постановку завдання виконавцям та оперативне управління станом повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) ОКІ.

Загальна структурна схема оперативного контролю та управління станом повітряного середовища в приміщеннях ОКІ, а також як на території, так і поблизу об'єктів наведена на рис. 6.1.

Загальна структурна схема комплексної системи контролю та управління станом повітряного середовища охоплює повітряне середовище у приміщеннях ОКІ щодо виявлення ранніх загорянь з метою попередження НС техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів), а також атмосферне повітря як на території, так і поблизу ОКІ щодо виявлення в атмосферному повітрі небезпечних шкідливих речовин, що спричиняють ризик здоров'ю людини, з метою попередження відповідних НС техногенного характеру.

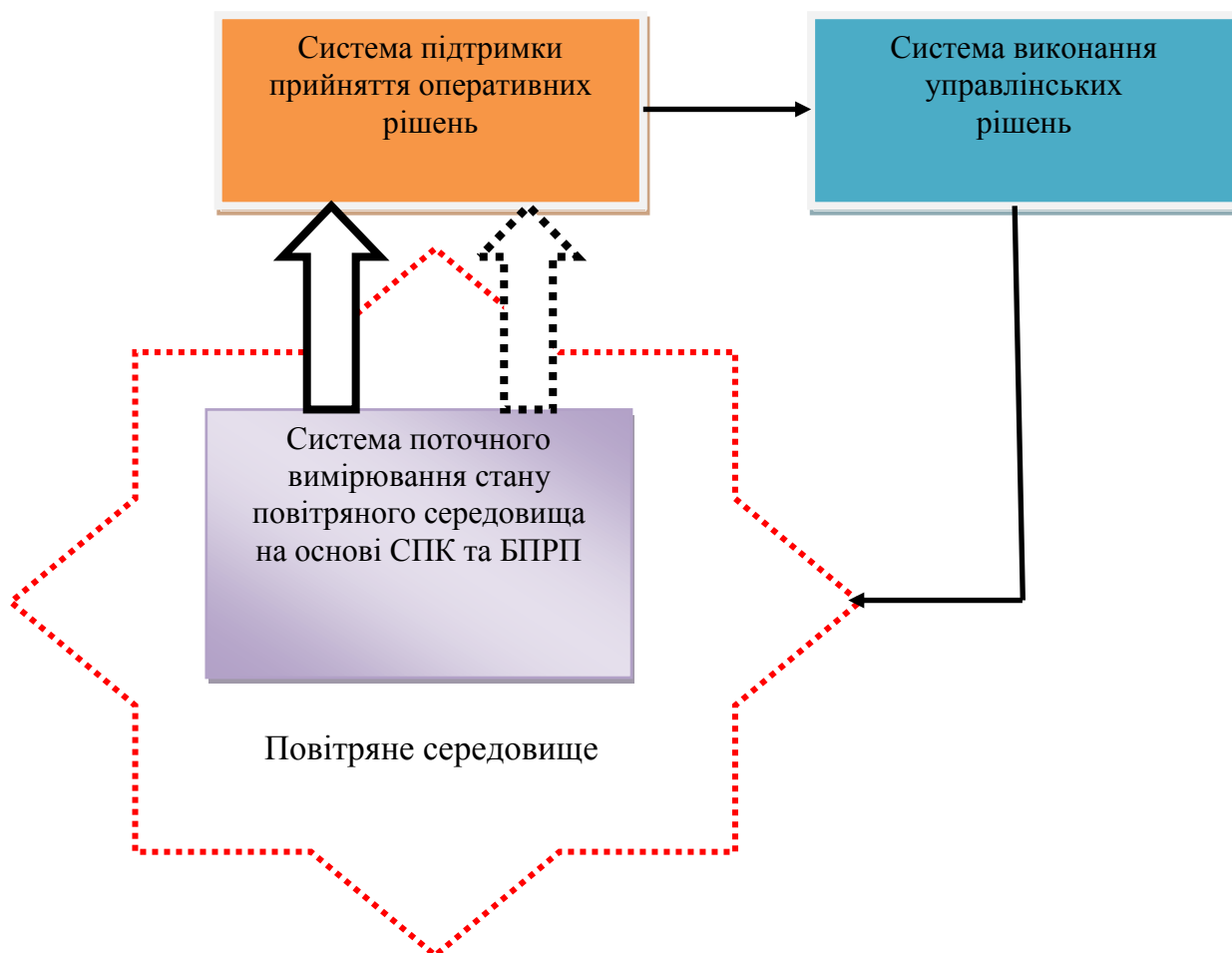


Рис. 6.1 – Загальна структурна схема комплексної системи оперативного контролю та управління станом повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) об’єктів критичної інфраструктури

Після прийняття управлінського оперативного рішення воно надходить до системи виконання управлінських рішення, де відбувається його формалізація та постановка конкретних завдань щодо виконавців. В якості виконавців виступають відповідні посадови особи, які на даний час можуть особисто (чи колегіально) впливати на процеси попередження (недопущення) небезпечних подій та аварій на ОКІ та подальшого виникнення відповідних НС техногенного характеру. У випадку ліквідації наслідків зазначених НС техногенного характеру [474] рятувальними підрозділами оперативно-рятувальними силами цивільного захисту виконавцями виступають керівники оперативно-рятувальних підрозділів та їх штатні рятувальники. При цьому оперативний контроль стану

повітряного середовища дає можливість оцінити ефективність прийнятого управлінського рішення щодо знищення концентрації шкідливих речовин у повітрі.

Комплексна система оперативного контролю та управління станом повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) ОКІ являє собою об'єктову систему. Але рамки її використання не обмежуються об'єктовим рівнем [475]. Усе залежить від структурного наповнення системи поточного вимірювання стану повітряного середовища. По-перше, вирішальним є тип безпілотних рухомих платформ та сенсорів, які використовуються для вимірювання стану повітряного середовища. По-друге, це зона, яку покривають сенсори, що вимірюють стану повітряного середовища. Тому розроблена комплексна система оперативного контролю та управління станом повітряного середовища може бути застосованою також і на вищих рівнях (місто, небезпечна агломерація промисловості, регіон, країна). Крім того комплексна система може бути застосованою при ліквідації наслідків НС різного характеру [476], пов'язаних з небезпечним забрудненням атмосферного повітря, з метою відповідного корегування управлінських рішень, що приймаються для керування діями рятувальних підрозділів у зоні ліквідації НС.

Таким чином, запропонована нова комплексна система оперативного контролю та управління станом повітряного середовища, внаслідок пожеж (вибухів) у приміщеннях, а також викидів небезпечних речовин в атмосферне повітря ОКІ, що функціонують в штатному або аварійному режимах, а також при ліквідації наслідків НС техногенного характеру, які пов'язані з потраплянням в атмосферне повітря небезпечних речовин. До складу розробленої комплексної системи включені три системи – поточного вимірювання стану повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) об'єктів, систему підтримки прийняття оперативних рішень та систему виконання управлінських рішень.

Система поточного вимірювання стану повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) об'єктів дозволяє одержати поточну інформацію про стан забруднення повітря з урахуванням впливу поточних метеорологічних умов та особливостей рельєфу місцевості в точках контролю. Тому традиційна інформація про метеорологічні умови та особливості рельєфу місцевості при контролі стану повітряного середовища не використовується. Система підтримки прийняття управлінських оперативних рішень дозволяє проводити поточну кількісну оцінку стану повітряного середовища і виявляти небезпечні стани забруднення з метою попередження НС техногенного характеру та формувати відповідні оперативні рішення щодо управління забрудненнями. Система виконання управлінського рішення має у своєму розпорядженні необхідний ресурс щодо реалізації оперативних рішень, які направлені на попередження виникнення НС техногенного характеру на ОКІ. Універсальність та конструктивність розроблених інженерно-технічних методів попередження НС техногенного характеру, що засновані на уявленні повітряного середовища як складної динамічної системи, забезпечує можливість їх інтегрування в існуючі та перспективні системи контролю повітряного середовища.

## **6.2 Система поточного вимірювання стану повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури**

Система поточного вимірювання поточного вимірювання стану повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) ОКІ, що показана на рис. 6.1, може базуватися на використанні різних типів сенсорів та платформ для їх розміщення. У випадку стаціонарних платформ система поточного вимірювання забруднень повітря може базуватися на використанні існуючих штатних пожежних сенсорів, що вимірюють небезпечні фактори



повітряного середовища у приміщеннях при загоряннях і входять до складу систем протипожежного захисту, або стаціонарних постів контролю забруднень атмосферного повітря, що входять до складу єдиної системи контролю атмосферного забруднення в містах України.

Крім стаціонарних платформ вимірювальні сенсори системи поточного вимірювання стану повітряного середовища можуть розміщуватись на безпілотних рухомих платформах (БПРП) наземного та повітряного базування. В цьому випадку передача інформації, що вимірюється відповідними сенсорами, та керування відбувається на основі організації бездротового зв'язку з платформою. Структура системи поточного вимірювання стану повітряного середовища наведена рис. 6.2.

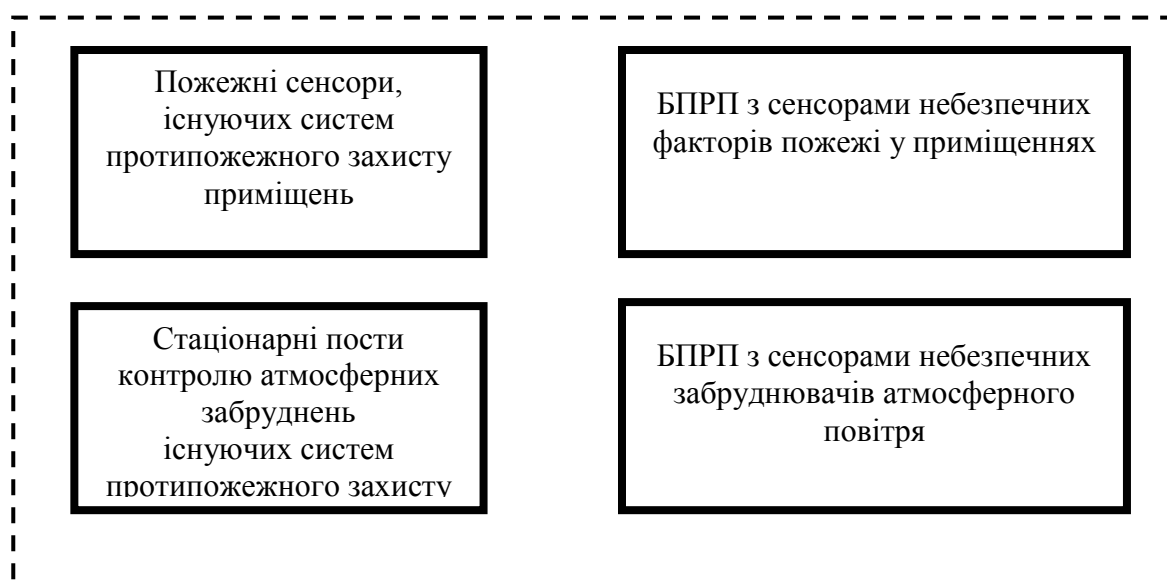


Рис. 6.2 – Структура системи поточного вимірювання стану повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) ОКІ

У зв'язку з відсутністю таких платформ та новизною їх застосування в системі поточного вимірювання стану повітряного середовища (рис. 6.2), розроблено діючий зразок БПРП (робот) [477] для оперативного контролю стану повітряного середовища в приміщеннях та

на території (поблизу) ОКІ. З урахуванням можливості застосування розробленої комплексної системи при ліквідації наслідків НС функціональні можливості таких платформ в системі поточного вимірювання стану повітряного середовища значно розширені з метою полегшення розвідки та гасіння пожеж [475, 476], а також пошуку постраждалих при пожежах та НС [474] у місцях з обмеженим простором. Розроблена БПРП може пересуватись в автоматичному режимі оминаючи перепони та передаючи вимірювані данні на приймач, або у ручному режимі за управлінням оператора (рятувальника). Для управління та передачі вимірюваних даних використано дві різних антени та модулі прийому-передачі щодо зменшення взаємних перешкод при передачі вимірюваних даних та під час управління БПРП [395].

Пересування виконано завдяки шасі з колісною формулою 4x4, постійний повний привід забезпечує максимальну прохідність, завдяки шинам пониженого тиску та широкого профілю з тракторним протектором збільшено зчеплення з верхнім шаром поверхні, по якій пересуватиметься БПРП. Для обходу перепони, зони високої температури чи пожежі на БПРП з переднього боку встановлено ультразвуковий радар, інфрачервоний датчик полум'я та датчик температури, для візуального контролю обстановки встановлено відео камеру, яка передає та транслює зображення зі звуковим супроводом режимі реального часу, а контроль загазованості виконано завдяки газоаналізатору, який встановлено на передній – верхній частині корпусу. Також на верхній частині у металевому корпусі встановлено антени, передавач та приймач для управління.

В корпусі розміщено мікропроцесор, акумулятор, електродвигуни, модуль управління двигунами, модуль відеокамери, GPS модуль для відстеження місця знаходження БПРП. На дні БПРП встановлено алюмінієвий радіатор для відводу тепла від силових ключів.

Функціональна схема діючого зразка БПРП представлена на рис. 6.3.

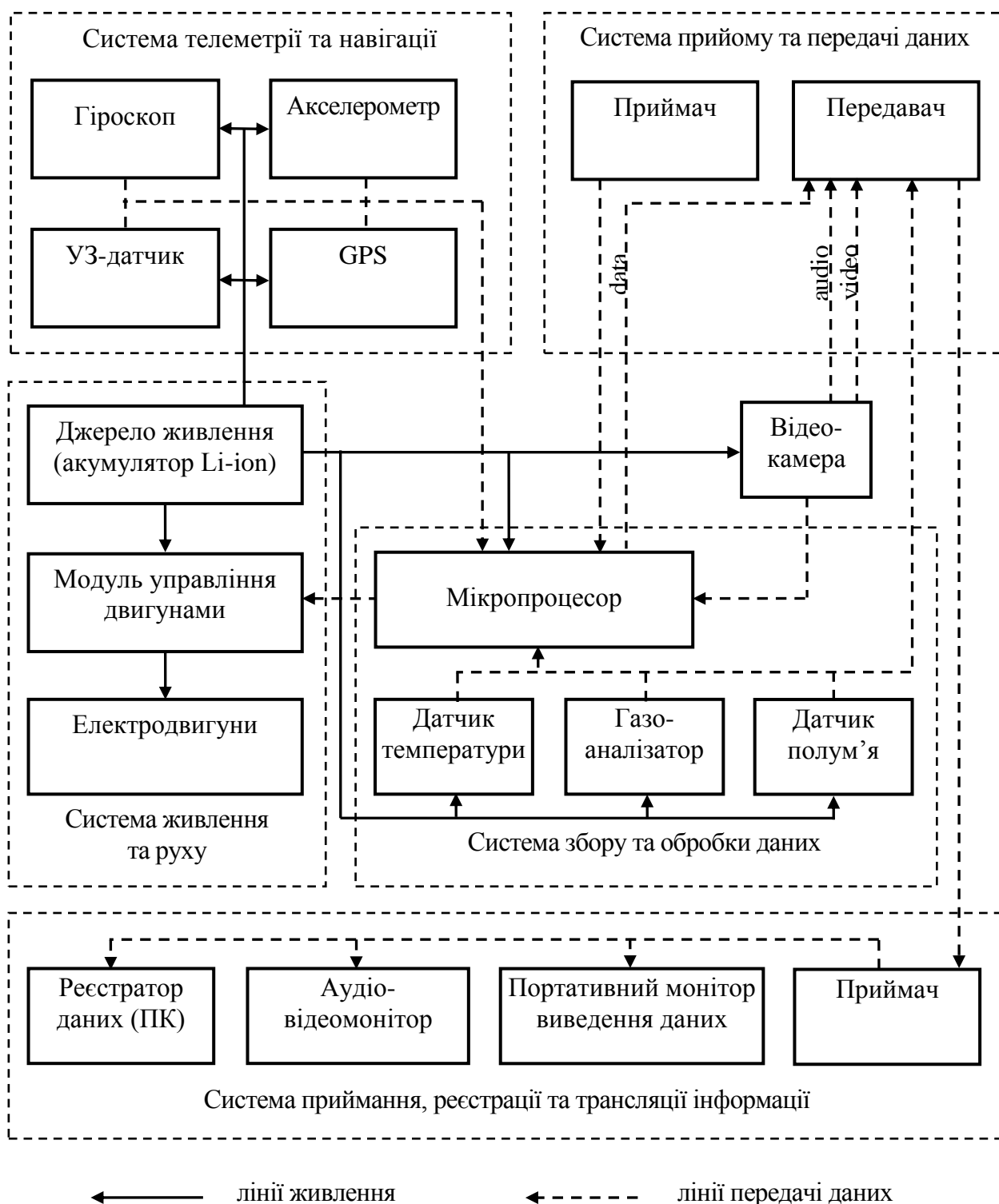
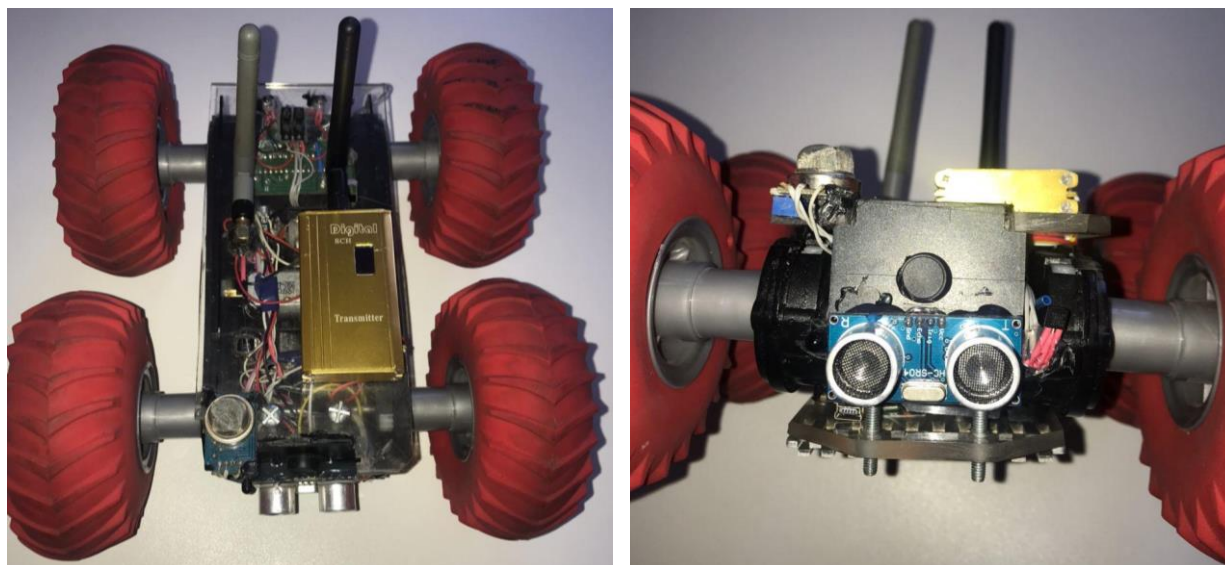


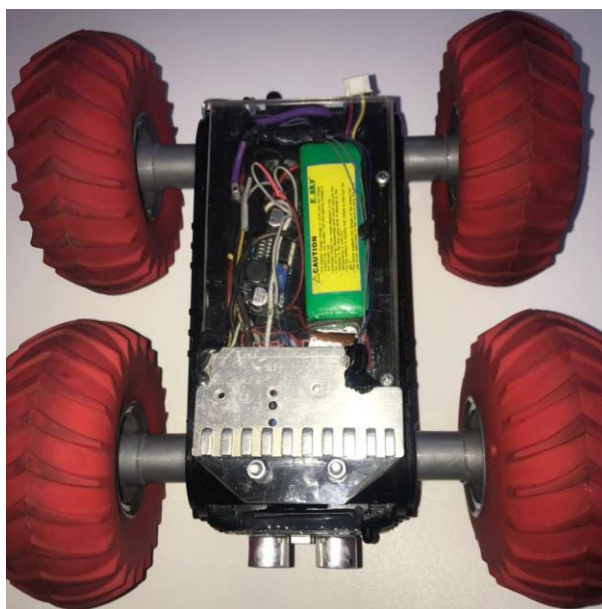
Рис. 6.3 – Функціональна схема діючого зразка безпілотної рухомої платформи

На рис. 6.4 представлено фотозображення розробленого діючого зразка БПРП: вид зверху, вид з фронту, вид знизу.



а)

б)



в)

Рис. 6.4 – Фотозображення розробленого діючого зразка безпілотної рухомої платформи (наземний варіант): а – вид зверху; б – вид з фронту; в – вид знизу

На рис. 6.4 а продемонстровано тип виконання шасі, розміщення модуля управління двигунами, електродвигунів, вимірюваних сенсорів, передавача та приймача сигналів. На рис. 6.4 б показано, що з переду розробленого діючого зразка БПРП знаходиться ультразвуковий модуль,

завдяки якому БРП оминає перепони, відеокамера із захисною кришкою, інфрачервоний датчик полум'я, датчик температури та газоаналізатор з додатковою функцією розпізнавання диму. На рис. 6.4 в наведений вид розробленого діючого зразка БПРП знизу, де можна бачити місце розташування акумулятора, мікропроцесора, GPS модуля та радіатора охолодження силових ключів.

На рис. 6.5 представлено фотозображення пульта керування розробленого діючого зразка БПРП у ручному режимі (при керуванні оператором).



Рис. 6.5 – Фотозображення пульта керування розробленого діючого зразка безпілотної рухомої платформи

У якості ілюстрації роботи розробленого діючого зразка БПРП на рис. 6.6 зображено загальний вид портативного монітору виведення даних приймача інформації, на екрані якого виводяться показання передані з БПРП у випадку наявності полум'я та придатного для дихання повітряного

середовища, а також у випадку відсутності пожежі та наявності небезпечних речовин у повітряному середовищі.



а)

б)

Рис. 6.6 – Загальний вид портативного монітору виведення даних приймача інформації розробленого діючого зразка безпілотної рухомої платформи: а – у випадку наявності полум'я та безпечному стану повітряного середовища; б – у випадку відсутності пожежі та наявності небезпечних речовин у повітряному середовищі.

Таким чином, система поточного вимірювання поточного вимірювання стану повітряного середовища запропонованої комплексної системи оперативного контролю та управління станом повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) ОКІ може базуватися на використанні різних типів сенсорів та платформ для їх розміщення. У випадку стаціонарних платформ система поточного вимірювання забруднень повітря може базуватися на використанні існуючих штатних пожежних сенсорів, що вимірюють небезпечні фактори повітряного середовища у приміщеннях при загоряннях і входять до складу систем протипожежного захисту, або стаціонарних постів контролю забруднень атмосферного повітря, що входять до складу єдиної системи контролю атмосферного забруднення в містах України.

Розроблений діючий зразок наземного варіанту БПРП (робот) як складової запропонованої комплексної системи. Діючий зразок БПРП може пересуватись в автоматичному режимі оминаючи перепони та передаючи вимірювані данні на приймач, або у ручному режимі за управлінням оператора (рятувальника). Для управління та передачі вимірюваних даних використано дві різних антени та модулі прийому-передачі щодо зменшення взаємних перешкод при передачі вимірюваних даних та під час управління БПРП. БПРП побудовано на базі шасі із колісною формулою 4x4. Основними функціональними елементами є мікропроцесор, акумулятор, електродвигуни, модуль управління двигунами, модуль відеокамери, GPS модуль, ультразвуковий радар, інфрачервоний датчик полум'я, датчик температури, газоаналізатор, а також бездротовий передавач та приймач інформації.

### **6.3 Система підтримки прийняття оперативного рішення щодо стану повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури**

Структура системи підтримки прийняття оперативного рішення щодо стану повітряного середовища реалізує розроблені у дисертації інженерно-технічні методи попередження НС техногенного характеру за рахунок оперативного контролю стану повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) ОКІ. Загальна структура системи підтримки прийняття оперативного рішення щодо попередження НС техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) на ОКІ та структура системи щодо попередження НС техногенного характеру внаслідок наявності в атмосферному повітрі шкідливих речовин остається схожою. Відмінність структури при цьому має місце лише в математичному забезпеченні, що реалізується при обробці інформації від системи поточного вимірювання стану повітряного середовища та в смисловому навантаженні щодо обчислюваних параметрів. Розглянемо зазначене більш докладніше.

На рис. 6.7 наведено структуру системи підтримки прийняття оперативного рішення щодо попередження НС техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) у приміщеннях ОКІ.

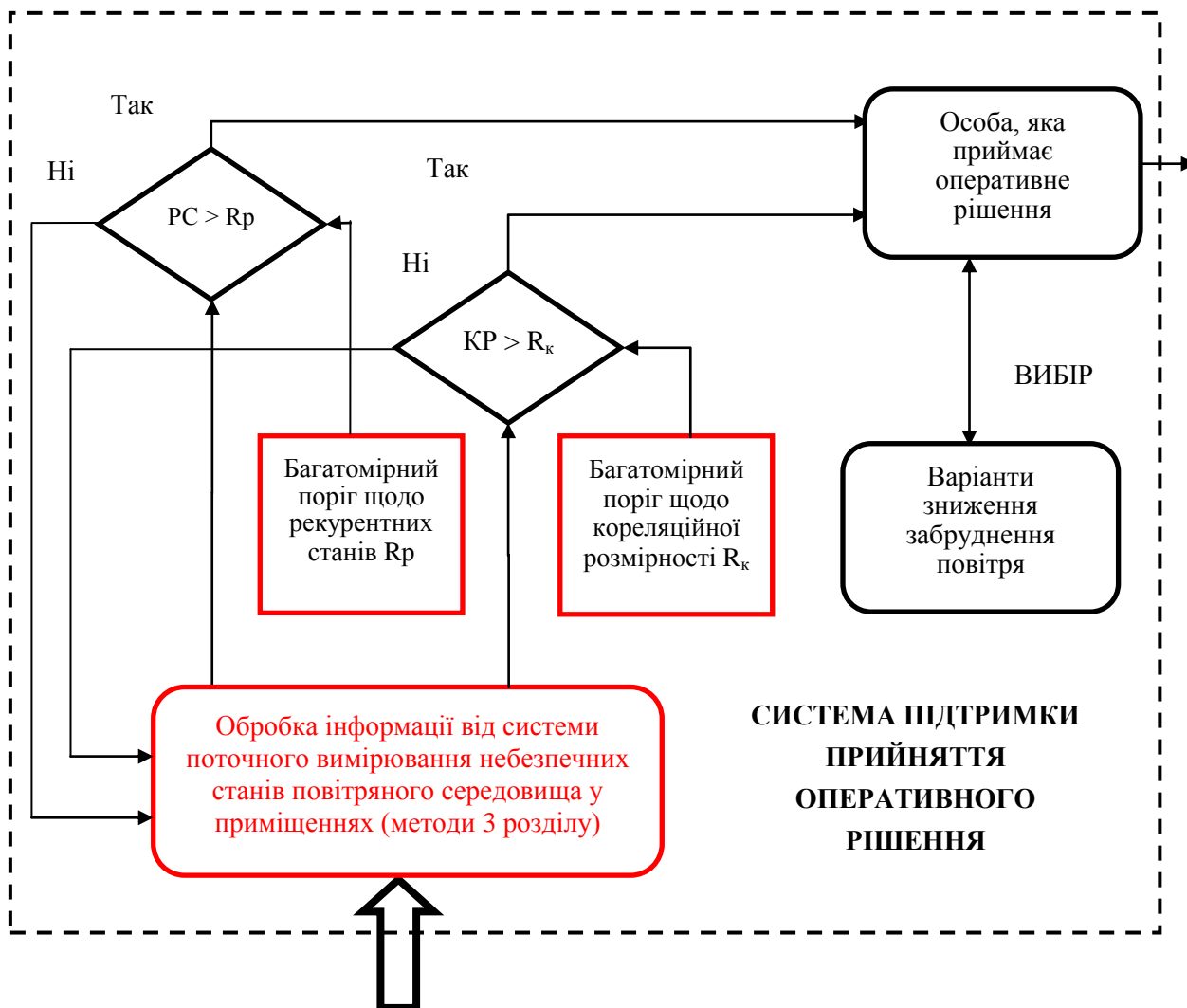


Рис. 6.7 – Структура системи підтримки прийняття оперативного рішення щодо попередження НС техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) у приміщеннях ОКІ

У якості ілюстрації вказаного вище, на рис. 6.8 наведено структуру системи підтримки прийняття оперативного рішення щодо попередження НС техногенного характеру внаслідок наявності в атмосферному повітрі на території (поблизу) ОКІ небезпечних для здоров'я людини речовин.



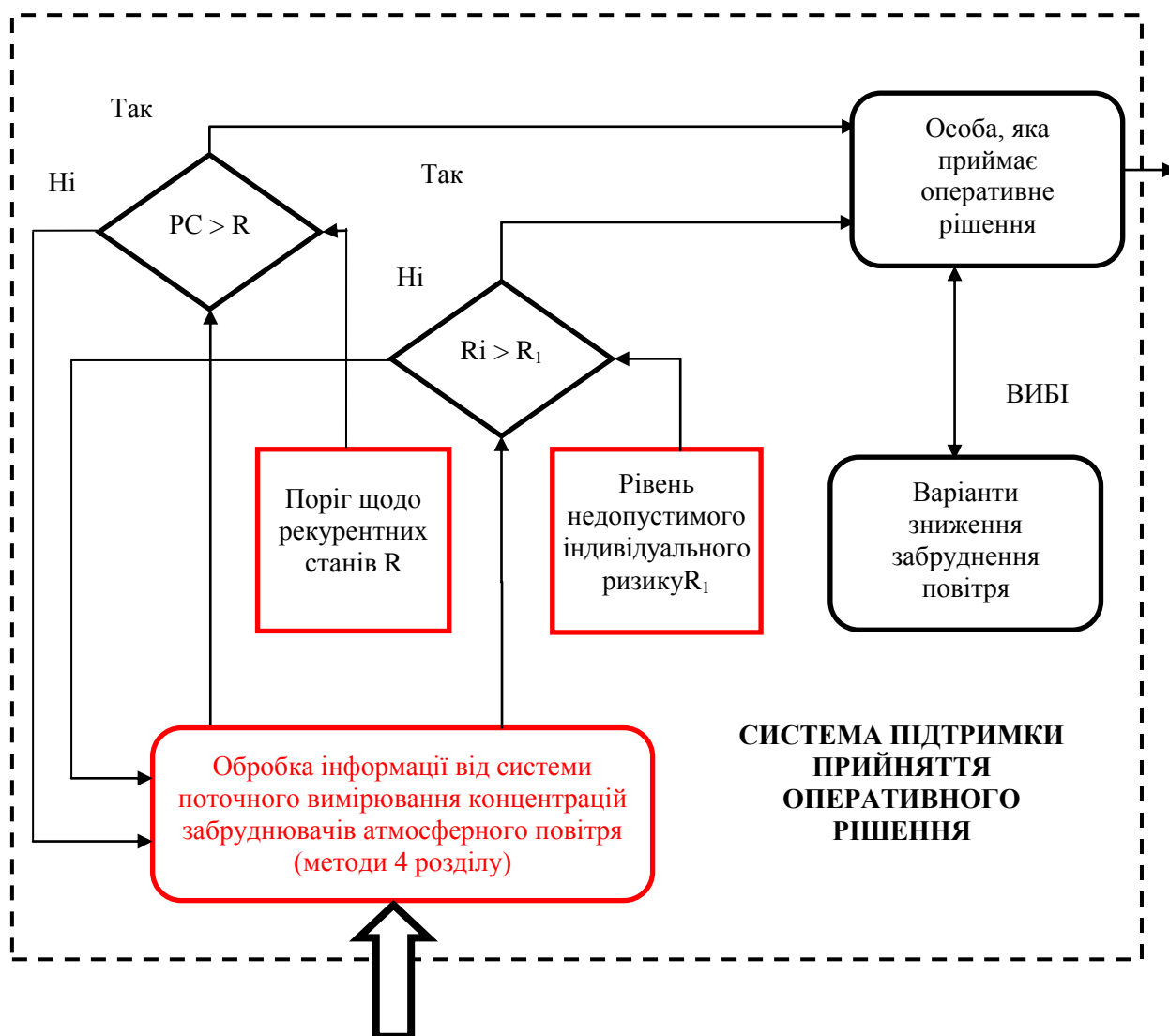


Рис. 6.8 – Структура системи підтримки прийняття оперативного рішення щодо попередження НС техногенного характеру внаслідок наявності в атмосферному повітрі на території (поблизу) ОКІ небезпечних речовин

З першого погляду, структури, що наведені на рис. 6.7 та рис. 6.8, є схожими. Однак методи та параметри, що обчислюються та визначаються в елементах структур, позначених червоним кольором, суттєво відрізняються. Докладніше це розглянуто у розділах 3 та 4 відповідно.

На рис. 6.9 наведено особливості структури обробки інформації щодо ненебезпечних факторів повітряного середовища (НФПС) від системи поточного вимірювання стану повітряного середовища в приміщеннях ОКІ (методи 3 розділу) на основі використання БПРП.

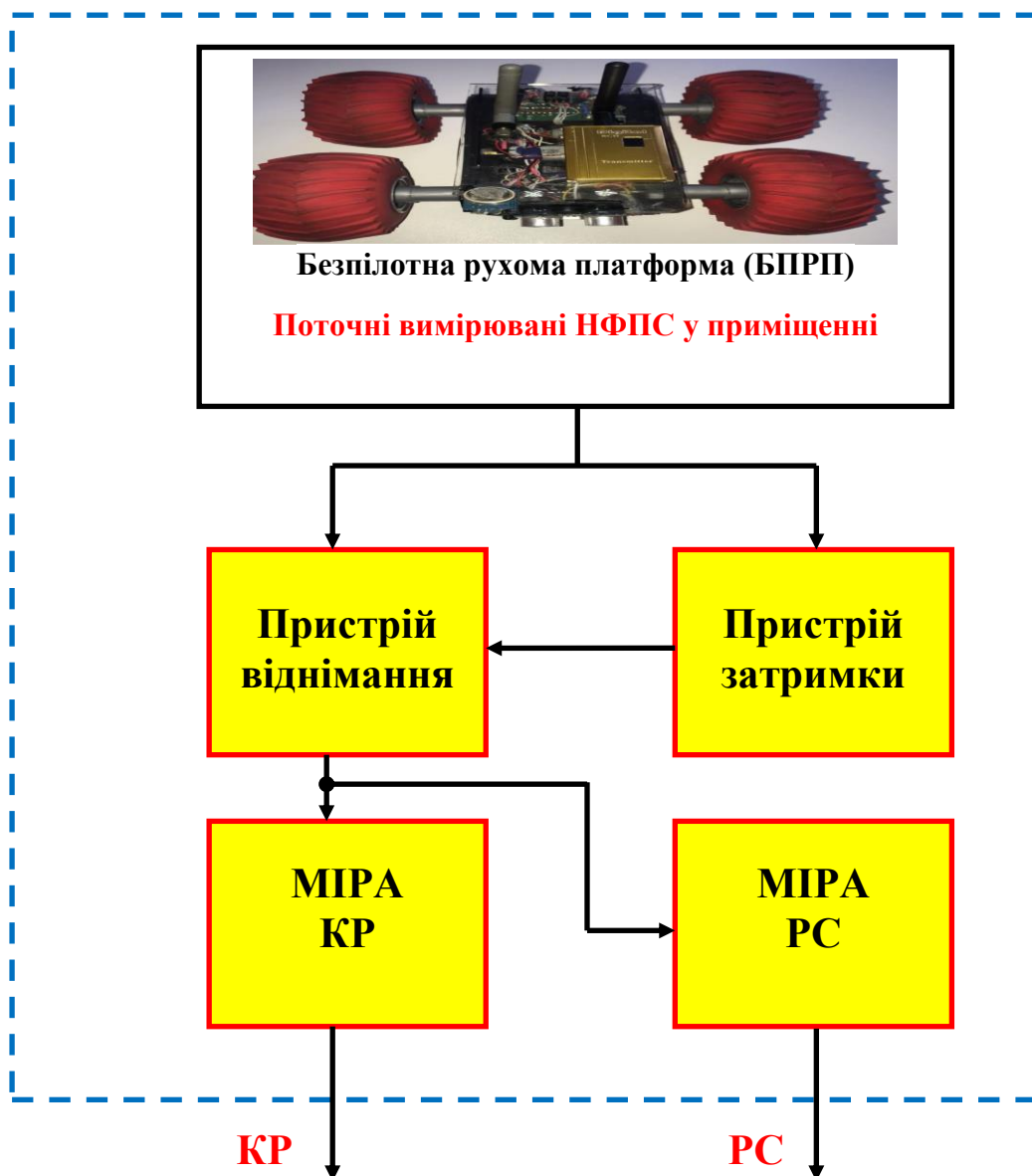


Рис. 6.9 – Структура обробки інформації від системи поточного вимірювання стану повітряного середовища в приміщеннях ОКІ на основі БПРП

Особливістю структури на рис. 6.9 є обчислення прирощень станів повітряного середовища щодо небезпечних факторів пожежі у приміщеннях ОКІ та обчислення на їх основі поточних мір КР та РС. Значення поточних мір КР та РС є вихідними щодо обробки інформації від системи поточного вимірювання стану повітряного середовища у приміщеннях ОКІ.

Структура обробки інформації від системи поточного вимірювання стану повітряного середовища на території (поблизу) ОКІ (методи 4 розділу) наведена на рис. 6.10.

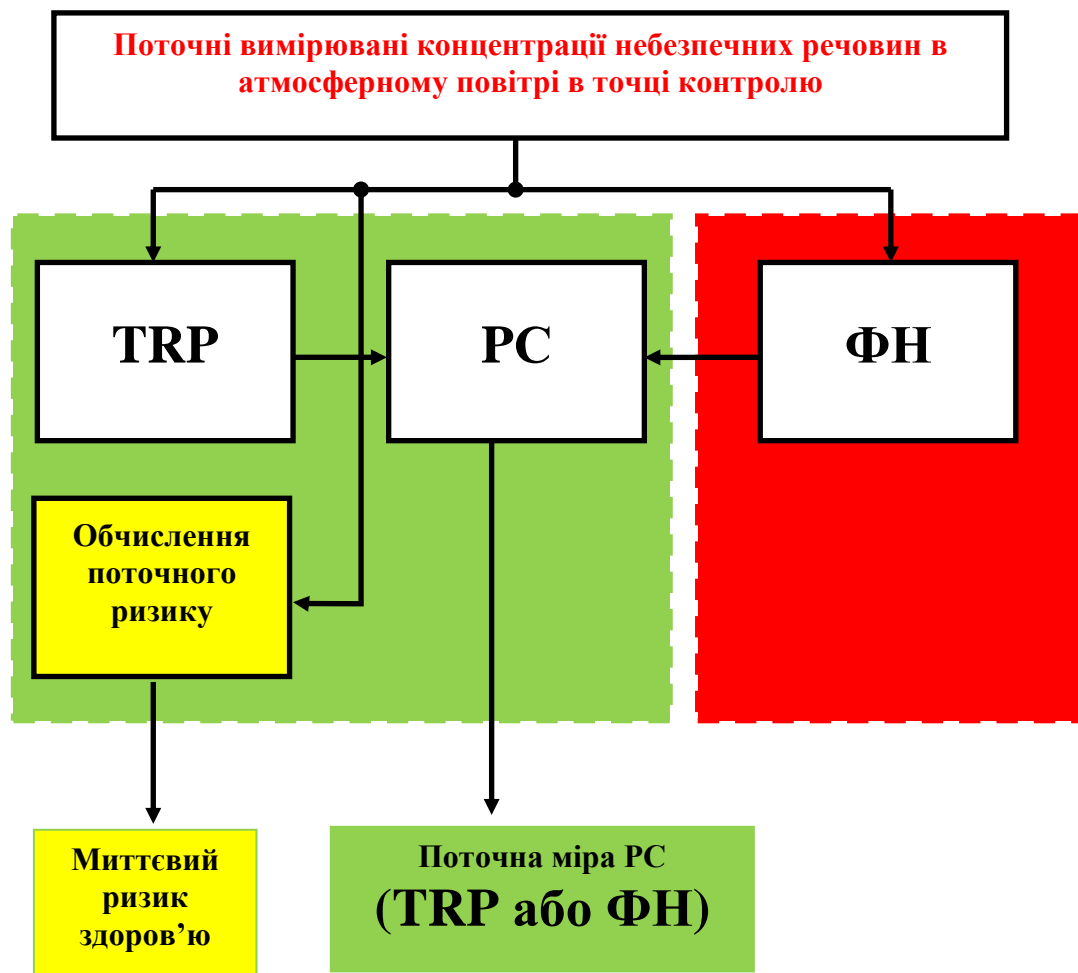


Рис. 6.10 – Особливості структури обробки інформації від системи поточного вимірювання стану атмосферного повітря на території (поблизу) ОКІ

Особливістю структури на рис. 6.10 є обчислення поточних РС на основі визначення поточних рекурентних діаграм (TRP) в реальному часі або поточної функції невизначеності (ФН) щодо сукупності вимірюваних концентрацій забруднювачів атмосферного повітря. Крім того на основі поточних вимірювань концентрацій забруднювачів атмосферного повітря при обробці обчислюється поточний ризик здоров'ю людини. Тому

вихідними даними структури обробки інформації від системи поточного вимірювання стану атмосферного повітря на території (поблизу) ОКІ є поточна міра РС, що обчислюється на основі TRP або ФН та відповідний поточний ризик здоров'ю людини.

#### **6.4 Особливості структури комплексної системи оперативного контролю та управління станом повітряного середовища на великих територіях**

Задачі оперативного контролю та управління станом повітряного середовища на великих територіях, які характерні для міст та ліквідації НС, що пов'язані із забрудненням атмосферного повітря та його небезпечним розповсюдженням. В цьому випадку, загальна структура комплексної системи оперативного контролю та управління станом повітряного середовища остається незмінною. Змінюється лише структура систем поточного вимірювання стану повітряного середовища та підтримки прийняття оперативного рішення щодо стану повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) ОКІ. Наведені вище структури стосуються лише однієї точки контролю. Однак, при контролі та управлінні станом повітряного середовища на великих територіях необхідно застосовувати не тільки багато точок контролю, але і розташовувати точки контролю на різних рівнях (висотах) забрудненого атмосферного повітря в заданій зоні [478]. Це буде викликати відповідні особливості щодо структури систем поточного вимірювання стану повітряного середовища та підтримки прийняття оперативного рішення. При цьому поточного вимірювання стану повітряного середовища та підтримки прийняття оперативного рішення буде відрізнятися від розглянутих вище наявністю більшої кількості каналів, які відповідають кожній точці контролю стану повітряного середовища.

У випадку використання множини існуючих стаціонарних постів контролю атмосферних забруднень міст, обробка інформації на основі методів

4 розділу, яка показана на рис. 6.8, з урахуванням пристроїв відповідного випробування на поріг, може здійснюватись в спеціальних державних лабораторіях контролю атмосферного забруднення міст. При цьому координати стаціонарних постів контролю є відомими. Якщо контроль здійснюється на основі БПРП наземного базування, то вказана обробка може бути виключена із структури системи підтримки прийняття управлінських оперативних рішень та включена до складу структури самої БПРП. Така обробка інформації може бути виконана на базі штатного мікропроцесору, який входить до складу БПРП. Однак у цьому випадку необхідно до системи підтримки прийняття управлінських оперативних рішень передавати поточні координати БПРП.

У разі необхідності контролю стану повітряного середовища на великих територіях на різних висотах можна застосовувати вказані БПРП на базі різних типів літальних апаратів [479, 480]. У цьому випадку потрібно також передавати поточні координати БПРП до системи підтримки прийняття управлінських оперативних рішень. Управління БПРП на базі літальних апаратів може здійснюватись на основі реалізації існуючих технологій та є не проблематичним на сучасному етапі.

## **Висновки розділу 6**

1. Запропонована нова комплексна система оперативного контролю та управління станом повітряного середовища, внаслідок пожеж (вибухів) у приміщеннях та викидів небезпечних речовин в атмосферне повітря об'єктів критичної інфраструктури, що функціонують в штатному або аварійному режимах, а також при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру, пов'язаних із потраплянням в атмосферне повітря небезпечних речовин. Запропонована комплексна система включає три системи – поточного вимірювання стану повітряного середовища, підтримки прийняття оперативного рішення та його виконання. Система поточного вимірювання дозволяє одержати поточну інформацію про стан забруднення повітря з

урахуванням впливу поточних метеорологічних умов та особливостей рельєфу місцевості в точках контролю. Тому традиційна інформація про метеорологічні умови та особливості рельєфу місцевості при контролі забруднень не використовується. Система підтримки прийняття управлінських оперативних рішень дозволяє проводити поточну кількісну оцінку забруднення повітря і виявляти небезпечні стани забруднення з метою попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру та формувати відповідні управлінські оперативні рішення щодо управління станом повітряного середовища. Система виконання управлінського рішення має у своєму розпорядженні необхідний ресурс щодо реалізації оперативних рішень, які направлені на попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури. Універсальність та конструктивність розроблених інженерно-технічних методів попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру, які засновані на уявленні забрудненого повітря як складної динамічної системи, забезпечує їх інтегрування в існуючі та перспективні системи контролю стану повітряного середовища.

2. Система поточного вимірювання стану повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури може базуватися на використанні різних типів сенсорів та платформ для їх розміщення. У випадку стаціонарних платформ система може базуватися на використанні існуючих штатних пожежних сенсорів у приміщеннях систем протипожежного захисту, або стаціонарних постів контролю забруднень атмосферного повітря єдиної системи контролю атмосферного забруднення в містах України. Крім стаціонарних платформ вимірювальні сенсори можуть розміщуватись на рухомих платформах наземного та повітряного базування. Розроблено діючий зразок безпілотної рухомої платформи (БПРП) для оперативного контролю стану повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури. БПРП може пересуватись в автоматичному режимі оминаючи перепони та передаючи вимірювані данні на приймач, а також у ручному режимі за управлінням оператора. Основними функціональними

елементами БПРП є мікропроцесор, акумулятор, електродвигуни, модуль управління двигунами, модуль відеокамери, GPS модуль, ультразвуковий радар, інфрачервоний датчик полум'я, датчик температури, газоаналізатор, а також бездротовий передавач та приймач інформації.

3. Розглянуто варіанти впровадження комплексної системи оперативного контролю та управління станом повітряного середовища на великих територіях. Відмічається, що при контролі та управлінні станом повітряного середовища на великих територіях необхідно застосовувати не тільки багато точок контролю, але і розташовувати точки контролю на різних висотах забрудненого атмосферного повітря. При цьому структура систем поточного вимірювання стану повітряного середовища та підтримки прийняття управлінських рішень буде визначатися наявністю більшої кількості каналів, які відповідають кожній точці контролю стану повітряного середовища. У випадку використання множини існуючих стаціонарних постів контролю атмосферних забруднень міст обробка інформації з урахуванням пристроїв відповідного випробування на поріг, може здійснюватись в спеціальних державних лабораторіях контролю атмосферного забруднення міст. При використанні БПРП наземного базування обробка інформації може здійснюватись на самій платформі з використанням штатного мікропроцесору. При цьому до системи підтримки прийняття управлінських рішень необхідно передавати поточні координати БПРП.

4. У разі контролю стану повітряного середовища на великих територіях на різних висотах, запропоновано застосування БПРП на базі різних типів літальних апаратів. При цьому для управління БПРП з системи підтримки прийняття управлінських рішень необхідно передавати спеціальні команди управління та приймати інформацію щодо поточних координат БПРП. Відмічається, що управління БПРП повітряного базування може здійснюватись на основі реалізації відомих та апробованих технологій.

## ВИСНОВКИ

Вирішена важлива наукова проблема у сфері цивільного захисту – створення нових інженерно-технічних методів попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища у приміщеннях та атмосферного повітря на території (поблизу) об'єктів.

В процесі виконання роботи були зроблені наступні наукові висновки.

1. Проаналізовано сучасний стан реагування та попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на небезпечних об'єктах. Встановлено, що небезпека надзвичайних ситуацій техногенного характеру має всесвітній характер та негативну динаміку щодо зростання, причинами переважної більшості надзвичайних ситуацій є пожежі, при цьому як нормальна так і аварійна робота небезпечних об'єктів характеризується значними викидами в атмосферне повітря небезпечних речовин. Попередження надзвичайних ситуацій забезпечується завчасним або оперативним проведенням комплексу заходів, спрямованих на максимально можливе зниження імовірності виникнення чи мінімізацію наслідків надзвичайних ситуацій, а також на збереження здоров'я людей, зниження розмірів шкоди, завданої довкіллю і матеріальних втрат у разі їх виникнення. При цьому ефективним принципом попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру є застосування активних систем безпеки, заснованих на використанні чутливих елементів (сенсорів), які відстежують стан небезпечного об'єкта і виявляють передумови виникнення аварійних ситуацій.

2. Розглянуті стан та особливості процесу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури України. Показано, що до об'єктів критичної інфраструктури відноситься сукупність стратегічно важливих об'єктів для економіки і національної безпеки, порушення функціонування яких може завдати шкоди життєво



важливим національним інтересам. При цьому, для забезпечення стійкості об'єктів критичної інфраструктури до надзвичайних ситуацій потребують розробки нові інженерно-технічні методи попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру, які базуються на оперативному контролі стану повітряного середовища об'єкта. Однак, існуючі методи та засоби попередження надзвичайних ситуацій розглядають повітряне середовище як лінійну систему, при цьому повітряне середовище в умовах небезпеки являє собою складну нелінійну динамічну систему. Визначено, що сучасним конструктивним підходом до вивчення зазначених систем є методи рекурентних діаграм і оцінки рекурентності станів, які, попри беззаперечні переваги, в системах попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру раніше не використовувались.

3. На основі математичної моделі поточних показників фрактальності у вигляді мір кореляційної розмірності та рекурентних станів щодо прирощень станів повітряного середовища при загорянні в приміщеннях розроблено інженерно-технічний метод попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) у приміщеннях об'єктів критичної інфраструктури. Метод призначений для раннього виявлення загорянь за поточними показниками фрактальності щодо прирощень станів повітряного середовища у приміщеннях об'єктів. Застосування методу передбачає виконання семи процедур, а саме обґрунтування та визначення вхідних даних про об'єкти та небезпечні фактори повітряного середовища у приміщеннях, інженерно-технічного обґрунтування типів вимірювальних сенсорів, засобів і методик вимірів стану повітряного середовища, вимір небезпечних факторів станів повітряного середовища та обчислення поточних прирощень станів, використання запропонованої моделі щодо показників фрактальності прирощень станів, обґрунтування порогів для поточних значень мір кореляційної розмірності та рекурентності станів, виявлення моментів перевищення поточними значеннями мір кореляційної розмірності та рекурентності станів відповідних порогів з метою реалізації

різного рівня надійності попередження надзвичайних ситуацій внаслідок пожеж (вибухів), обґрунтування та вибір управлінських рішень щодо попередження або недопущення виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) у приміщеннях об'єктів критичної інфраструктури.

4. На основі математичної моделі системи забруднення атмосферного повітря на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури у вигляді складної динамічної системи, що характеризується поточними значеннями рекурентних станів забрудненої атмосфери, які обчислюються на основі рекурентних діаграм і функції невизначеності щодо поточного вектору стану концентрацій забруднювачів, та ризиків негайних токсичних ефектів і хронічної інтоксикації від забруднювачів, розроблено інженерно-технічний метод попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури. Метод призначений для попередження ризику здоров'ю людей понад величини прийнятного допустимого індивідуального ризику для людини. Застосування методу передбачає виконання восьми процедур, а саме інженерно-технічне обґрунтування системи контролю атмосферних забруднень та метрологічного забезпечення, технічне вимірювання та обчислення поточних рекурентних діаграм, використання математичної моделі забрудненої атмосфери з метою виявлення рекурентних станів та попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) об'єктів, оцінка ризиків негайних токсичних ефектів та хронічної інтоксикації для людини, що спричиняються забрудненою атмосферою, обґрунтування управлінських рішень щодо зниження ризику здоров'ю людини внаслідок наявності в атмосферному повітрі шкідливих речовин, шляхом зменшення рівнів або виключення локальних викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря в моменти рекурентних станів забрудненої атмосфери. З урахуванням реалізації

запропонованого методу на основі використання безпілотних рухомих платформ розроблені комунікативні моделі для безпроводних одно точкового та багато точкового середовища. Відмічається, що запропоновані моделі дозволяють досліджувати комунікативні можливості безпроводних середовищ на фізичному рівні для розробки надійної та стабільної інформаційної архітектури комплексної системи оперативного контролю стану повітряного середовища на основі використання безпілотних рухомих платформ.

5. Результати експериментів, виконаних у лабораторній камері при загорянні тестових матеріалів та вимірюванні небезпечних факторів повітряного середовища, підтвердили працездатність запропонованих моделей та інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) у приміщеннях об'єктів критичної інфраструктури. Одержані робочі характеристики та характеристики виявлення ранніх загорянь дозволяють розраховувати кількісні показники достовірності інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) у приміщеннях об'єктів щодо різних умов та свідчать про його достовірність. Достовірність моделей та інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій внаслідок наявності шкідливих речовин в атмосферному повітрі перевірялась на основі реальних вимірів поточної концентрації забруднювачів атмосферного повітря на стаціонарних постах типової міської конфігурації з індексом забруднення повітря 6,8 од. (характерний для більшості міст світу з помірно розвиненою інфраструктурою) та їх здатності щодо виявлення апіорі достовірної небезпечної події. Одержані результати засвідчують достовірність запропонованих моделей та методу виявляти небезпечні події, що обумовлені небезпечним впливом забрудненого атмосферного повітря на людину. Результати моделювання для запропонованих дво точкових та багато точкових комунікативних моделей бездротового середовища у тестових ситуаціях, що характерні для розглянутих надзвичайних ситуацій, свідчать

про їх валідацію та здатність для використання при розробці пропозицій з підвищення комунікативних можливостей бездротового середовища у випадку реалізації запропонованих інженерно-технічних методів попередження надзвичайних ситуацій на основі використання безпілотних рухомих платформ.

б. На основі розроблених інженерно-технічних методів попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) та внаслідок наявності шкідливих речовин в атмосферному повітрі запропоновано нову комплексну систему оперативного контролю та управління станом повітряного середовища. До складу розробленої комплексної системи включені три системи – систему поточного вимірювання стану повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури, систему підтримки прийняття оперативного управлінського рішення та систему виконання такого рішення.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Класифікатор надзвичайних ситуацій. Київ, ДК 019:2010. Чинний від 01.01.2011. URL: [http:// www.ligazakon.ua](http://www.ligazakon.ua)
2. Кодекс гражданской защиты Украины. URL: <http://www.uazakon.ru/kgz/.html>
3. Бондаренко А. В. Классификация чрезвычайных ситуаций, 2012. 5 с. URL: [http:// www.ohrana-bgd.narod.ru](http://www.ohrana-bgd.narod.ru)
4. Рустамов Э. А. Гражданская защита населения и территорий. М.: Наука, 2011. 312 с.
5. Стеблюк М. И. Гражданская оборона и гражданская защита. К.: Наукова думка, 2012. 212 с.
6. Определение уровня чрезвычайных ситуаций, регламент представления информации об их угрозе или возникновении. Интернет публикация, 2012. 8 с. URL: <http://fredlist.ru>
7. Кириленко В. И. Классификация чрезвычайных ситуаций, 2014. 18 с. URL: <http://allbest.ru/life.html>
8. Закон України «Про захист населення та територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру» від 08.06.2000 № 1809-III. URL: <http://www.ligazakon.ua>
9. Цивільна оборона. За ред. В. С. Франка. Львів: Афіша, 2001. 206 с.
10. Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций. Под ред. Э. А. Рустамова. М.: В. школа, 2014. 210 с.
11. Терроризм и террористы: исторический справочник. Под общ. ред. А. Е. Тараса. Минск: Харвит, 1999. 606 с.
12. Хофман Б. Терроризм: взгляд изнутри. М.: Ультра культура, 2003. 126 с.
13. Barry M. Rubin, Judith Colp Rubin. Chronologies of modern terrorism. M.E. Sharpe, 2008. 405 p.

14. Byman D. *Deadly Connection: States that Sponsor Terrorism* // Cambridge University Press, 2005. 380 p.
15. Конон С. М. *Терроризм и экстремизм: уголовно-правовая характеристика*. М.: Проспект, 2005. 176 с.
16. Королев А. А. *Террор и терроризм в психологическом и идеологическом измерении: история и современность*. М.: МГУ, 2008. 282 с.
17. Гарифулин Р. Р. *Психология терроризма*. М.: МГУ, 2013. 240 с.
18. Кудоснов В. И. *Терроризм как порождение глобализма*. Под ред. Ю. Н. Москвича. Красноярск: Изд-во «Литера-принт», 2007. 176 с.
19. Ильясов Ф. Н. *Терроризм – от социальных оснований до поведения жертв*. М.: Наука, 2010. 198 с.
20. Гевелинг Л. В. *Коррупционные формы политического финансирования: материальная основа распространения терроризма*. М.: Изд-во МНЭПУ, 2005. 142 с.
21. Классификация чрезвычайных ситуаций. URL: <http://www.bibliotekar.ru/ecologia-5/107.htm>
22. Чрезвычайные ситуации мирного и военного времени. URL: [http://www.nntu.ru/RUS/otd\\_sl/gochs/posobiya/posob5/posob5.doc](http://www.nntu.ru/RUS/otd_sl/gochs/posobiya/posob5/posob5.doc)
23. Чрезвычайные ситуации природного характера. URL: <http://www.ooo-edelveis.ru/chrezvychajnyye-situacii-prirodnogo-kharaktera.php>
24. Чрезвычайные ситуации экологического и социального характера. URL: <https://obz112./chrezvychajnyye-situacii-ekologicheskogo-i-socialnogo-proi.htm>
25. Чрезвычайные ситуации мирного времени. URL: [https://www.plam.ru/ucebник/bezopasnost\\_zhiznedejatelnosti/p2.php](https://www.plam.ru/ucebник/bezopasnost_zhiznedejatelnosti/p2.php)
26. Чрезвычайные ситуации второго и третьего уровней. URL: [https://www.who.int/hac/donorinfo/g3\\_contributions.htm](https://www.who.int/hac/donorinfo/g3_contributions.htm)
27. Что означает режим «чрезвычайной ситуации». URL: <https://112.ua/chto-oznachaet-rezhim-chrezvychaynoy-situacii-na-donbasse.htm>

28. Кодекс цивільного захисту України (офіційний текст). Видавець Паливода А. В., Київ, 2015. 132 с.

29. Азаренко Е. В., Гончаренко Ю. Ю., Фурсенко А. Н., Черненко Г. А. Основные требования к системе поддержки принятия решения по предотвращению чрезвычайных ситуаций в прибрежных водах // Сб. научн. трудов СНУЯЭиП. Вып. 2 (34). Севастополь: СНУЯЭиП, 2010. С. 216–220.

30. Гончаренко Ю. Ю., Браславский Ю. В., Григорьева В. Н. Структурно-логическая модель развития чрезвычайной ситуации, вызванной разливом нефти // Сб. научн. трудов СНУЯЭиП. Вып. 4 (36). Севастополь: СНУЯЭиП, 2010. С. 222–227.

31. Гончаренко Ю. Ю. Структура контура управления информационной безопасностью предприятия // Научно-практический журнал «Экономика и управление». № 5. Симферополь: НАПКС, 2012. С. 97–101.

32. Список радиационных аварий. Википедия. URL: [https://wikipedia.org/wiki/список\\_радиационных\\_аварий](https://wikipedia.org/wiki/список_радиационных_аварий)

33. Pennsylvania Nuclear Profile. Energy information administration, 2010. 12 p.

34. Pressurized water reactor systems. Reactor concepts manual. Nuclear regulatory commission, 1980. 201 p.

35. Westinghouse world view. Westinghouse electric company. April, 2005. 28 p.

36. Taylor L. TMI fuel characteristics for disposal critically analysis. Idaho national laboratory. United States Department of Energy. September, 2003. 198 p.

37. World Nuclear association: Three Mile Accident. URL: <https://www.world-nuclear.org/info/inf36.html>

38. Walker J. S. Three Mile Island: A Nuclear crisis in historical perspective // Berkley: University of California Press, 2004. 231 p.

39. Самойлов О. Б., Усынин Г. Б., Бахматов А. М. Безопасность ядерных энергетических установок. Монография. М.: Энергоатомиздат, 1989. 280 с.

40. Three Mile Island, Unit 1. Fact Sheet. Exelon, 2012. 21 p.

41. Three Mile Island, Unit 2. Fact Sheet. Exelon, 2012. 24 p.
42. Three Mile Island. Nuclear regulatory commission, 1980.
43. Report of the president's commission of the accident of Three Mile Island. Washington, DC. The Commission, 1979.
44. Rogovin M. Three Mile Island: A report to the commissioners and to the public. Special injury group, 1980.
45. Fact sheet from the US Nuclear regulatory commission, 1979.
46. US NRC. URL: <http://www.nrc.gov/reactors/power.html>
47. Integrated reliability and risk analysis system basic training course. NRC, Washington, 1995. 302 p.
48. Бабабев Н. С., Демин В. Ф., Ильин Л. А. Ядерная энергетика, человек и окружающая среда. Монография. М.: Энергоатомиздат, 1984. 314 с.
49. АЭС Три-Майл-Айленд. Википедия. URL: [http://wikipedia.org/wiki/авария\\_на\\_три\\_майл\\_айленд](http://wikipedia.org/wiki/авария_на_три_майл_айленд)
50. Чернобыльская АЭС. URL: <http://wikipedia.org/wiki.ua>
51. Легасов В. А. Описание Чернобыльской АЭС с реактором РБМК–1000. Доклад 1986. Часть 1.
52. Легасов В. А. Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствиях, подготовленная для МАГАТЭ. Доклад. 1986. Часть 2.
53. Анализ нарушений в работе энергоблоков Минатомэнерго СССР в 1987 году. Рекомендации и мероприятия по повышению надежности и безопасности. М.: ВНИИ ФЭС, 1988. 140 с.
54. Кисилев А. Н. Ядерное топливо разрушенного реактора. Москва – Чернобылю. М.: Воениздат, 1998. 128 с.
55. Предотвращение развития аварии и уменьшение ее последствий. Борьба с пожаром на АЭС. Доклад INSAG-1. 1986. 240 с.
56. Чорнобильська катастрофа 10 років. За редакцією В. Г. Барьяхтара. К.: Наукова думка, 1996. 575 с.



57. Чорнобильська катастрофа 20 років. За редакцією Е. В. Соботовича, Г. М. Бондаренка, Г. В. Лисиченка. К.: Наукова думка, 2006. 408 с.

58. АЭС Михама – авария на японской АЭС. URL: <http://miraes.ru/aes-mihama-avariya-na-yaponskoj-aes>

59. Авария 9 августа 2004 года на АЭС Михама – первая Фукусима. URL: <http://miraes.ru/avariya-9-avgusta-2004-goda-na-aes-mihama-pervaya-fukusima>

60. АЭС Михама. URL: <http://www.seogan.ru/aes-mixama.html>

61. АЭС Фукусима-1. Википедия. URL: [http://wikipedia.org/wiki/АЭС\\_фукусима\\_1](http://wikipedia.org/wiki/АЭС_фукусима_1)

62. Авария на АЭС Фукусима-1. Википедия. URL: [http://wikipedia.org/wiki/авария\\_на\\_АЭС\\_фукусима\\_1](http://wikipedia.org/wiki/авария_на_АЭС_фукусима_1)

63. World nuclear industry status report, 2014. URL: <http://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf>

64. Roadmap for Fukushima Daiichi restoration. Input: World nuclear news. 18 april 2011.

65. No significant damage to fuel at unit 4. Input: World nuclear news. 30 april 2011.

66. Filters for Fukushima Daiichi. Input: World nuclear news. 6 may 2011.

67. World nuclear industry status report, 2015. URL: [http://www.worldnuclearreport.org/the\\_world\\_nuclear\\_industry\\_status\\_report\\_2015/html](http://www.worldnuclearreport.org/the_world_nuclear_industry_status_report_2015/html)

68. Над АЭС Фукусима-1 запретили полеты. URL: <http://www.lenta.ru>

69. Вениаминов Н. Н., Смирнов А. В., Березин А. В., Тарасов А. Ю. Масс-спектрометрическое определение следов урана и тория в аэрозолях, отобранных на российской территории после аварии на японской АЭС Фукусима-1 // Российский химический журнал, 2012. Т. LVI, № 5–6. С. 87–90.

70. Эксперты: авария на Запорожской АЭС – тревожный звонок. URL: <http://podrobnosti.ua/1006346-eksperty-avarija-na-zaporozhskoj-aes-trevozhnyj-zvonok.html>

71. Что произошло на Запорожской АЭС. URL: [http://golos.ua/suspilstvo/chto\\_proizoshlo\\_na\\_zaporojskoj\\_aes\\_2079](http://golos.ua/suspilstvo/chto_proizoshlo_na_zaporojskoj_aes_2079)

72. Авария на Запорожской АЭС. URL: <http://ruspravda.info/Avariya-na-Zaporozhskoy-AES--prestuplenie-okkupatsionnogo-rezhima-i-SSHA-8834.html>

73. На Запорожской АЭС произошла авария. URL: [http://golos.ua/suspilstvo/chto\\_proizoshlo\\_na\\_zaporojskoj\\_aes](http://golos.ua/suspilstvo/chto_proizoshlo_na_zaporojskoj_aes)

74. На Южно-Украинской АЭС произошла серьезная авария. URL: [http://www.utro.ua/ru/proisshestviya/na\\_yuzhno\\_ukrainskoj\\_aes\\_proizoshla\\_serez\\_naya\\_avariya\\_4a07eb5eb5d59](http://www.utro.ua/ru/proisshestviya/na_yuzhno_ukrainskoj_aes_proizoshla_serez_naya_avariya_4a07eb5eb5d59)

75. На Южно-Украинской АЭС произошла авария. URL: <http://fakty.ictv.ua/ru/videos/12336>

76. На Южно-Украинской АЭС едва избежали аварии. URL: <http://my.ictv.ua/1448/1453215>

77. Южно-Украинская АЭС полностью остановлена из-за аварий. URL: <http://ukraina.ru/news/20160323/1015966086.html>

78. Авария на Южно-Украинской АЭС совет эксперименты Westinghouse в Украине. URL: <http://zhzh.info/blog/2016-06-24-19305>

79. На Южно-Украинской АЭС сработала аварийная защита. URL: <http://korrespondent.net/business/companies/3779864-na-yuzhno-ukraynskoj-aes-srabotala-avaryinaia-zaschyta-reaktora>

80. Авария на Южно-Украинской АЭС: третий блок отключён от энергосети. URL: <http://nikcenter.org/newsItem/34825>

81. На энергоблоке Хмельницкой АЭС произошла авария. URL: <http://korrespondent.net/business/economics/3757864-v-ukrayne-padaet-proyzvodstvo-atomnoi-enerhyuhttps://lenta.ru/news/2016/07/17/haes>

82. На Хмельницкой АЭС случилась авария. URL: <http://www.segodnya.ua/regions/lvov/Na-Hmelnickoy-AES-sluchilas-avariya-459959.html>

83. На Ровенской АЭС произошла авария. URL: [http://www.utro.ua/ru/proisshestviya/na\\_rovenskoj\\_aes\\_proizoshla\\_avariya1253853588](http://www.utro.ua/ru/proisshestviya/na_rovenskoj_aes_proizoshla_avariya1253853588)

84. На Ровенской АЭС произошла авария. URL: <http://poslezavtra24.ru/59469-na-rovenskoj-ajes-proizoshla-avarija.html>

85. Ривненская АЭС. URL: [http://miraes.ru/rovenskaya-aes-rivnens\\_kaya-aes-raes-aes-kuznetsovsk](http://miraes.ru/rovenskaya-aes-rivnens_kaya-aes-raes-aes-kuznetsovsk)

86. Ровенская АЭС – портал новостей LB.ua URL: [http://lb.ua/tag/14498\\_rovenskaya\\_aes](http://lb.ua/tag/14498_rovenskaya_aes)

87. Ядерный объект. Словарь финансовых и юридических терминов. URL: [http://www.consultant.ru/law/ref/ju\\_dict/word/yadernyj\\_obekt](http://www.consultant.ru/law/ref/ju_dict/word/yadernyj_obekt)

88. Иванов В. К. Радиологические последствия аварии на АЭС Фукусима – окончательное заключение экспертов МАГАТЭ. М.: Российская научная комиссия по радиологической защите, 2014. 17 с.

89. Азаренко Е. В., Браславский Ю. В., Гончаренко Ю. Ю. Оценка эффективности управления чрезвычайной ситуацией // Сб. научн. трудов СНУЯЭиП. Вып. 2 (38). Севастополь: СНУЯЭиП, 2011. С. 239–245.

90. Азаренко Е. В., Гончаренко Ю. Ю., Дивизинюк М. М. Проблема управления экологической безопасностью прибрежных вод и пути ее решения // Зб. наук. праць «Системи обробки інформації». Харків: ХУПС ім. Івана Кожедуба, 2012. Вип. 2 (100). С. 271–275.

91. Азаренко Е. В., Бляшенко О. В., Гончаренко Ю. Ю., Дивизинюк М. М. Хронология чрезвычайных ситуаций и основные этапы их развития // Техногенно-экологическая безопасность и гражданская защита. Киев: ГП «Институт геохимии окружающей среды НАНУ», 2014. Вып. 7. С. 119–128.

92. Азаренко Е. В., Бляшенко О. В., Дивизинюк М. М., Ковач В. Е. Защита информации в системах мониторинга чрезвычайных ситуаций // Науково-технічний збірник «Правове, нормативне та метрологічне забезпечення систем захисту інформації в Україні». Київ: Державна служба спеціального звуку та захисту інформації в Україні НТУУ «КПІ», 2015. Вип. 1 (29). С. 82–87.

93. Конвенция о ядерной безопасности. URL: <http://bellona.ru/2007/05/07/konventsija-o-yadernoj-bezopasnosti>
94. Ядерная безопасность. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AF%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B0%D1%>
95. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%B1%D1%89%D0%B8%D0%B5>
96. Лукацкий А. Кибербезопасность ядерных объектов. URL: <http://www.pircenter.org/media/content/files/13/14758399062.pdf>
97. Радиационно-опасные объекты. URL: [http://rb.mchs.gov.ru/radiation\\_map](http://rb.mchs.gov.ru/radiation_map)
98. Методологический центр ЭКОЛАЙН. URL: <http://www.cci.glasnet.ru/books>
99. Азаренко О. В., Бусигін Б. С., Дівізінюк М. М. Тулмачний словник з інформатики. Дніпропетровськ: НГУ, 2010. 605 с.
100. Национальная лаборатория Ок-Ридж. URL: <http://org/wiki/%D0%9D%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%>
101. Окриджская национальная лаборатория. URL: <http://multitran.com/m.exe?a=3&l1=2&l2=1&s=%D0%9E%D0%BA%D1%80%D0%>
102. Маяк (производственное объединение). URL: <http://wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1>
103. Ядерная авария на комбинате «Маяк». URL: <http://lastday.club/yadernaya-avariya-na-kombinate-mayak-ili-kyishtyimskaya-tragediya>
104. Химический комбинат Маяк. URL: <http://www.svoboda.org/a/24197682.html>
105. Кыштымская авария: химический взрыв с ядерными последствиями. URL: <http://industrial-disasters.ru/disasters/kyshtym>

106. Катастрофа на комбинате «Маяк», 29 сентября 1957 г. URL: <http://http://nuclear.tatar.mtss.ru/fa230907.htm>
107. Кыштымская авария. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%>
108. Озеро Карачай – самое опасное место на планете. URL: <http://animalworld.com.ua/news/Ozero-Karachaj-samoje-opasnoje-mesto-na-planete>
109. Уральская Хиросима. URL: <http://www.tipazheleznogorsk.narod.ru/ghk6.html>
110. Карачай (озеро). URL: <http://wikipedia.org/wiki/%D0%9A>
111. Experimental Breeder Reactor I. URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Experimental\\_Breeder\\_Reactor\\_I](http://en.wikipedia.org/wiki/Experimental_Breeder_Reactor_I)
112. Неизвестные “Чернобыли”. URL: <http://www.gazeta.ee/p=564>
113. Чернобыль и другие радиационные аварии. URL: <http://forum.fregat.com/archive/index.php/t-8940.html>
114. Ядерные инциденты в мире с 1956 г. URL: <http://tassgraphics.ru/itemid=23517&categoryID=63>
115. Атомні аварії в країнах світу. URL: <http://www.law.nau.edu.ua/uk/molod-i-zakon/1746-250416mz2>
116. Крупнейшие радиационные аварии. URL: <http://kommersant.ru/doc/2441317>
117. Авария на ядерном объекте Токаймура. URL: <http://wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B2%D0%B0%>
118. Авария на Токаймура. Япония. 30 сентября 1999 года. URL: <http://miraes.ru/avariya-na-tokaymura-yaponiya-30-sentyabrya-1999-goda>
119. Химически опасный объект. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5>
120. Химические опасные объекты Украины и Днепропетровской области. URL: <http://lektsii.com/2-52494.html>

121. На 34 химически опасных объектах Харьковской области возможны аварии. URL: <http://stroyobzor.ua/news/80667>

122. Аварии с выбросом опасных химических веществ: примеры. URL: <http://arcticaoу.ru/fb.ru/article/180481>

123. Аварии, связанные с утечкой химических веществ в России в 2010-2013 годах. URL: <http://ria.ru/spravka/20130208/1921959865.html>

124. Азаренко Е. В., Гочаренко Ю. Ю., Дивизинюк М. М., Коноваленко Н. В., Рыжкин А. С. Оптимизация защиты телеметрической информации, циркулирующей в контурах управления критически важного объект // Науковий вісник Академії Муніципального управління. Збірник наукових праць, Серія «Техніка». Вип. 1–2 (11). Київ: Академія муніципального управління, 2016. С. 24–32.

125. Севезька катастрофа. URL: [http://wikipedia.org/wiki/севезька\\_катастрофа](http://wikipedia.org/wiki/севезька_катастрофа)

126. Авария на заводе Флибоксо. URL: [http://revolution.allbest.ru/life/00325649\\_0.html](http://revolution.allbest.ru/life/00325649_0.html)

127. Бхопольская катастрофа. URL: [http://wikipedia.org/бхопольская\\_катастрофа](http://wikipedia.org/бхопольская_катастрофа)

128. Химическая катастрофа в Ярославле (1988). URL: [http://dead.city.ru/transport/katastrofa\\_yaroslavl](http://dead.city.ru/transport/katastrofa_yaroslavl)

129. Ионавский взрыв: 20 лет крупнейшей техногенной катастрофе СНГ. URL: <http://ria.ru/eco/20090320/165544356.html>

130. Химические аварии и катастрофы. URL: <http://www.newsru.com/background/04nov2004/chemdic.html>

131. Калуш хочет быть зоной экологического бедствия 3-4 года / URL: <http://www.unian.net/society/319872-kalush-hochet-byit-zonoy-ekologicheskogo-bedstviya-34-goda.html>

132. Сотрудники МЧС уже трижды выезжали в Калуш для изучения ситуации, связанной с необходимостью ликвидации возникшей угрозы. URL:

<http://ru.tsn.ua/ukrayina/mchs-gotovitsya-otselit-zhitelei-kalusha-iz-zony-ekologicheskogo-bedstviya.html>

133. Калуш – зона экологического бедствия. URL: <http://ekoinform.lviv.ua/p=766>

134. На химзаводе «Стирол» в Горловке произошел выброс аммиака, погибли 5 человек. URL: [http://zn.ua/UKRAINE/na-zavode-firtasha-v-gorlovke-proizoshel-vybros-ammiaka-pogibli-5-chelovek-126920\\_.html](http://zn.ua/UKRAINE/na-zavode-firtasha-v-gorlovke-proizoshel-vybros-ammiaka-pogibli-5-chelovek-126920_.html)

135. Авария на заводе Стирол в Донецкой области. URL: <http://korrespondent.net/special/147>

136. Бойко: Авария на «Стироле» – самая крупная в последнее время в химической отрасли. URL: <http://www.segodnya.ua/regions/donetsk/Boyko-Avariya-na-Stirole-samaya-krupnaya-v-poslednee-vremya-v-himicheskoy-otrasli-452603.html>

137. Пожар на Угледорской ТЭС уничтожил 4 энергоблока, город остался без тепла и воды. URL: [http://zn.ua/UKRAINE/pozhar-na-uglegorskoy-tes-unichtozhil-4-energobloka-gorod-ostalsya-bez-tepla-i-vody-119714\\_.html](http://zn.ua/UKRAINE/pozhar-na-uglegorskoy-tes-unichtozhil-4-energobloka-gorod-ostalsya-bez-tepla-i-vody-119714_.html)

138. Пожар на Угледорской ТЭС в Донецкой области. URL: <http://www.youtube.com/watch?v=MrBT4dEaXVo>

139. Пожар на Угледорской ТЭС, в котором погибли люди, произошел из-за халатности рабочего. URL: [http://zn.ua/UKRAINE/stala-izvestna-prichina-pozhara-na-uglegorskoy-tes-v-kotorom-pogibli-lyudi-128574\\_.html](http://zn.ua/UKRAINE/stala-izvestna-prichina-pozhara-na-uglegorskoy-tes-v-kotorom-pogibli-lyudi-128574_.html)

140. Чрезвычайная ситуация в Светлодарске: на Донетчине взорвалась ТЭС. URL: <http://tsn.ua/spetstemi/chrezvychnaya-situaciya-v-svetlodarske-na-donetchine-vzorvalas-tes-298783.html>

141. Названы причины пожара на Угледорской ТЭС. URL: <http://www.pravda.com.ua/rus/news/2013/04/16/6988301>

142. Названа причина пожара на Угледорской ТЭС. URL: <http://from-ua.com/news/267095-nazvana-prichina-pozhara-na-uglegorskoi-tes.html>

143. У Азарова назвали причины пожара на Углегорской ТЭС. URL: <http://ru.tsn.ua/ukrayina/u-azarova-nazvali-prichiny-pozhara-na-uglegorskoj-tes-301302.html>

144. Авария произошла на «Азоте». URL: <http://cxid.info/avariya-proizoshla-na-azote-n1764>

145. На северодонецком заводе произошла авария на газопроводе и пожар. URL: <http://ru.tsn.ua/ukrayina/na-severodoneckom-zavode-proizoshla-avariya-na-gazoprovode-i-pozhar.html>

146. Авария Северодонецк Азот. URL: [http://www.youtube.com/watch?v=51mA\\_jhBNUc](http://www.youtube.com/watch?v=51mA_jhBNUc)

147. На Северодонецком «Азоте» произошла серьезная авария. URL: [http://www.chemport.ru/chemprodnews\\_5438.html](http://www.chemport.ru/chemprodnews_5438.html)

148. Авария на Северодонецкой ТЭЦ: в 20-градусный мороз жилые дома остались без отопления. URL: <http://kp.ua/incidents/485498-avaryia-na-severodonetskoj-tets-v-20-hradusnyi-moroz-zhylye-doma-ostalys-bez-otopleniya>

149. На Полтавщині вибухнув магістральний газогін Уренгой-Помари-Ужгород. URL: [http://zaxid.net/na\\_poltavshhini\\_vibuhnuv\\_magistralniy\\_gazogin\\_urengoypomariuzhgorod\\_n1311816](http://zaxid.net/na_poltavshhini_vibuhnuv_magistralniy_gazogin_urengoypomariuzhgorod_n1311816)

150. Підрозділи Нафтогазу разом з ДСНС зупинили витік газу з розгерметизованої свердловини газосховища. URL: <http://utg.ua/utg/media/news/2016/02/pdrozdli-naftogazu-razom-z-dsns-zupinili-vitk-gazu-z-rozgermetizovano-sverdlovini-gazosxovishha.html>

151. Вибух на газопроводі в Австрії: від теплової хвилі плавилися авто. URL: <http://www.volynnews.com/news/all/vybukh-na-hazoprovodi-v-avstriyi-vid-teplovoyi-khvyli-plavylisia-avto>

152. При взрыве склада боеприпасов в Индонезии погибли 20 человек. URL: <http://www.mir24.net/world-news/321-world-events/13017-pri-vzryve-sklada-boepripasov-v-indonezii-pogibli-20-chelovek>

153. Предупреждение чрезвычайных ситуаций в Южной Корее URL: <https://ria.ru/20150328/1055115642.html>



154. Nigeria military under fire. URL: <https://news.bbc.co.uk/2/hi/africa/1787494.stm>

155. Congo explosions: Soldiers jailed by Brazzaville court. URL: <https://www.bbc.com/news/world-africa-24035538>

156. Взрыв в Конго: 20 погибших. URL: <https://podrobnosti.ua/955163-vzryv-v-kongo-20-pogibshih.html>

157. В Китае взорвался склад с оружием, погибли 17 военных. URL: <https://korrespondent.net/world/3379947-v-kytae-vzorvalsia-sklad-s-oruzhyem-pohybly-17-voennykh>

158. Взрыв на армейском складе в Шри-Ланке: шрапнель разлетелась по округе. URL: <https://mir24.tv/news/14520358>

159. Пожар на складе боеприпасов в Индии: погибли до 17 человек. URL: <https://korrespondent.net/world/3690270-pozhar-na-sklade-boeprypasov-v-yndyy-pohybly-do-17-chelovek>

160. Выбух на території небезпечного об'єкта в Алжирі в провінції Айн-Дефла. URL: <https://life.ru/tновости/165061>

161. В Японии на американском военном складе прогремели взрывы URL: <https://tsn.ua/svit/v-yaponii-na-amerikanskom-voennom-sklade-progremeli-vrzyvy-474048.html>

162. Unplanned Explosions at Munitions Sites. URL: <http://www.smallarmssurvey.org/?UEMS>

163. В Испании произошел пожар на химическом предприятии. URL: <https://mosregtoday.ru/sec/v-ispanii-proizoshel-pozhar-na-himicheskom-predpriyatii>

164. Небо стало черным: в Руане произошли взрывы и пожар на химзаводе. URL: <https://tsn.ua/ru/svit/nebo-stalo-chernym-v-ruane-proizoshli-vrzyvy-i-pozhar-na-himzavode-1417416.html>

165. Pennsylvania Army depot explosion injures 4 people, 3 seriously, officials say. URL: <https://www.foxnews.com/us/pennsylvania-army-depot-explosion-injures-4-people-3-seriously-officials-say>

166. Northern California oil facility fire causes authorities to declare hazmat emergency, order residents to stay inside. URL: <https://www.foxnews.com/us/california-oil-facility-fire-prompts-hazmat-emergency-affecting-thousands-of-people>

167. Death toll rises to 78 in Chinese chemical plant explosion. URL: [https://www.upi.com/Top\\_News/World-News/2019/03/26/Death-toll-rises-to-78-in-Chinese-chemical-plant-explosion/1601553571988](https://www.upi.com/Top_News/World-News/2019/03/26/Death-toll-rises-to-78-in-Chinese-chemical-plant-explosion/1601553571988)

168. На крупнейших в мире НПЗ в Саудовской Аравии произошел пожар. URL: <https://www.km.ru/world/2019/09/14/proisshestviya-v-mire/854239-na-krupneishikh-v-mire-npz-v-saudovskoi-aravii-proizos>

169. На військових складах у Туреччині прогрімала серія вибухів. URL: <https://tsn.ua/svit/na-viyskovih-skladah-u-turechchini-progrimila-seriya-vibuhiv-1392072.html>

170. В Австрии прогремел взрыв на складе боеприпасов. URL: <https://nv.ua/world/countries/v-avstrij-prohremel-vzryv-na-sklade-boepripasov-2449444.html>

171. На Кипре прогремели взрывы на военном складе. URL: <https://kp.ua/incidents/646850-na-kypre-prohremely-vzryvy-na-voennom-sklade-est-postradavshye>

172. Huge blasts in Tianjin kill at least 17 and injure hundreds. URL: <https://www.theguardian.com/world/2015/aug/12/explosion-chinese-port-city-tianjin>

173. «Араз» взорвался среди бела дня. URL: <https://www.gazeta.ru/army/2016/07/26/9713429.shtml>

174. В Болгарии прогремел взрыв на заводе боеприпасов. URL: <https://www.kp.ru/online/news/2007251>

175. Един тон тротил е масата на взрива в Иганово. URL: <https://www.investor.bg/ikonomika-i-politika/332/a/g-kostov-edin-ton-trotil-e-masata-na-vzriva-v-iganovo-191506>

176. Разрывающиеся снаряды в Арыси. Двое погибших, десятки раненых. URL: <https://rus.azattyq.org/a/kazakhstan-arys-vzryvy-snaryadov/30016337.html>

177. ЧП в Туркмении. URL: <https://www.interfax.ru/russia/198279>

178. На Урале взорвался склад с боеприпасами URL: <https://ukranews.com/news/7344-na-urale-vzorvalsya-sklad-s-boeprypasamy-pogyb-podpolkovnyk>

179. Пожар на арсенале Ульяновска URL: <https://www.vesti.ru/doc.html?id=373458&tid=74613>

180. Пожар на складе боеприпасов в Амурской области потушен. URL: <https://delfi.lt/abroad/russia/pozhar-na-sklade-boepripasov-v-amurskoj-oblasti-potushen.d?id=37966555>

181. На военной базе под Липецком прогремел взрыв. URL: <https://utro.ru/articles/2011/04/06/967364.shtml>

182. Два взрыва произошло на бывшем военном арсенале в башкирском Урмане. URL: <https://www.interfax.ru/russia/448755>

183. Взрывы и пожар на полигоне под Ижевском: рвутся снаряды, эвакуированы 28 тысяч человек. URL: <https://kp.ua/politics/283613-vzryvy-y-pozhar-na-polyhone-pod-yzhevskom-rvutsia-snariady-evakuurovany-28-tysiach-chelovek>

184. В Абхазии на российской военной базе взорвались боеприпасы URL: <https://ua.news/ua/v-abhazyi-na-rosijskij-vijskovij-bazi-vibuhnuli-boeprypasi>

185. В Приморском крае произошел пожар на складе артиллерийских боеприпасов. URL: <https://topwar.ru/14553-v-primorskom-krae-proizoshel-pozhar-na-sklade-artilleriyskih-boepripasov.html>

186. Пожар и взрывы на военных складах. URL: <https://www.interfax.ru/russia/250131>

187. Нагорный на открытой площадке ФКП "Приволжский государственный боеприпасный испытательный полигон» произошли

несанкционированные взрывы боеприпасов с последующим возгоранием.

URL: <http://www.meteorf.ru/special/press/news/2952>

188. В Нижегородской области загорелся склад вооружения. URL: <https://lenta.ru/news/2016/08/04/fire>

189. Новости Украины. URL: [https://24tv.ua/ru/ukraina\\_tag1119](https://24tv.ua/ru/ukraina_tag1119)

190. В Турции произошла серия взрывов на военных складах. URL: <https://www.unian.net/world/10645959-v-turcii-proizoshla-seriya-vzryvov-na-voennyh-skladah-foto.html>

191. Новости мира. URL: [https://24tv.ua/ru/mezhdunarodnye\\_novosti\\_tag1121](https://24tv.ua/ru/mezhdunarodnye_novosti_tag1121)

192. В России горит завод, где производят баллистические ракеты. URL: <https://www.pravda.com.ua/rus/news/2019/04/26/7213703>

193. В России на одном из крупнейших заводов по изготовлению ракет произошел пожар. URL: <https://tsn.ua/ru/svit/v-rossii-na-odnom-iz-krupneyshih-zavodov-po-izgotovleniyu-raket-proizoshel-pozhar-1336692.html>

194. Взрывы в Калиновке. URL: <https://www.obozrevatel.com/topic/pozhar-na-sklade-boeprпасov-pod-vinnitsej>

195. Взрывы в Артемовске: новые факты. URL: [http://sobitiya.com.ua/news\\_full.phpnid=6](http://sobitiya.com.ua/news_full.phpnid=6)

196. Взрывы в Новобогдановке: причины и следствия. URL: <https://ru.tsn.ua/chorna-hronika/vzryvy-v-novbogdanovke-prichiny-i-sledstviya-foto.html>

197. Самые резонансные катастрофы на складах боеприпасов в Украине. URL: <https://www.segodnya.ua/criminal/katastrofy-na-skladah-boeprпасov-i-voinskih-poligonah-663050.html>

198. Взрывы в Новобогдановке: причины и следствия. URL: <https://tsn.ua/ru/chorna-hronika/vzryvy-v-novbogdanovke-prichiny-i-sledstviya-foto.html>

199. Взрывы в Новобогдановке: причины и следствия. URL: <https://tsn.ua/ru/chorna-hronika/vzryvy-v-novbogdanovke-prichiny-i-sledstviya-foto.html>

200. Взрывы в Новобогдановке: причины и следствия. URL: <https://tsn.ua/ru/chorna-hronika/vzryvy-v-novbogdanovke-prichiny-i-sledstviya-foto.html>

201. Пожары в Новобогдановке и трагедия в Сватово. Где еще в Украине взрывались склады с боеприпасами. URL: <https://tsn.ua/ru/ukrayina/pozhary-v-novobogdanovke-i-tragediya-v-svatovo-gde-esche-v-ukraine-vzryvalis-sklady-s-boepripasami> 827625.

202. Минобороны: взрывы в Лозовой не выходят за пределы арсенала. URL: <https://tsn.ua/ru/chorna-hronika/minoborony-vzryvy-v-lozovoi-ne-vyhodyat-za-predely-arsenala.html><https://ru.tsn.ua/chorna-hronika/minoborony-vzryvy-v-lozovoi-ne-vyhodyat-za-predely-arsenala.html>

203. В Кривом Роге произошел пожар на территории танковой дивизии. URL: <https://www.pravda.com.ua/rus/news/2014/03/20/7019765>

204. В Херсонской обл. в результате взрыва на складе с боеприпасами погибли 3 военных, 12 ранены. URL: <https://112.ua/avarii-chp/v-hersonskoy-obl-v-rezultate-vzryva-sklada-s-boepripasami-pogiblo-3-voennyh-12-raneny-istochnik-182887.html>

205. Взрывы в Сватово: «Люди бежали в подвалы, бросая все». URL: <https://fakty.ua/207990-vzryvy-v-svatovo-lyudi-bezhali-v-podvaly-brosaya-vse-foto-video>

206. В Балаклее фиксируются одиночные взрывы боеприпасов. URL: <https://bykvu.com/ru/bukvy/61656-v-balaklee-fiksiryuyutsya-odinochnye-vzryvy-boepripasov>

207. Пожар и взрывы на Донетчине: вблизи военного склада изъяли 150 боеприпасов. URL: <https://www.unian.net/incidents/2151281-pozhar-i-vzryivy-na-donetchine-vblizi-voennogo-sklada-izyali-150-boepripasov.html>

208. Siri A. Bodil A. M. Risk analysis and risk management approaches applied to the petroleum industry and their applicability to IO concepts // Safety Science. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology (NTNU), December 2012. V. 50. №10. P. 2010–2019.

209. Малышев В. П. Угрозы в высокотехнологичном обществе и пути их преодоления // Научный журнал «Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования». М.: ЦСИГЗ МЧС РФ, 2011. Том 1. №1 (1). С. 27–42.

210. Шевченко Р. І., Тарадуда Д. В., Палюх В. В. Аналіз методологічної бази з оцінки ризику виникнення аварії на потенційно небезпечних об'єктах // Проблеми надзвичайних ситуацій. Зб. наук. пр. Харків: НУЦЗУ, 2012. Вип. 16. С. 138–148. URL: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfEmergencies/vol16/shevchenko.pdf>

211. Ілляшенко І. О. Потенційно небезпечні об'єкти як джерела екологічної небезпеки, 2013. URL: <http://www.m.nayka.com.ua/?op=1&j=efektyvnaekonomika&s=ua&z=1645>

212. Dekker Sidney W. S. Ten questions about human error: A new view of human factors and system safety. London: Lawrence Erlbaum Associates (Publishers), 2005. 213 p.

213. Закон України «Про критичну інфраструктуру та її захист». URL: [http://search.ligazakon.ua/l\\_doc2.nsf/link1/JH7YW00A.html](http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/JH7YW00A.html)

214. Системы физической защиты объектов ядерной энергетики. URL: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2008/10/16/461>

215. Особенности выбора инженерно-технических средств физической защиты. URL: <http://www.cesis.ru/?pagename=osobennosti-vybora-inzhenerno-texnicheskix-sredstv-fizicheskoy-zashhity-perimetrov-protyazhennykh-obektov-specifika-montazha>

216. Дивизинюк М. М., Касаткина Н. В., Камышенцев Г. В., Лазаренко С. В. Предпосылки выявления признаков предшествующих чрезвычайным ситуациям террористического характера // Інформаційна

безпека: науковий журнал східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. Северодонецьк: СУНУ ім. В. Даля, 2017. № 2 (26). С. 125–131.

217. Инфраструктура. URL: [https://wikipedia.org/wiki/ %D0%98%D0%](https://wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%)

218. Infrastructure and transport developments. URL: <http://www.skyscrapercity.com/forumdisplay.php?f=3345>

219. Транспортная инфраструктура. URL: <https://wikipedia.org/wiki/%D0%A2%>

220. Инженерно-техническая инфраструктура. Что это такое. URL: [http://www.remonts-pb.ru/index.php?option=com\\_content&task=view&id=3926&Itemid=59](http://www.remonts-pb.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=3926&Itemid=59)

221. Инженерные сети. URL: [https://wikipedia.org/wiki /%D0%98%D0%](https://wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%)

222. Электрическая сеть. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5>

223. Superconductors Enter Commercial Utility Service. American Superconductor and Long Island Power Authority commission the grid's first transmission cable. URL: <http://spectrum.ieee.org/energy/the-smarter-grid/superconductors-enter-commercial-utility-service>

224. Superconductors come of age. A South Korean company has placed by far the biggest commercial order for superconducting wires. URL: <http://www.nature.com/news/2010/101008/full/news.2010.527.html>

225. Магидин Ф. А. Воздушные линии электропередачи. Под ред. А. Н. Трифонова. М.: Высшая школа, 1991. 208 с.

226. Рожкова Л. Д. Электрооборудование станций и подстанций. М.: Энергоатомиздат, 1987. 648 с.

227. Миротина Л. Б. Транспортная логистика: Учебник. 2-е изд., стереотип. М.: Издательство «Экзамен», 2009. 302 с.

228. Инфраструктура экономики. URL: <http://www.grandars.ru/student/nac-ekonomika/infrastruktura-ekonomiki.html>

229. Еганян А. Инвестиции в инфраструктуру: Деньги, проекты, интересы. ГЧП, концессии, проектное финансирование. М.: Альпина Паблишер, 2015. 715 с.

230. Кошелев А. Н. Национальная экономика. Конспект лекций. М.: Высшая школа, 2008. 160 с.

231. North D. C. Institutions, institutional change and economic performance. Cambridge, 1990. P. 40, 68.

232. Инфраструктура воздушного транспорта. URL: <http://new.atoevents.ru/events/infrastructure/>

233. Инфраструктура воздушного транспорта. URL: <http://www.ato.ru/category/events/infrastruktura-vozdushnogo-transporta>

234. Проблемы понятия инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования. URL: [http://bmpravo.ru/show\\_stat.php?stat=841](http://bmpravo.ru/show_stat.php?stat=841)

235. Определение понятия «инфраструктура железнодорожного транспорта общего пользования». URL: <http://alexeyborisov.ru/dictionary/585/>

236. Инновационная инфраструктура 2017-2021. Кабинет министров Украины утвердил проект «Концепции Государственной целевой экономической программы развития инновационной инфраструктуры». URL: [https://www.eduget.com/news/innovacionnaya\\_infrastruktura\\_2017-2021-357](https://www.eduget.com/news/innovacionnaya_infrastruktura_2017-2021-357)

237. Рыночная инфраструктура. URL: <http://econominfo.ru/view-article.php?id=31>

238. Информационная инфраструктура. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0>

239. Военная инфраструктура это. URL: [http://safety\\_buildings.academic.ru/71/%D0%92%D0](http://safety_buildings.academic.ru/71/%D0%92%D0)

240. Хофрейтер Л. Критическая инфраструктура – содержание, структура и проблемы ее защиты. URL: <http://jml2012.indexcopernicus.com/fulltxt.php?ICID=1129729>



241. Hofreiter L. A. Ochrana objektov kritickej dopravnej infraštruktúry, Žilinská univerzita v Žiline/EDIS, Žilina. 2013. URL: <http://jml2013.indexcopernicus.com/fulltxt.php>

242. Presidential Decision Directive, 63. 1998. URL: <https://www.fas.org/irp/offdocs/pdd/pdd-63.htm>

243. The National Strategy for the Physical Protection of Critical Infrastructures and Key Assets. URL: <http://www.whitehouse.gov/psipb/physical.html>

244. Указ Президента України № 8/2017 від 16 січня 2017 року. URL: <http://www.president.gov.ua/documents/82017-21058>

245. Порошенко усилил защиту объектов критической инфраструктуры. URL: [http://news.liga.net/news/politics/14672613-poroshenko\\_usilil\\_zashchitu\\_obektov\\_kriticheskoy\\_infrastruktury.htm](http://news.liga.net/news/politics/14672613-poroshenko_usilil_zashchitu_obektov_kriticheskoy_infrastruktury.htm)

246. Аналітичний огляд стану техногенної та природної безпеки в Україні за 2018 рік. Київ: УкрНДІЦЗ, 2019. 277 с.

247. Дикань С. А., Зима О. Є. Безпека в галузі та надзвичайних ситуаціях: підручник. Полтава: ТОВ «АСМІ», 2015. 273 с.

248. Михайлюк О. П., Олійник В. В., Кріса І. Я., Білим П. А., Тесленко О. О. Пожежна безпека об'єктів підвищеної небезпеки: навчальний посібник. Х.: УЦЗУ, 2010. 343 с.

249. Улицький О. А., Єрмаков В. М., Луньова О. В., Мілехін П. О. Розроблення алгоритму класифікації потенційно небезпечних об'єктів за галузями промисловості та впливом на природне середовище. 2019. 1(24). Т. 2. С. 12–18.

250. Наказ МНС України від 13.03.2012 р. № 575 «Про затвердження Статуту дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту», зареєстрований в Міністерстві юстиції України 25.05.2012 за № 835 21147.

251. Стеблюк М. І. Цивільна оборона та цивільний захист: підручник. К.: Знання-Прес, 2007. 487 с.

252. Иванников В. П., Ключ Н. Н., Мазур Л. К. Справочник по тушению пожаров. Изд 3-е, доп. и перераб. К.: РИО МВД УССР, 1983. 284 с.

253. Наказ МНС України від 15.08.2007р. № 557 «Правила техногенної безпеки у сфері цивільного захисту на підприємствах, в організаціях, установах та на небезпечних територіях».

254. Наказ МВС України від 30.12.2014 № 1417 «Про затвердження правил пожежної безпеки в Україні», зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 05 березня 2015 р. № 252/26697.

255. Охоронні системи – запобігання пожежі і час простою обладнання. URL: <https://worldvision.com.ua/ua/articles/ohrannie-sistemi-predotvrashchenie-pozhara-i-vremya-prostoia-oborudovaniya>

256. Жартовський С. В. Проблемні питання створення системи протипожежного захисту об'єкта критичної інфраструктури з пожежною навантагою із целюлозовмісних матеріалів / Науковий вісник НЛТУ України. 2017. Т. 27. № 10. С. 101-105. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemni-pitannya-stvorenniya-sistemi-protipozhezhnogo-zahistu-obekta-kritichnoyi-infrastrukturi-z-pozhezhnoyu-navantagoju-iz/viewer>

257. Безопасность жизнедеятельности: учебник / Под ред. С. В. Белова. М.: Высшая школа, 2002. 476 с.

258. Исидоров В. А. Органическая химия атмосферы. СПб., Химиздат, 2001. 352 с.

259. Atkinson R. Gas-phase tropospheric chemistry of organic compounds: a review. *Atmospheric Environment*. 2007. № 41. P. 200–240.

260. 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.

261. Мусієнко М. М., Серебряков В. В., Брайон О. В. Екологія. Охорона природи: словник-довідник. К., 2002.

262. Реймерс Н. Ф. Природопользование: словарь-справочник. М., 1990.
263. 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.
264. Исидоров В. А. Введение в химическую экотоксикологию: учебное пособие. СПб: Химиздат, 1999. 144 с.
265. Давыдова С. Л., Тагасов В. И. Тяжелые металлы как супертоксиканты XXI века: учебное пособие. М.: Изд-во РУДН. 2002. 140 с.
266. Sommariva R., Pilling M. J., Bloss W. J. Night time radical chemistry during the NAMBLEX campaign. *Chem. Phys.* 2007. № 7. P. 587–598.
267. 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. P. 3051–3094.
268. Emmerson K. M., Carslaw N. Night-time radical chemistry during the TORCH campaign. *Atmos. Environ.* 2009. № 43. P. 3220–3226.
269. Стан довкілля в Україні. Інформаційно-аналітичний огляд. URL: <http://www.ecobank.org.ua/GovSystem/EnvironmentState/Reviews/Pages/default.aspx> (дата звернення: 05.10.2018).
270. 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.
271. 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.

272. Чумаченко С. М., Валуйський С. В., Тесленко О. М., Лисенко О. І. Концепція автоматизованої краудсорсингової системи моніторингу надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури міста. Науковий вісник Академії муніципального управління. Серія: Техніка. 2014. Вип. 2(8). С. 157–163.

273. Wang W., Yang J., Liu Z., Liu G. Research on accident prediction in chemical industry based on improved markov model. Chemical Engineering Transactions. 2017. Vol. 59. P. 1165–1170. doi: 10.3303/CET1759195

274. G. Wehmeier K. Mitropetros fire protection in the chemical industry. Chemical engineering transactions. 2016. Vol. 48. P. 259–264.

275. Liang C. F. Accident analysis and prediction of chemical production enterprise. Industrial Production. 2016. Vol. 8(42). P. 79–81.

276. Wehmeier G. DECHEMA/ProcessNet Arbeitskreis. Brandschutz in der Chemischen Industrie, VDS Fachtagung Brandschutz in der Chemischen Industrie, Koln, VDS. 2012. T. 3664.

277. ISO 7240-1:2014(en) Fire detection and alarm systems [www.iso.org](http://www.iso.org)

278. International Alert Saferworld University of Bradford SEESAC. Ammunition stocks: Promoting safe and secure storage and disposal. Briefing 18: Biting the Bullet. 2005. 36 p.

279. Elder P. Regulatory perspective for fire protection and emergency management at nuclear facilities in Canada. 2nd International CNS Conference on Fire Safety and Emergency Preparedness in the Nuclear Industry Toronto, Canada, September 17–20, 2017. 26 p.

280. Michael J. Hosch and John Jarvis special focus industry support & challenges fire protection in army aircraft hangars: is yours up to date issue of army aviation magazine. December 2016. P. 38–41.

281. Toreyin B. U., Dedeoglu Y., Cetin A. E. Flame detection in video using hidden Markov models // IEEE International Conference on Image Processing 2005. IEEE, 2005. V. 2. P. 1230. doi:10.1109/ICIP.2005.1530284

282. [det-tronics.com](http://det-tronics.com)

283. Paunila S., Hoole A. Ammunition safety management preventing loss of life and property, and diversion from stockpiles. Libya. Source Threat Resolution Ltd. Counter-ied Report. 2015. P. 86–92.

284. EHSC. Fire Safety in Chemical Laboratories. 2013. URL: [http://www.rsc.org/images/Fire%20Safety%20in%20Chemical%20Laboratories\\_tcm18-233996.pdf](http://www.rsc.org/images/Fire%20Safety%20in%20Chemical%20Laboratories_tcm18-233996.pdf)

285. Liu R. Research of accident analysis and prediction of chemical manufacturers. Taiyuan: North University of China. 2015. P. 9–23.

286. Gottuk D. T., Dinaburg J. Fire detection in warehouse facilities. Fire Protection Research Foundation. 2012.

287. Process Safety Essentials. Oxford: Butterworth-Heinemann. P. 9–30.

288. Leggett D. J. Lab-HIRA: Hazard identification and risk analysis for the chemical research laboratory. Part 2. Risk analysis of laboratory operations. Journal of Chemical Health and Safety. 2012. V. 19(5). P. 25–36.

289. Mannan S. Chapter 2 – Incidents and Loss Statistics. In S. Mannan (Ed.). 2014.

290. Incorporating system safety in an underground ammunition facility department of defense standard practicefor system safety. MIL-STD-882D. 2000.

291. NATO (2006a), AASTP-1: Manual of NATO Safety Principles for the Storage of Military Ammunition and Explosives. NATO (2006b).

292. AASTP-2: Manual of NATO Safety Principles for the Storage of Military Ammunitionand Explosives.

293. Gaolin Q. Research on image flame feature selection and recognition algorithm in complex large space. Xi'an University of Architecture and Technology. 2015.

294. Janku P., Oplatková Z. K., Dulik T., Snopek P., Liba J. Fire detection in video stream by using simple artificial neural network // Mendel. 2018. V. 24. №2. P. 55–60.

295. Frizzi S., Kaabi R., Bouchouicha M., Ginoux J., Moreau E., Fnaiech F. Convolutional neural network for video fire and smoke detection // In: IECON

2016 – 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2016. P. 877–882.

296. Zhenping X., Tao W., Yuan L. A new algorithm for fast detection of flutter analysis of video smoke // *Microelectronics and computer*. 2011. Vol. 28. №10. P. 209–214.

297. Maruta H., Nakamura A., Kurokawa F. Smokedetection in open areas with texture analysis and support vectormachines // *IEEJ Trans Electron Eng*. 2012. Vol. 7. №S1. P. 59–70.

298. Zhang J. H., Zhuang J., Du H. F. A new flame detection method using probability model // *Intern. Conf. on Computational Intelligence and Security*. 2006. P. 1614–1617.

299. Han D., Lee B. Flame and smoke detection method for early real-time detection of a tunnel fire // *Fire Safety Journal*. 2009. Vol. 44. Issue 7. P. 951–961.

300. Celik T., Demirel H., Ozkaramanli H. Fire detection in video sequences using statistical color model // *J. Vis. Commun. Image R*. 2007. V. 18. P. 176–185.

301. Celik T. Fast and efficient method for fire detection using image processing // *ETRI journal*. 2010. V. 32(6). P. 881–890.

302. Yu C., Mei Z., Zhang X. A real-time video fire flame and smoke detection algorithm // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 62. P. 891 – 898.

303. Foggia P., Saggese A., Vento M. Real-time fire detection for video-surveillance applications using a combination of experts based on color, shape, and motion // *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* January, 2015. P. 1–12.

304. Lloyd D. Video Smoke Detction (VSD-8) // *Fire Safety*. 2000.

305. inti Zaidi N. I., binti Lokman N. A. A., bin Daud M. R., Achmad H., Chia K. A. Fire recognition using RGB and YCbCr color space. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. V. 10(21). P. 9786–9790.

306. Yu C., Mei Z., Zhang X. A real-time video fire flame and smoke detection algorithm. *Procedia Engineering*. 2013. V. 62. P. 891–898.

307. Kaur A., Sethi R., Kaur K. Comparison of forest fire detection techniques using WSNs. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*. 2014. Vol. 5 (3). P. 3800–3802.

308. Levis P., Madden S., Polastre J. TinyOS: an operating system for wireless sensor networks. In *Ambient Intelligence*. New York, NY: Springer-Verlag, 2005. 374 p.

309. Fine T. L., Glenn Shafer. A mathematical theory of evidence. *Bulletin of the American Mathematical Society*. 1977. V. 83(4). P. 667–672. doi:10.1090/s0002-9904-1977-14338-3

310. Sandler U., Tsitolovsky L. *Neural Cell Behavior and Fuzzy Logic*. Springer, 2008. 478p.

311. Zhao M., Yang Y., Yan H. An adaptive thresholding method for binarization of blueprint images. *Pattern Recognition Letters*. 2010. Vol. 21. P. 927–943.

312. Valente de Almeida R., Vieira P. Forest Fire Finder–DOAS application to long-range forest fire detection // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2017. V. 10. №6. P. 2299-2311.

313. Jahn W., Rein G., Torero J.L. Forecasting fire dynamics using inverse computational fluid dynamics and tangent linearization // *Advances in Engineering Software*. 2012. V. 47 (1). P. 114–126.

314. Rossi J. L., Chetehouna K., Collin A., Moretti B., Balbi J. H. Simplified flame models and prediction of the thermal radiation emitted by a flame front in an outdoor fire // *Combustion Science and Technology*. 2010. V. 182(10). P. 1457–1477.

315. Rudz S., Chetehouna K., Hafiane A., Laurent H., SeroGuillaume O. Investigation of a novel image segmentation method dedicated to forest fire applications // *In: Measurement Science and Technology*. 2013. V. 24(7). P. 075403.

316. Toulouse T., Rossi L., Celik T., Akhloufi M. Automatic fire pixel detection using image processing: A comparative analysis of Rule-based and

Machine Learning-based methods. *Signal, Image and Video Processing*. 2016. V. 10. №4. P. 647–654.

317. Mahmoud M. A. I., Ren H. Forest fire detection and identification using image processing and SVM. *Journal of Information Processing Systems*. 2019. V. 15. №. 1. C. 159–168.

318. Thuillard M. New methods for reducing the number of false alarms in fire detection systems. *Fire Technology*. 1994. V. 30. Issue 2. P. 250–268.

319. Sharma G., Wu W., Dalal E. N., Celik M. Mathematical discontinuities in CIEDE 2000 color difference computations. Accepted for presentation at IS&T/SID Twelfth Color Imaging Conference, Nov. 9–12, 2004. №1. P. 334–339.

320. Akansu A.N., Serdijn W.A., Selesnick I.W. Emerging applications of wavelets: a review. *Physical Communication, Elsevier*. 2010. V. 3. №1. P. 1–18..

321. Aviles J. V. M., Prades R. M. ARIEL: advanced radiofrequency indoor environment localization: smoke conditions positioning. 2011 International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS). IEEE, 2011. P. 1-8. doi:10.1109/DCOSS.2011.5982220

322. Lehto M., Alexiou A. Fire protection implementation and the restart of nuclear power in Japan. SMiR T 24 15th Interantional Seminar on fire safety in nuclear power plants and installations. 2017. P. 74–81.

323. Fernandez D., Alexiou A., Williams G.. Uk regulatory expectations in the assessment of Internal fire and explosion hazards through the Generic design assessment process. SMiR T 24 15th Interantional Seminar on fire safety in nuclear power plants and installations. 2017. P. 56–65.

324. Morgan A. New fire detection concepts with fibre optics technology. *Fire Safety Engineering*, April 2000. V. 6. P. 19–20.

325. Crapo W. F. Smoke detectors and life safety. *Fire Engineering*, May 2000. P. 61.

326. Home structure fires Marty Ahrens National Fire Protection Association Fire Analysis and Research Division, August 2012. 142 p.

327. <http://safefiredetection.com/products/linear-heat-detection>



328. DIN EN 54-22:2015-7 Fire detection and fire alarm systems - Part 22: Resettable line-type heat detectors. 2015.
329. Zeng W., Liu T., Wang Z., Tsukimoto S., Saito M., Ikuhara Y. Selective detection of formaldehyde gas using a Cd-Doped TiO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub> sensor. *Sensors*. 2009. V. 9. P. 9029–9038.
330. Kim S. -J., Hwang I. -S., Kang Y. C., Lee J. -H. Design of selective gas sensors using additive-loaded in<sub>2</sub>o<sub>3</sub> hollow spheres prepared by combinatorial hydrothermal reactions. *Sensors*. 2011. V. 11. P. 10603–10614.
331. Fraiwan L., Lweesy K., Bani-Salma A., Mani N. A wireless home safety gas leakage detection system. In *Proceedings of the 1<sup>st</sup> Middle East Conference on Biomedical Engineering (MECBME)*. Sharjah, United Arab Emirates. 21–24 February 2011. P. 11–14.
332. Hwang I. -S., Kang Y. C., Lee J. -H. Design of selective gas sensors using additive-loaded in<sub>2</sub>o<sub>3</sub> hollow spheres prepared by combinatorial hydrothermal reactions. *Sensors*. 2011. V. 11. P. 10603–10614.
333. Яковенко В. О., Ульяновська Ю. В. Аналіз задачі побудови автоматизованої системи виявлення та попередження надзвичайних ситуацій на підприємствах підвищеної небезпеки. 2020. № 23 (2018). С. 134–139.
334. Шаровар Ф. И. Пожаропредупредительная автоматика. Теория и практика предотвращения пожаров от маломощных загораний: монография. М.: Специнформатика-СИ. 2013. 556 с.
335. Варнац Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ // Под ред. П.А. Власова. М: Физматлит, 2003. 352 с.
336. Арутюнян Д. М. Новые технологии гарантированного предотвращения пожаров. М.: Специнформатика-СИ, 2014. 232 с.
337. Фёдоров А. В., Членов А. Н., Лукьянченко А. А., Буцынская Т. А., Демёхин Ф. В. Системы и технические средства раннего обнаружения пожара: монография. М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. 160 с.

338. Иванов В. В огне не горит. Пожарная безопасность. 2018. Вып. 1. URL: <https://plus.rbc.ru/news/5b9768077a8aa927389bf03c> 01.03.2019
339. Скофилд С. Новейшие мировые технологии обнаружения пожара на промышленных объектах. Системы безопасности. 2005. № 1.
340. Соколов В. С. Системы пожарной сигнализации и автоматики. Боевая эффективность. Соотношения цена/качество. Системы безопасности. 2001. № 41. С. 54–58.
341. Пивинская И. Пожарные извещатели: задачи и оценка выбора. Безопасность, достоверность, информация. 2005. № 4(61). С. 36–42.
342. Зайцев А. В. Чувствительность пожарных извещателей к различным типам дыма, пыли, пару и аэрозолям. Часть 3. Алгоритм безопасности. 2012. № 5. С. 25–29.
343. Экспериандова Л. П., Беликов К. Н., Химченко С. В., Бланк Т. А. Еще раз о пределах обнаружения и определения. Журнал аналитической химии. 2010. Т. 65. № 3. С. 229–234.
344. Моисеев И. Ф. Рынок противопожарного оборудования. Взгляд изнутри. Системы безопасности. 2001. № 41. 71 с.
345. Членов А. Н. Современные тепловые пожарные извещатели: основные характеристики и особенности применения. Системы безопасности, связи и телекоммуникаций. 2004. №1. С. 43–44.
346. Извещатели пожарные тепловые. Технические требования пожарной безопасности. Методы испытаний: НПБ 85-2000. М., 2001. URL: [http://www.ohranatruda.ru/ot\\_biblio/normativ/data\\_normativ/8/8923](http://www.ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/8/8923)
347. Членов А. Н. Современные тепловые пожарные извещатели: основные характеристики и особенности применения. Системы безопасности, связи и телекоммуникаций. 2004. №1. С. 43–44.
348. Фоменко А. А. Точечные максимальные тепловые пожарные извещатели: особенности построения и применения. Системы безопасности. 2007. №5. 85с.

349. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников под ред. Э. Удда, Техносфера. 2008. 520 с.

350. Осипов В., Пятачев В. Противопожарная защита военных объектов – ключ к повышению боевой устойчивости войск «Новый оборонный заказ. Стратегии». 2009. №2(4). С. 46–49.

351. Извещатели пожарные дымовые оптико-электронные линейные. Общие технические требования. Методы испытаний: НПБ 82-99. М., 1999. URL: <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294847/4294847692.pdf>

352. Извещатели пожарные дымовые радиоизотопные. Общие технические требования. Методы испытаний: НПБ 81-99. М., 2000. URL: [http://ohranatruda.ru/ot\\_biblio//normativ/data\\_normativ/7/7693/index.php](http://ohranatruda.ru/ot_biblio//normativ/data_normativ/7/7693/index.php)

353. Антоненко В., Васильев А., Олихов И. Раннее обнаружение пожара: полупроводниковые газовые сенсоры. ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2001. №4. С. 48–51.

354. Калориметрические методы. URL: <https://researchpark.spbu.ru/methods-thermo-rus/1263-thermo-calorimetric-methods>

355. Калугин В. Д., Прусский А. В., Войтов А. Ю., Быкова Е. В., Еременко С. А. Газовые пожарные извещатели с полупроводниковыми датчиками: теория, технология, применение. Киев: ИГУГЗ НУГЗ Украины, 2011. 195 с.

356. Ming Z. H. U., Shi Y. I. N., Haoquan L., Xiayang Z. Near space airship conceptual design and optimization. Journal of Communications and Information Networks. 2016, Vol. 1, P. 125–133.

357. David D. Evans Calculating fire plume characteristics in a two-layer environment. Fire Technology. 1984. Vol. 20. Issue 3. P. 39–63

358. Geiman J. A. Evaluation of smoke detector response estimation methods. Master of Science Thesis. University of Maryland, College Park, MD. 2003.

359. Ambrosia V., Wegener S., Sullivan D., Buechel S., Brass S. D. J., Stoneburner J., Schoenung, S. Demonstrating UAV-Acquired Real-Time Thermal

Data over Fires. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2003. V. 69(4). P. 391–402.

360. Conesa-Munoz J., Valente J., Del Cerro J., Barrientos A., Ribeiro A. A Multi-Robot Sense-Act Approach to Lead to a Proper Acting in Environmental Incidents. *Sensors*. 2016. V. 16. P. 1269.

361. San-Miguel-Ayanz J., Ravail N. Active fire detection for fire emergency management: Potential and limitations for the operational use of remote sensing. *Natural Hazards*. 2005. V. 35. №3. P. 361–376.

362. Li Z., Nadon S., Cihlar J., Satellite-based detection of Canadian boreal forest fires: Development and application of the algorithm. *International Journal of Remote Sensing*. 2000. V. 21. №16. P. 3057–3069.

363. [https://earthobservatory.nasa.gov/features/GlobalFire/fire\\_5.php](https://earthobservatory.nasa.gov/features/GlobalFire/fire_5.php)

364. Kumar V. C. P., Joenathan C., Ganesan A. Somasundram U. Increasing the sensitivity for tilt measurement using a cyclic interferometer with multiple reflections. *Opt. Eng.* 2016. V. 55. P. 084103.

365. Shin B. H., Oh D., Lee S. Y. A Two-Dimensional Laser Scanning Mirror Using Motion-Decoupling Electromagnetic Actuators. *Sensors*. 2013. V. 13. P. 4146–4156.

366. Santhanakrishnan T., Ramalingam A., Palanisamy P. K., Paulpandian S., Banerjee S. K., Nayak R., Thomas P. C., Ouseph P. P. Calibration of angular motion of a scanning mirror mechanism using a lateral-effect position sensitive photodetector. *Proc. SPIE*. 1995. V. 2550. P. 105–110.

367. Martínez-de Dios J. R., Merino L., Caballero F., Ollero A. Automatic forest-fire measuring using ground stations and unmanned aerial systems. *Sensors*. 2011. V. 11(6). P. 6328–6353.

368. Nizam H., Shah M., Zamzuri M., Rashid A. Design and develop an autonomous uav airship for indoor surveillance and monitoring applications. *International journal on informatics visualization*. 2018. Vol. 2. № 1. P. 1–7.

369. Meng X., Wang W., Leong B., SkyStitch A. Cooperative Multi-UAV-based real-time video surveillance system with stitching. In *Proceedings of the*

23rd ACM International Conference on Multimedia. Brisbane, Australia. 2015. P. 261–270.

370. Kobayashi T., Matsuoka H., Betsumiya S. Flying communication server in case of a largescale disaster. IEEE 40th Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC). 2016. V. 2. P. 571–576.

371. Li M., Xu W., Xu K., Fan J., Hou D. Review of fire detection technologies based on video image. Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2013. Vol. 49. № 2. P. 700–707.

372. C. Yuan, Liu Z. X., Zhang Y. M. Aerial images-based forest fire detection for firefighting using optical remote sensing techniques and unmanned aerial vehicles. Journal of Intelligent and Robotic Systems. doi: 10.1007/s10846-0160464-7

373. Merino L., Caballero F., Martinez-de Dios J. R., Maza I., Ollero A. An unmanned aircraft system for automatic forest fire monitoring and measurement. Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2012. Vol. 65, № 1, P. 533–548.

374. Ramos J. J. G. Project AURORA: autonomous unmanned remote monitoring robotic airship. 2nd Int. Airship Convention and Exhibition, Bedford, England, 1988.

375. Boschma J.H. The development progress of the U.S. Army's SAA LITE, Unmanned Robot Airship. Proceedings of the AIAA Lighter-Than-Air Systems Technology Conference. 1993.

376. Martin P. Adamek M. Autonomous Airship as a Surrounding Monitor. Seminar ASR 2007 Instrument and Control. 2007.

377. Hairol S., Mohd R., Zalina K., Aras M., Shahrieel M., Ali Nursabillilah M., Faizil W., Mohd B. Design and develop an autonomous UAV airship for indoor surveillance and monitoring applications. JOIV: International Journal on Informatics Visualization. 2018.

378. Gerke M., Masár I., Borgolte U., Röhrig C. Farmland monitoring by sensor networks and airships. IFAC Proceedings Volumes. 2013. V. 46. № 18. P. 321–326.

379. Батурін М. Г., Буданов П. Ф., Даник Ю. Г., Калугін В. Д. Автоматизована система управління параметрами повітряного середовища. Системи обробки інформації. 2001. Вип. 6(16). С. 206–210.
380. Nietaniemi J., Esko M. Minimising fire risks at chemical storage facilities: Basis for the guidelines for safety engineers. VTT Technical Research Centre of Finland. 1997. V. 1811. P. 32.
381. Pekalski A. A., Zevenbergen J. F., Lemkowitz S. M., Pasman H. J. A Review of explosion prevention and protection systems suitable as ultimate layer of protection in chemical process installation / Process Safety and Environmental Protection. 2005. Vol. 83. Issue 1. P. 1–17. <https://doi.org/10.1205/psep.04023>
382. Мелещенко Р. Г., Иванов Е. В. Запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури шляхом раннього виявлення загроз // Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. Харків: НУЦЗУ, 2019. С. 36.
383. Pascual M., Ellner S. Linking ecological patterns to environmental forcing via nonlinear time series models // Ecology. 2000. V. 81(10). P. 2767–2780.
384. Parrott L. Analysis of simulated long-term ecosystem dynamics using visual recurrence analysis // Ecological Complexity. 2004. V. 1(2). P. 111–125.
385. Proulx R. Ecological complexity for unifying ecological theory across scales: A field ecologist's perspective // Ecological complexity. 2007. V. 4. P. 85–92.
386. Marwan N., Kurths J. Nonlinear analysis of bivariate data with cross recurrence plots // Phys. Lett. 2002. V. 5. 16 p.
387. Kantz H., Schreiber T. Nonlinear Time Series Analysis // Cambridge University Press. 2003. 365 p.
388. Eckmann J. -P., Kamphorst S. O., Ruelle D. Recurrence Plots of Dynamical Systems // Europhys. Lett. 1987. V. 4. P. 973–977.
389. Webber C. L., Zbilut J. P. Tutorials in Contemporary Nonlinear

Methods for the Behavioral Sciences // edited by M. A. Riley, G. Van Orden. 2004. P. 26. Available at: <http://www.nsf.gov/sbe/bcs/pac/nmbs/nmbs.pdf>

390. Webber C. L., Zbilut J. P. Dynamical assessment of physiological systems and states using recurrence plot strategies // *J. Appl. Phys.* 1994. V. 76(2).

391. Marwan N., Trauth M. H., Vuille M., Kurths J. Comparing modern and Pleistocene ENSO-like influences in NW Argentina using nonlinear time series analysis methods // *Clim. Dynam.* 2003. V. (21)3. P. 11.

392. Мелещенко Р.Г., Іщук В.М. Статистичний аналіз та прогноз нещасних випадків // *Безпека життєдіяльності людини як умова сталого розвитку сучасного суспільства: Збірник тез VI Міжнародної науково-практичної конференції. 8-9 червня 2017 р. Київ: Таврійський Національний університет імені В. І. Вернадського, 2017. С. 85–90.*

393. Meleshchenko R. G. System analysis of prevention of man-made emergency situations in consequence of fire in the premises of the object // *ScienceRise.* 2020. Issue 1 (66). P. 38–46. doi: 10.21303/2313-8416.2020.001150

394. Meleschenko R. G., Dureev V. O. Mathematical model of thermal fire detector with the thermistor // *Проблемы пожарной безопасности: Сборник научных трудов. Харьков: НУГЗУ. Вып. 44. 2018. С. 89–92.*

395. Pospelov B., Rybka E., Meleschenko R., Gornostal S., Shcherbak S. Results of experimental research into correlations between hazardous factors of ignition of materials in premises // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2017. Volume 6. Issue 10 (90). P. 50–56. doi: 10.15587/2312-8372.2016.85866

396. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.

397. Examining the learning fire detectors under real conditions of application / Andronov V., Pospelov B., Rybka E., Skliarov S. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2017. Vol. 3 (87). № 9. P. 53–59. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101985>

398. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Meleschenko R., Gornostal S. Analysis of correlation dimensionality of the state of a gas medium at early ignition of materials // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Volume 5. Issue 10 (95). P. 25–30. doi: 10.15587/1729-4061.2018.142995

399. Поспелов Б.Б., Рыбка Е.О., Мелешченко Р.Г., Самойлов М.О., Карпец К.М., Безуглая Ю.С. Инженерно-технический метод предупреждения чрезвычайных ситуаций техногенного характера путем оперативного контроля состояния газовой среды в помещениях объекта // *Проблемы надзвичайних ситуацій: зб. наук. праць*. 2020. №31. С. 234–246.

400. Поспелов Б.Б., Рыбка Е.А., Мелешченко Р.Г., Бородич П.Ю., Самойлов М.А. Метод раннего обнаружения опасной ситуации в помещениях на основе корреляционной размерности опасных факторов газовой среды // *Проблемы пожарной безопасности: Сборник научных трудов*. Харьков: НУГЗУ. Вып. 46. 2019. С. 143–154.

401. Design of fire detectors capable of self-adjusting by ignition / Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Skliarov S. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 4 (88), № 9. P. 53–59. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108448>

402. The use of pulsed high-speed liquid jet for putting out gas blow-out / Semko A., Rusanova O., Kazak O., Beskrovnaya M., Vinogradov S., Gricina I. // *The International Journal of Multiphysics*. 2015. Vol. 9, Issue 1. P. 9–20. doi: <https://doi.org/10.1260/1750-9548.9.1.9>

403. Pospelov B., Rybka E., Meleschenko R., Borodych P., Gornostal S. Development of the method for rapid detection of hazardous atmospheric pollution of cities with the help of recurrence measures // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Volume 1. Issue 10 (97). P. 29–35. doi: 10.15587/17294061.2019.155027

404. Pospelov B., Meleshchenko R., Krainiukov B., Karpets K., Petukhova O., Bezuhla Yu., Butenko T., Horinova V., Borodych P., Kochanov E. A method for preventing the emergency resulting from fires in the premises through operative



control over a gas medium // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Volume 1. Issue 10 (103). P. 6–13. doi: 10.15587/1729-4061.2020.194009

405. Поспелов Б. Б., Рыбка Е. А., Мелешенко Р. Г., Самойлов М. А., Безуглая Ю. С. Методы вычисления мер текущей рекуррентности флуктуаций состояния газовой среды для раннего выявления пожара в помещениях // Проблемы пожарной безопасности: Сборник научных трудов. Харьков: НУГЗУ. Вып. 48. 2020. С. 136–146.

406. Мелешенко Р.Г. Модель для выявления угроз возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера с помощью мониторинга температуры в помещениях объекта // Проблемы пожарной безопасности: Сборник научных трудов. Харьков: НУГЗУ. Вып. 45. 2019. С. 117–124.

407. Поспелов Б. Б., Андронов В. А., Рыбка Е. А., Мелешенко Р. Г., Самойлов М. А. Метод предупреждения чрезвычайных ситуаций техногенного характера на основе текущей корреляционной размерности состояния газовой среды в помещениях объекта // Problems of Emergency Situations: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2020. С. 134–136.

408. Мелешенко Р. Г. Метод предотвращения чрезвычайных ситуаций // Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. Харків: НУЦЗУ, 2020. С. 25.

409. Поспелов Б. Б., Андронов В. А., Рыбка Е. О., Мелешенко Р. Г., Самойлов М. О. Парадигма запобігання надзвичайним ситуаціям, пов'язаних із забрудненням атмосфери міст // Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах: матеріали 21 Всеукраїнської науково-практичної конференції (за міжнародною участю). 8 жовтня 2019 року. Київ, ІДУЦЗ. 2019. С. 218–221.

410. Мелешенко Р. Г. Предотвращение чрезвычайных ситуаций на объектах критической инфраструктуры путем раннего выявления

загрязнений воздуха // Проблеми надзвичайних ситуацій: зб. наук. праць. 2018. №28. С. 69–82.

411. Мелешченко Р. Г. Инженерно-технический метод предупреждения чрезвычайных ситуаций техногенного характера с помощью контроля загрязнения атмосферного воздуха // Проблеми надзвичайних ситуацій: зб. наук. праць. 2019. №30. С. 85–97.

412. Pospelov B., Andronov V., Meleshchenko R., Danchenko Yu., Artemenko I., Romaniak M., Khmyrova A., Butenko T. Construction of methods for computing recurrence plots in space with a scalar product // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 3. Issue 4 (99). P. 37–44. doi: 10.15587/1729-4061.2019.169887

413. Javorka M., Trunkvalterova Z., Tonhajzerova I., Lazarova Z., Javorkova J., Javorka K. Clinical Physiology and Functional Imaging. 2008. № 28. P. 326.

414. Eckmann J.-P., Kamphorst S.O., Ruelle D. Recurrence Plots of Dynamical Systems // Europhysics Letters. 1987. V. 5. P. 973–977.

415. Киселев В.Б. Некоторые методы нелинейного анализа // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2005. Вып. 20. С. 172–180.

416. Киселев В.Б. Рекуррентный анализ – теория и практика // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2006. Вып. 29. С. 118–127.

417. Takens F. Detecting Strange Attractors in Turbulence // Springer. 1981. P. 366–381.

418. Beim Graben P., Hutt A. Detecting recurrence domains of dynamical systems by symbolic dynamics // Physical review letters. 2013. № 110(15). P. 154101.

419. Pospelov B., Rybka E., Togobytska V., Meleshchenko R., Danchenko Yu., Butenko T., Volkov I., Hafurov O., Yevsieiev V. Construction of the method for semi-adaptive threshold scaling transformation when computing recurrent plots // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Volume 4. Issue 10 (100). P. 22–29. doi: 10.15587/1729-4061.2019.176579

420. Webber C., Marwan N. Recurrence quantification analysis. understanding complex systems // Springer International Publishing Switzerland. 2015.

421. Thiel M., Romano M. C., Kurths J., Meucci R., Allaria E., Arecchi F. T. Influence of observational noise on the recurrence quantification analysis // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 2002. V. 171 (3). P. 138–152.

422. Zbilut J. P., Zaldívar-Comenges J. M., Strozzi F. Recurrence quantification based liapunov exponents for monitoring divergence in experimental data // *Physics Letters A*. 2002. V. 297 (3–4). P. 173–181.

423. Pospelov B., Rybka E., Meleshchenko R., Asotskyi V., Petukhova O., Gornostal S., Harbuz S. Development of a self-adjusting method for calculating recurrent diagrams in a space with a scalar product // *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019. Issue 5. P. 10–18. doi: 10.21303/2461-4262.2019.00981

424. Webber Jr. C. L., Zbilut J. P. *Tutorials in contemporary nonlinear methods for the behavioral sciences*. 2005. 26 p.

425. Mandelbrot B. *Fraktalnaya geometriya prirody* // *Institut kompyuternykh issledovaniy*. 2002. V. 656. P. 12.

426. Поспелов Б.Б., Мелешченко Р.Г., Прокопенко О.В., Мельниченко А.С. Меры рекуррентности и методика их использования для изучения и прогнозирования динамики состояния экосистем // *Проблеми надзвичайних ситуацій: зб. наук. праць*. 2019. №29. С. 14–28.

427. Kondratenko O. M., Vambol S. O., Stokov O. P., Avramenko A. M. Mathematical model of the efficiency of diesel particulate matter filter // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2015. V. 6. P. 55–61.

428. Vasiliev M. I., Movchan I. O., Koval O. M. Diminishing of ecological risk via optimization of fire-extinguishing system projects in timber-yards // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2014. V. 5. P. 106–113.

429. Numerical simulation of the creation of a fire fighting barrier using an explosion of a combustible charge / Dubinin D., Korytchenko K., Lisnyak A.,

Hrytsyna I., Trigub V. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. V. 6/10 (90). P. 11–16.

430. Vasyukov A., Loboichenko V., Bushtec S. Identification of bottled natural waters by using direct conductometry // *Ecology Environment and Conservation*. 2016. V. 22/3. P. 1171–1176.

431. Ахтиманкина А. В. Исследование динамики концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе г. Шелехова // *Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле»*. 2015. Т. 13. С. 42–57.

432. Pospelov B., Rybka E., Meleshchenko R., Krainiukov O., Harbuz S., Bezuhla Yu., Morozov I., Kuruch A., Saliyenko O., Vasylichenko R. Use of uncertainty function for identification of hazardous states of atmospheric pollution vector // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Volume 2. Issue 10 (104). P. 6–12. doi:10.15587/1729-4061.2020.200140

433. Методичні рекомендації МР 2.2.12–142–2007. «Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря». Затв. наказом МОЗ України від 13.04.2007 № 184. К. 2007. 40 с.

434. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Integrated Risk Information System (IRIS). URL: <http://www.epa.gov/iris>

435. Risk Decision Making. A Workshop in Risk Assessment, Risk Management & Risk Communication // U.S. Environmental Protection Agency, Aug. 1992. 186 p.

436. Авалиани С. Л., Андрианова М. М. Печенникова Е. В., Пономарева О. В. Окружающая среда. Оценка риска для здоровья (мировой опыт). М. 1996. 158 с.

437. Environmental health Criteria 210: Principles for the Assessment of Risk to Human Health from Exposure to Chemicals // WHO / IPCS. Geneva, 1999. 322 p.

438. Environmental health Criteria 214: Human Exposure Assessment // WHO / IPCS. Geneva, 2000. 422 p.

439. Киселев А. В., Фридман К. Б. Оценка риска здоровью. СПб.: АО «Дейта». 1997. 100 с.

440. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Krainiukov O., Maksymenko N., Meleshchenko R., Bezuhla Yu., Hrachova I., Nesterenko R., Shumilova A. Mathematical model of determining a risk to the human health along with the detection of hazardous states of urban atmosphere pollution based on measuring the current concentrations of pollutants // Eastern-European Journal of Enterprise. 2020. Volume 4. Issue 10 (106). P. 37–44. doi:10.15587/1729-4061.2020.210059

441. Kocher D. C., Hoffman F. O. Regulation of carcinogens: The problem and a solution // Oak Ridge National Laboratory Review (United States). 1993. V. 26. № 1.

442. Seitz R. R., Kocher D. C. On establishing waste concentration limits for low-level radioactive waste disposal // WASTE MANAGEMENT-TUCSON. 1993. P. 387–387.

443. Gocheva-Ilieva S. G., Ivanov A. V., Voynikova D. S., Boyadzhiev D. T. Time series analysis and forecasting for air pollution in small urban area: an SARIMA and factor analysis approach. Stochastic environmental research and risk assessment. 2014. V. 28(4). P. 1045-1060.

444. ISO/IEC Safety aspects-Guidelines for their inclusion in standards. 1999.

445. World Health Organization. WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. 2010.

446. US EPA Human health risk assessment. United States Environmental Protection Agency. 2012. URL: <http://epa.gov/riskassessment/health-risk.htm>.

447. Поспелов Б. Б., Андронов В. А., Рыбка Е. А., Мелещенко Р. Г., Самойлов М. А., Бородич П. Ю. Риск нарушение нормальных условий жизнедеятельности человека при техногенных чрезвычайных ситуациях // Проблеми надзвичайних ситуацій: зб. наук. праць. 2020. №32. С. 31–43.

448. Система раннього виявлення надзвичайних ситуацій / Поспелов Б.Б., Андронов В.А., Рыбка Е.О., Мелещенко Р.Г., Карпець К.М., Горінова

В.В., Самойлов М.О. Пат. 139221 України, МПКG08B 19/00 (2019.01), заявник та патентовласник Національний університет цивільного захисту України. № у 2019 06486, заявка 10.06.2019, опуб. 26.12.2019, Бюл. №24.

449. Поспелов Б.Б., Мелешченко Р.Г., Прокопенко О.В., Мельниченко А.С. Системный аспект предотвращения чрезвычайных ситуаций на объектах критической инфраструктуры // Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції. 11-12 квітня 2019 року. Черкаси. 2019. С. 62–64.

450. Поспелов Б.Б., Рыбка Е.А., Мелешченко Р.Г., Безуглая Ю.С., Самойлов М.А. Новая рецепторная модель атмосферных загрязнений для предупреждения и оперативного управления ликвидацией последствий чрезвычайных ситуаций // Надзвичайні ситуації: безпека та захист: матеріали X Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. 29-30 жовтня 2020 року. Черкаси: ЧПБ імені Г. Чорнобиля УЦЗ України, 2020. С. 282–284.

451. Поспелов Б.Б., Андронов В.А., Рыбка Е.А., Мелешченко Р.Г., Мельниченко А.С. Оперативный метод оценки влияния чрезвычайных ситуаций на окружающую атмосферу // Исторические аспекты, актуальные проблемы и перспективы развития гражданской обороны: сборник тезисов и докладов VII Международной научно-практической конференции адъюнктов, магистрантов, курсантов и студентов. 15 марта 2019. Кокшетау, РГУ «КТИ КЧС МВД Республики Казахстан». 2019. 188–192.

452. Pospelov B., Meleshchenko R., Kosse A., Khmyrov I., Bosniuk V. Development of a method for predicting the recurrence of states of atmospheric air pollution concentration in industrial cities // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Volume 2. Issue 10 (98). P. 43–48. doi: 10.15587/1729-4061.2019.162652

453. Bekmezci I., Sahingoz O., Temel Ş. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // Ad Hoc Networks. 2013. V. 11(3). P. 1254–1270.

454. Alshbatat A. I., Dong L. Adaptive MAC protocol for UAV communication networks using directional antennas // Networking, Sensing and Control (ICNSC), International Conference. 2010. P. 598–603.

455. Alshabtat A. I. Dong L., Yang J. Li F. Low latency routing algorithm for unmanned aerial vehicles ad-hoc networks // International Journal of Electrical and Computer Engineering. 2010. V. 6. P. 48–54.

456. Lin L. Sun Q., Yang J. Li. F. A novel geographic position mobility oriented routing strategy for UAVs // Journal of Computational Information Systems. 2012. V. 8(2). P. 709–716.

457. Zang C., Zang S. Mobility prediction clustering algorithm for UAV networking // In GLOBECOM Workshops. 2011. № 3. P. 1158–1161.

458. Liu K., Zhang J., Zhang T. The clustering algorithm of UAV networking in near-space // 8th International Symposium IEEE: In Antennas, Propagation and EM Theory. 2008. P. 1550–1553.

459. Huba W., Shenoy N. Airborne surveillance networks with directional antennas // Computers and network Systems, IARIA International conference, ICNS. 2012. P. 1–7.

460. Qingwen W., Gang L., Zhi L., Qian Q. An adaptive forwarding protocol for three dimensional flying ad hoc networks // Electronics Information and Emergency Communication, 5th International Conference, IEEE. 2015. P. 142–145.

461. Rosário D. Zhao Z., Santos A., Braun T., Cerqueira E. A beaconless opportunistic routing based on a cross-layer approach for efficient video dissemination in mobile multimedia IoT applications // Computer Communications. 2014. V. 45. P. 21–31.

462. Temel S., Bekmezci I. LODMAC: location oriented directional MAC protocol for FANETs // Computer Networks. 2015. V. 83. P. 76–84.

463. Pospelov B., Petukhova O., Meleschenko R., Gornostal S., Shcherbak S. Development of communication models of wireless environment in emergency

situations // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Volume 2. Issue 9 (92). P. 40–47. doi: 10.15587/1729-4061.2018.127023

464. Мелешченко Р.Г. Раннее выявление пожара на основе контроля динамики состояния газовой среды в помещениях // Проблемы пожарной безопасности: Сборник научных трудов. Харьков: НУГЗУ. Вып. 47. 2020. С. 71–80.

465. Поспелов Б. Б., Андронов В.А. Системная классификация моделей динамики среднеобъемной температуры пожара в помещении / Проблемы пожарной безопасности. Харьков: НУГЗУ. 2015. Вып. 37. С. 178–185.

466. Полстянкин Р. М., Поспелов Б. Б. Стохастические модели опасных факторов и параметров очага загорания в помещениях / Проблемы пожарной безопасности. Харьков: НУГЗУ. 2015. Вып. 38. С. 130–135.

467. Korytchenko K., Markov V., Polyakov I., Meleshchenko R. Validation of the numerical model of a spark channel expansion in a low-energy atmospheric pressure discharge // Problems of Atomic Science and Technology. Plasma Electronics and New Methods of Acceleration. 2018. Volume 10. Issue 4 (116). P. 144–149.

468. Ozerov A., Vinnikov D., Skob Yu., Meleshchenko R. Numerical simulation of influence of the non-equilibrium excitation of molecules on direct detonation initiation by spark discharge // Problems of Atomic Science and Technology. Plasma Electronics and New Methods of Acceleration. 2018. Volume 10. Issue 4 (116). P. 194–199.

469. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Meleschenko R., Borodych P. Studying the recurrent diagrams of carbon monoxide concentration at early ignitions in premises // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Volume 3. Issue 9 (93). P. 34–40. doi: 10.15587/1729-4061.2019.155027

470. Korytchenko K., Kasimov A., Golota V., Ajmani S., Dubinin D., Meleshchenko R. Experimental investigation of arc column expansion generated by high-energy spark ignition system // Problems of Atomic Science and Technology. Plasma Physics. 2018. Volume 24. Issue 6 (118). P. 225–228.



471. Kustov M. V., Kalugin V. D., Tutunik V. V., Tarakhno E. V. Physicochemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemical pollution of the atmosphere. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2019. №1. P. 92–99.

472. Шевченко О. Г., Кульбида М. И., Снижко С. И., Щербуха Л. С., Данілова Н. О. Уровень загрязнения атмосферного воздуха города Киева формальдегидом / *Український гідрометеорологічний журнал*, 2014. №14.

473. Поспелов Б. Б., Андронов В. А., Рибка Е. А., Мелещенко Р. Г., Самойлов М. А. Системный подход к обеспечению экологической безопасности развития энергетики // *Фізико-технічні проблеми енергетики та шляхи їх вирішення 2019: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. 19 червня 2019. Харків. 2019. С. 57–58.*

474. Мелещенко Р. Г., Ленфіра А. В. Аналіз способів та шляхів проведення рятування людей // *Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів (теорія та практика): збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції, 12 березня 2015 року, Харків: НУЦЗ України, 2015. С. 180–181.*

475. Meleschenko R. G., Gornostal S. A. Investigation of the characteristics of the internal firefighting water pipeline elements // *Proceedings of the 2nd Annual Conference Technology transfer: fundamental principles and innovative technical solutions 23 November 2018. Tallinn, Estonia, 2018. P. 55–57.*

476. Хилько Ю. В., Мелещенко Р. Г. Визначення параметрів вогнегасної ефективності викиду порошкових сумішей з контейнерів // *Проблемы пожарной безопасности: Сборник научных трудов. Харьков: НУГЗУ. Вып. 41. 2017. С. 196–200.*

477. Спосіб гасіння пожежі мобільним роботом / Андронов В. А., Карпець К. М., Семків О. М., Мелещенко Р. Г., Мельниченко А. С., Бутенко Т. Ю., Рибка Є. О. Пат. 132449 України, МПК G01N 3/24 (2006.01), заявник та патентовласник Національний університет цивільного захисту України. № u 2019 09788, заявка 01.10.2019, опуб. 25.02.2019, Бюл. №4.

478. Мелешенко Р. Г., Мунтян В. К., Тарасенко О. А. Застосування авіації при проведенні пошуково-рятувальних робіт // Матеріали науково-практичного семінару «Запобігання надзвичайним ситуаціям і їх ліквідація». 7 лютого 2018 р. Харків: НУЦЗ України, 2018. С. 137–140.

479. Мелешенко Р. Г., Мунтян В. К., Коврегін В. В. Имитационная модель создания противопожарного барьера совместными усилиями авиационных и наземных сил // Проблемы пожарной безопасности: Сборник научных трудов. Харьков: НУГЗУ. Вып. 37. 2015. С. 142–149.

480. Meleschenko R. G., Muntyan V. K., Tarasenko A. A. Justification of the approach for calculating the parameters of aviation emergency and rescue operations when using visual search // Проблеми надзвичайних ситуацій: Збірник наукових праць. Харків: НУЦЗУ. Вип. 25. 2017. С. 67–72.

## **ДОДАТОК А**

### **Список публікацій за темою дисертації**

**Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

***Монографії***

1. Пospelov Б. Б., Андронов В. А., Рыбка Е. А., Мелешенко Р. Г., Карпец К. М. Разработка конструктивных методов повышения эффективности автоматического обнаружения возгораний в компрессорных станциях газотранспортных систем Украины. Монография. Харьков: НУЦЗУ, 2018. 172 с.

***Статті у закордонних фахових виданнях***

2. **Meleshchenko R. G.** System analysis of prevention of man-made emergency situations in consequence of fire in the premises of the object // ScienceRise. 2020. Issue 1 (66). P. 38–46. doi: 10.21303/2313-8416.2020.001150

***Статті у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародної наукометричної бази Scopus***

3. Pospelov B., Rybka E., **Meleschenko R.**, Gornostal S., Shcherbak S. Results of experimental research into correlations between hazardous factors of ignition of materials in premises // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Volume 6. Issue 10 (90). P. 50–56. doi: 10.15587/2312-8372.2016.85866

4. Pospelov B., Petukhova O., **Meleschenko R.**, Gornostal S., Shcherbak S. Development of communication models of wireless environment in emergency situations // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Volume 2. Issue 9 (92). P. 40–47. doi: 10.15587/1729-4061.2018.127023

5. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., **Meleschenko R.**, Borodych P. Studying the recurrent diagrams of carbon monoxide concentration at early ignitions in premises // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Volume 3. Issue 9 (93). P. 34–40. doi: 10.15587/1729-4061.2019.155027

6. Korytchenko K., Markov V., Polyakov I., **Meleshchenko R.** Validation of the numerical model of a spark channel expansion in a low-energy atmospheric pressure discharge // *Problems of Atomic Science and Technology. Plasma Electronics and New Methods of Acceleration*. 2018. Volume 10. Issue 4 (116). P. 144–149.

7. Ozerov A., Vinnikov D., Skob Yu., **Meleshchenko R.** Numerical simulation of influence of the non-equilibrium excitation of molecules on direct detonation initiation by spark discharge // *Problems of Atomic Science and Technology. Plasma Electronics and New Methods of Acceleration*. 2018. Volume 10. Issue 4 (116). P. 194–199.

8. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., **Meleschenko R.**, Gornostal S. Analysis of correlation dimensionality of the state of a gas medium at early ignition of materials // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Volume 5. Issue 10 (95). P. 25–30. doi: 10.15587/1729-4061.2018.142995

9. Korytchenko K., Kasimov A., Golota V., Ajmani S., Dubinin D., **Meleshchenko R.** Experimental investigation of arc column expansion generated by high-energy spark ignition system // *Problems of Atomic Science and Technology. Plasma Physics*. 2018. Volume 24. Issue 6 (118). P. 225–228.

10. Pospelov B., Rybka E., **Meleschenko R.**, Borodych P., Gornostal S. Development of the method for rapid detection of hazardous atmospheric pollution of cities with the help of recurrence measures // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Volume 1. Issue 10 (97). P. 29–35. doi: 10.15587/17294061.2019.155027

11. Pospelov B., **Meleshchenko R.**, Kosse A., Khmyrov I., Bosniuk V. Development of a method for predicting the recurrence of states of atmospheric air pollution concentration in industrial cities // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Volume 2 (98). Issue 10. P. 43–48. doi: 10.15587/1729-4061.2019.162652

12. Pospelov B., Andronov V., **Meleshchenko R.**, Danchenko Yu., Artemenko I., Romaniak M., Khmyrova A., Butenko T. Construction of methods

for computing recurrence plots in space with a scalar product // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Volume 3. Issue 4 (99). P. 37–44. doi: 10.15587/1729-4061.2019.169887

13. Pospelov B., Rybka E., Togobytska V., **Meleshchenko R.**, Danchenko Yu., Butenko T., Volkov I., Hafurov O., Yevsieiev V. Construction of the method for semi-adaptive threshold scaling transformation when computing recurrent plots // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Volume 4. Issue 10 (100). P. 22–29. doi: 10.15587/1729-4061.2019.176579

14. Pospelov B., Rybka E., **Meleshchenko R.**, Asotskyi V., Petukhova O., Gornostal S., Harbuz S. Development of a self-adjusting method for calculating recurrent diagrams in a space with a scalar product // EUREKA: Physics and Engineering. 2019. Issue 5. P. 10–18. doi: 10.21303/2461-4262.2019.00981

15. Pospelov B., **Meleshchenko R.**, Krainiukov B., Karpets K., Petukhova O., Bezuhla Yu., Butenko T., Horinova V., Borodych P., Kochanov E. A method for preventing the emergency resulting from fires in the premises through operative control over a gas medium // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Volume 1. Issue 10 (103). P. 6–13. doi: 10.15587/1729-4061.2020.194009

16. Pospelov B., Rybka E., **Meleshchenko R.**, Krainiukov O., Harbuz S., Bezuhla Yu., Morozov I., Kuruch A., Saliyenko O., Vasylichenko R. Use of uncertainty function for identification of hazardous states of atmospheric pollution vector // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Volume 2. Issue 10 (104). P. 6–12. doi:10.15587/1729-4061.2020.200140

17. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Krainiukov O., Maksymenko N., **Meleshchenko R.**, Bezuhla Yu., Hrachova I., Nesterenko R., Shumilova A. Mathematical model of determining a risk to the human health along with the detection of hazardous states of urban atmosphere pollution based on measuring the current concentrations of pollutants // Eastern-European Journal of Enterprise. 2020. Volume 4. Issue 10 (106). P. 37–44. doi:10.15587/1729-4061.2020.210059

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

18. **Мелешенко Р. Г.**, Мунтян В. К., Коврегін В. В. Имитационная модель создания противопожарного барьера совместными усилиями авиационных и наземных сил // Проблемы пожарной безопасности: Сборник научных трудов. Харьков: НУГЗУ. Вып. 37. 2015. С. 142–149.

19. **Meleschenko R. G.**, Muntyan V. K., Tarasenko A. A. Justification of the approach for calculating the parameters of aviation emergency and rescue operations when using visual search // Проблеми надзвичайних ситуацій: Збірник наукових праць. Харків: НУЦЗУ. Вип. 25. 2017. С. 67–72.

20. Хилько Ю. В., **Мелешенко Р. Г.** Визначення параметрів вогнегасної ефективності викиду порошкових сумішей з контейнерів // Проблеми пожарной безопасности: Сборник научных трудов. Харьков: НУГЗУ. Вып. 41. 2017. С. 196–200.

21. **Meleschenko R.**, Dureev V. Mathematical model of thermal fire detector with the thermistor // Проблеми пожарной безопасности: Сборник научных трудов. Харьков: НУГЗУ. Вып. 44. 2018. С. 89–92.

22. **Мелешенко Р. Г.** Предотвращение чрезвычайных ситуаций на объектах критической инфраструктуры путем раннего выявления загрязнений воздуха // Проблеми надзвичайних ситуацій: зб. наук. праць. 2018. №28. С. 69–82.

23. Поспелов Б. Б., **Мелешенко Р. Г.**, Прокопенко О. В., Мельниченко А. С. Меры рекуррентности и методика их использования для изучения и прогнозирования динамики состояния экосистем // Проблеми надзвичайних ситуацій: зб. наук. праць. 2019. №29. С. 14–28.

24. **Мелешенко Р. Г.** Модель для выявления угроз возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера с помощью мониторинга температуры в помещениях объекта // Проблеми пожарной безопасности: Сборник научных трудов. Харьков: НУГЗУ. Вып. 45. 2019. С. 117–124.

25. **Мелешенко Р. Г.** Инженерно-технический метод предупреждения чрезвычайных ситуаций техногенного характера с помощью контроля загрязнения атмосферного воздуха // Проблемы надзвичайних ситуацій: зб. наук. праць. 2019. №30. С. 85–97.

26. Пospelов Б. Б., Рыбка Е. А., **Мелешенко Р. Г.**, Бородич П. Ю., Самойлов М. А. Метод раннего обнаружения опасной ситуации в помещениях на основе корреляционной размерности опасных факторов газовой среды // Проблемы пожарной безопасности: Сборник научных трудов. Харьков: НУГЗУ. Вып. 46. 2019. С. 143–154.

27. **Мелешенко Р. Г.** Раннее выявление пожара на основе контроля динамики состояния газовой среды в помещениях // Проблемы пожарной безопасности: Сборник научных трудов. Харьков: НУГЗУ. Вып. 47. 2020. С. 71–80.

28. Пospelов Б. Б., Рыбка Е. А., **Мелешенко Р. Г.**, Самойлов М. А., Карпец К.М., Безуглая Ю.С. Инженерно-технический метод предупреждения чрезвычайных ситуаций техногенного характера путем оперативного контроля состояния газовой среды в помещениях объекта // Проблемы надзвичайних ситуацій: зб. наук. праць. 2020. №31. С. 234–246.

29. Пospelов Б. Б., Рыбка Е. А., **Мелешенко Р. Г.**, Самойлов М. А., Безуглая Ю. С. Методы вычисления мер текущей рекуррентности флуктуаций состояния газовой среды для раннего выявления пожара в помещениях // Проблемы пожарной безопасности: Сборник научных трудов. Харьков: НУГЗУ. Вып. 48. 2020. С. 136–146.

30. Пospelов Б. Б., Рыбка Е. А., **Мелешенко Р. Г.**, Самойлов М. А., Бородич П. Ю., Мироненко А. А. Риск нарушение нормальных условий жизнедеятельности человека при техногенных чрезвычайных ситуациях // Проблемы надзвичайних ситуацій: зб. наук. праць. 2020. №32. С. 31–43.



***Патенти:***

31. Система раннього виявлення надзвичайних ситуацій / Поспелов Б. Б., Андронов В. А., Рибка Є. О., **Мелешенко Р. Г.**, Карпець К. М., Горінова В. В., Самойлов М. О. Пат. 139221 України, МПКG08B 19/00 (2019.01), заявник та патентовласник Національний університет цивільного захисту України. № у 2019 06486, заявка 10.06.2019, опуб. 26.12.2019, Бюл. №24.

32. Спосіб гасіння пожежі мобільним роботом / Андронов В. А., Карпець К. М., Семків О. М., **Мелешенко Р. Г.**, Мельниченко А. С. Бутенко Т. Ю., Рибка Є. О. Пат. 132449 України, МПК G01N 3/24 (2006.01), заявник та патентовласник Національний університет цивільного захисту України. № у 2019 09788, заявка 01.10.2019, опуб. 25.02.2019, Бюл. №4.

***Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:***

33. **Мелешенко Р. Г.**, Ленфіра А. В. Аналіз способів та шляхів проведення рятування людей // Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів (теорія та практика): збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції, 12 березня 2015 року, Харків: НУЦЗ України, 2015. С. 180–181.

34. **Мелешенко Р. Г.**, Іщук В. М. Статистичний аналіз та прогноз нещасних випадків // Безпека життєдіяльності людини як умова сталого розвитку сучасного суспільства: Збірник тез VI Міжнародної науково-практичної конференції. 8-9 червня 2017 р. Київ: Таврійський Національний університет імені В. І. Вернадського, 2017. С. 85–90.

35. **Мелешенко Р. Г.**, Мунтян В. К., Тарасенко О. А. Застосування авіації при проведенні пошуково-рятувальних робіт // Матеріали науково-практичного семінару «Запобігання надзвичайним ситуаціям і їх ліквідація». 7 лютого 2018 р. Харків: НУЦЗ України, 2018. С. 137–140.

36. **Meleschenko R. G.**, Gornostal S. A. Investigation of the characteristics of the internal firefighting water pipeline elements // Proceedings of the 2nd

Annual Conference Technology transfer: fundamental principles and innovative technical solutions 23 November 2018. Tallinn, Estonia, 2018. P. 55–57.

37. Поспелов Б. Б., Андронов В. А., Рыбка Е. А., **Мелешенко Р. Г.**, Мельниченко А. С. Оперативный метод оценки влияния чрезвычайных ситуаций на окружающую атмосферу // Исторические аспекты, актуальные проблемы и перспективы развития гражданской обороны: сборник тезисов и докладов VII Международной научно-практической конференции адъюнктов, магистрантов, курсантов и студентов. 15 марта 2019. Кокшетау, РГУ «КТИ КЧС МВД Республики Казахстан». 2019. 188–192.

38. **Мелешенко Р. Г.**, Иванов Е. В. Запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури шляхом раннього виявлення загроз // Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. Харків: НУЦЗУ, 2019. С. 36.

39. Поспелов Б. Б., **Мелешенко Р. Г.**, Прокопенко О. В., Мельниченко А. С. Системный аспект предотвращения чрезвычайных ситуаций на объектах критической инфраструктуры // Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції. 11-12 квітня 2019 року. Черкаси. 2019. С. 62–64.

40. Поспелов Б. Б., Андронов В. А., Рыбка Е. А., **Мелешенко Р. Г.**, Самойлов М.А. Системный подход к обеспечению экологической безопасности развития энергетики // Фізико-технічні проблеми енергетики та шляхи їх вирішення 2019: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. 19 червня 2019. Харків. 2019. С. 57–58.

41. Поспелов Б. Б., Андронов В. А., Рыбка Е. О., **Мелешенко Р. Г.**, Самойлов М.О. Парадигма запобігання надзвичайним ситуаціям, пов'язаних із забрудненням атмосфери міст // Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах: матеріали 21 Всеукраїнської науково-практичної конференції (за міжнародною участю). 8 жовтня 2019 року. Київ, ІДУЦЗ. 2019. С. 218–221.

42. **Мелешенко Р. Г.** Метод предотвращения чрезвычайных ситуаций // Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. Харків: НУЦЗУ, 2020. С. 25.

43. Поспелов Б. Б., Андронов В. А., Рыбка Е. А., **Мелешенко Р. Г.**, Самойлов М. А. Метод предупреждения чрезвычайных ситуаций техногенного характера на основе текущей корреляционной размерности состояния газовой среды в помещениях объекта // Problems of Emergency Situations: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2020. С. 134–136.

44. Поспелов Б. Б., Рыбка Е. А., **Мелешенко Р. Г.**, Безуглая Ю. С., Самойлов М. А. Новая рецепторная модель атмосферных загрязнений для предупреждения и оперативного управления ликвидацией последствий чрезвычайных ситуаций // Надзвичайні ситуації: безпека та захист: матеріали X Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. 29-30 жовтня 2020 року. Черкаси: ЧШБ імені Г. Чорнобиля УЦЗ України, 2020. С. 282–284.

**ДОДАТОК Б**  
**Акти впровадження**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
 Головний інженер ШВПГКН  
В.В. Кишка  
 10 2020р.



### АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Результатів дисертаційного дослідження МЕЛЕЩЕНКА Руслана Геннадійовича «Інженерно-технічні методи попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища» на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Комісія у складі:

**Голови комісії:** провідного інженера з охорони праці Шеліховського Сергія Володимировича;

**Членів комісії:** начальника служби технологічної Хайнацького Анатолія Васильовича, старшого інженера з ПБ та ЦЗ Грицюти Віктора Антоновича склали цей акт про те, що результати дисертаційного дослідження МЕЛЕЩЕНКА Руслана Геннадійовича на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук впроваджені в повсякденну діяльність Шебелинського ВПГКН, а саме:

- інженерно-технічний метод попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища приміщень об'єктів, який дозволяє на ранньому етапі виявляти загоряння та не допускати їх подальше переростання в надзвичайні ситуації;
- інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру унаслідок наявності в атмосферному повітрі шкідливих речовин, який дозволяє попередити появу ризику здоров'ю населення понад величину прийнятого допустимого індивідуального ризику

та не допустити виникнення надзвичайних ситуацій, пов'язаних з наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин.

- діючий зразок безпілотної рухомої платформи для поточного вимірювання стану повітряного середовища в приміщеннях та на території об'єкта, як складову комплексної системи оперативного контролю та управління станом повітряного середовища.

Впровадження зазначених результатів дисертаційного дослідження дозволило підвищити точність вимірювання станів повітряного середовища в приміщеннях та на території об'єкта. Стало можливим прогнозування виникнення позаштатних подій з метою попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єкті.

Голова комісії:



С.В. Шеліховський

Члени комісії:



А.В. Хайнацький



В.А. Грицюта

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Хладопром»

Долішний В.М.



« 16 »

10

2020 р.

**АКТ**

впровадження результатів дисертаційної роботи  
на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
МЕЛЕЩЕНКА Руслана Геннадійовича

Комісія у складі:

Голови комісії: Долішний В.М.

Членів комісії:

- Олефір Р.Л.
  
- Шумейко В.В.

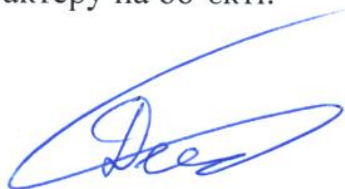
склала цей акт про те, що результати дисертаційного роботи на тему «Інженерно-технічні методи попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища» МЕЛЕЩЕНКА Руслана Геннадійовича на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук впроваджені в практичну діяльність ТОВ «Хладопром», у вигляді комплексної система оперативного контролю та управління станом повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) об'єкта, яка включає систему поточного вимірювання стану повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) об'єктів, систему підтримки прийняття оперативних рішень та систему виконання управлінських рішень.

Система реалізована на основі розроблених у роботі інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) за допомогою оперативного контролю

стану повітряного середовища приміщень об'єктів, який дозволяє на ранньому етапі виявляти загоряння та не допускати їх подальше переростання в надзвичайні ситуації; інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру унаслідок наявності в атмосферному повітрі шкідливих речовин, який дозволяє попередити появу ризику здоров'ю населення понад величину прийнятого допустимого індивідуального ризику та не допустити виникнення надзвичайних ситуацій, пов'язаних з наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин, небезпечних для людини.

Впровадження результатів дисертаційної роботи МЕЛЕЩЕНКА Руслана Геннадійовича дозволило підвищити ефективність контролю стану повітряного середовища об'єкта, забезпечити підтримку прийняття та виконання управлінських рішень з метою попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єкті.

Голова комісії



Долішний В.М.

Члени комісії:



Олефір Р.Л.

Шумейко В.В.

« 16 » 10 2020 року



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з навчальної та методичної  
роботи Львівського державного  
університету безпеки життєдіяльності

Дмитро ЧАЛИЙ

2020 року

## АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження  
«Інженерно-технічні методи попередження надзвичайних ситуацій  
техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури за допомогою  
оперативного контролю стану повітряного середовища»  
на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
МЕЛЕЩЕНКА Руслана Геннадійовича

Комісія у складі:

Голови комісії: начальника кафедри наглядово-профілактичної діяльності та пожежної автоматики Олега БАШИНСЬКОГО;

Членів комісії: заступника начальника кафедри наглядово-профілактичної діяльності та пожежної автоматики Ігоря КРАВЦЯ, доцента кафедри наглядово-профілактичної діяльності та пожежної автоматики Надії ФЕРЕНЦІ склала цей акт про те, що результати дисертаційного дослідження МЕЛЕЩЕНКА Руслана Геннадійовича на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук впроваджені в навчальний процес у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності, а саме:

1. Математичну модель попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок пожеж (вибухів) за допомогою оперативного контролю стану повітряного середовища приміщень об'єктів критичної інфраструктури, яка базується на поточних показниках фрактальності природних станів повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях та складається з двох аналітичних залежностей: залежності поточної міри кореляційної розмірності від природних станів повітряного середовища, функціоналу норми, ширини вікна усереднення та розміру околиці, що визначає рекурентні стани; залежності поточної міри щодо рекурентних станів від природних станів повітряного середовища приміщень, функціоналу норми та розміру околиці, який визначає рекурентні стани.

2. Математичну модель попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру обумовлених наявністю в атмосферному повітрі шкідливих речовин на території (поблизу) об'єктів критичної інфраструктури з урахуванням ризику здоров'ю людини, яка складається з восьми аналітичних залежностей: залежності обчислення рекурентних діаграм від поточних вимірюваних станів забрудненої атмосфери, функціоналу норми і порогу

рекурентних станів; залежності обчислення рекурентних діаграм, що самоналаштовуються за поточними вимірами станів забрудненої атмосфери при заданій величині кута рекурентних станів між вимірюваними векторами; залежності рекурентних станів забрудненої атмосфери від поточного усереднення для першої та другої залежності; залежності рекурентних станів забрудненої атмосфери від значення функції невизначеності для відповідних векторів вимірюваних станів щодо заданого інтервалу спостереження та поточного усереднення у вікні без обчислення рекурентних діаграм; залежності ризику негайних токсичних ефектів та хронічної інтоксикації від концентрацій для довільних небезпечних речовин, що забруднюють атмосферне повітря.

Результати дисертаційного дослідження на цей час впроваджено та використовуються в навчальному процесі кафедри наглядно-профілактичної діяльності та пожежної автоматики навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки Львівського державного університету безпеки життєдіяльності під час вивчення дисциплін «Пожежна безпека в населених пунктах», «Автоматичні системи забезпечення протипожежного захисту».

Комісія дійшла висновку, що результати дисертаційного дослідження МЕЛЕЩЕНКА Руслана Геннадійовича можуть використовуватися на різноманітних об'єктах критичної інфраструктури, до яких відносяться теплові електростанції, хімічно-небезпечні виробництва, об'єкти нафто-, газотранспортної системи тощо, в якості комплексної системи оперативного контролю та управління станом повітряного середовища в приміщеннях та на території (поблизу) об'єктів з метою попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру унаслідок пожеж (вибухів) та наявності в атмосферному повітрі шкідливих речовин.

Голова комісії:

кандидат технічних наук, доцент,  
полковник служби цивільного захисту

Олег БАШИНСЬКИЙ

Члени комісії:

кандидат технічних наук, доцент,  
полковник служби цивільного захисту

Ігор КРАВЕЦЬ

кандидат технічних наук, доцент,  
полковник служби цивільного захисту

Надія ФЕРЕНЦ

«20» 10 2020 року