

Національний університет цивільного захисту України  
Державної служби України з надзвичайних ситуацій

Національний університет цивільного захисту України  
Державної служби України з надзвичайних ситуацій

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Матухно Василь Васильович

УДК 544.454:[656.085.6:519.853]

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

**ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕКИ ГАЗОНАФТОПЕРЕРОБНИХ  
ОБ'ЄКТІВ (НА ЕТАПІ ПРОЕКТУВАННЯ) ПРИ НАДЗВИЧАЙНИХ  
СИТУАЦІЯХ З ВИБУХАМИ ХМАР ГАЗОПОВІТРЯНИХ СУМІШЕЙ**

21.02.03 – цивільний захист

21 – національна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

\_\_\_\_\_ В.В. Матухно

Науковий керівник Чуб Ігор Андрійович, доктор технічних наук, професор

Харків – 2018

## АНОТАЦІЯ

*Матухно В.В.* Зниження рівня вибухонебезпеки газонафтопереробних об'єктів (на етапі проектування) при надзвичайних ситуаціях з вибухами хмар газоповітряних сумішей. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

У дисертаційній роботі розв'язано важливу науково-практичну задачу в галузі цивільного захисту – розробку кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки технологічного блоку газонафтопереробного підприємства (на етапі проектування) в умовах можливої НС з вибухом дрейфуючої хмари газоповітряної суміші та методу мінімізації цього рівня шляхом оптимального розміщення вибухонебезпечного обладнання блоку.

Для досягнення цілей дисертаційного дослідження використані кількісні методи визначення параметрів вибуху хмари газоповітряної суміші, методи математичного моделювання впливу вибуху на сусідні об'єкти технологічного блоку, оптимізаційні методи теорії геометричного проектування, нелінійного математичного програмування, методи теорії ймовірностей, теорії надійності.

В дисертації розроблено математичну модель задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку газонафтопереробного підприємства (на етапі проектування) в умовах надзвичайної ситуації з вибухом дрейфуючої хмари газоповітряної суміші.

В роботі вдосконалено кількісний критерій оцінки рівня вибухонебезпеки технологічного блоку газонафтопереробного підприємства (на етапі проектування) в умовах надзвичайної ситуації з вибухом дрейфуючої хмари газоповітряної суміші шляхом урахування характеристик

вибухонебезпечних речовин, режиму вибуху, впливу вибуху на обладнання блоку та особливостей забудови території.

В дисертації отримав подальший розвиток метод мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку газонафтопереробного підприємства (на етапі проектування) в умовах надзвичайної ситуації з вибухом дрейфуючої хмари газоповітряної суміші шляхом оптимального розміщення вибухонебезпечного обладнання блоку.

В роботі проаналізовано статистичні дані щодо надзвичайних ситуацій з вибухами хмар газоповітряної суміші, які утворилися в наслідок руйнування технологічного обладнання газонафтопереробного підприємства. Проведено аналіз особливостей техногенних надзвичайних ситуацій з вибухами хмар газоповітряної суміші на газонафтопереробному підприємстві, розглянуто типові схеми аналізу ймовірних моделей виникнення та розвитку надзвичайних ситуацій з розгерметизацією обладнання і вибухом хмари газоповітряної суміші, проаналізовано стадії і характеристики розвитку надзвичайних ситуацій з викидом вибухонебезпечної речовини.

Проведено аналіз стану нормативно-правової бази в сфері промислової безпеки України і зарубіжних країн.

На основі вивчення літературних джерел проведено аналітичний огляд сучасного стану проблеми розробки методів та засобів кількісної оцінки і мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічних блоків газонафтопереробного підприємства на (етапі проектування) в умовах надзвичайних ситуацій з вибухами хмар газоповітряних сумішей.

Проаналізовано наявні методи кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки виробничих об'єктів, а також методи його зниження.

В дисертаційній роботі здійснена постановка оптимізаційної задачі зниження вибухонебезпечності технологічного блоку газонафтопереробного підприємства в умовах надзвичайної ситуації з утворенням і вибухом хмари газоповітряної суміші шляхом оптимального розміщення технологічного

обладнання в заданій області. Розміщення здійснюється з урахуванням режиму вибуху, характеристик вибухонебезпечних речовин, а також можливості дрейфу хмари газоповітряної суміші під дією вітру.

Розроблено інтегральний та частковий критерії оцінки вибухонебезпеки технологічного блоку, визначено поняття «центр вибухонебезпеки технологічного блоку».

Досліджено функцію мети оптимізаційної задачі розміщення вибухонебезпечного обладнання блоку, в якості якої виступає інтегральний критерій оцінки вибухонебезпеки технологічного блоку.

Досліджено систему обмежень оптимізаційної задачі розміщення вибухонебезпечного обладнання блоку, яка в загальному випадку включає умови геометричного і технологічного характеру. Проведена формалізація геометричних обмежень з використанням апарату  $\Phi$ -функцій.

У дисертації розроблено чисельний метод розв'язання оптимізаційної задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку газонафтопереробного підприємства в умовах надзвичайної ситуації з вибухом хмари газоповітряної суміші, яка виникла в наслідок руйнування обладнання блоку.

Мінімізація рівня вибухонебезпеки технологічного блоку виконується за рахунок оптимізації розміщення обладнання в межах блоку при заданій орієнтації блоку відносно напрямку найбільш ймовірного приземного вітру.

В дисертації виконано чисельну реалізацію методу мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку в умовах вибуху хмари газоповітряної суміші за рахунок оптимального розміщення обладнання.

Реалізацію методу проведено для модельного прикладу технологічного блоку у складі чотирьох об'єктів та технологічного блоку газопереробного підприємства – типової абсорбційно-газофракціонуючої установки. Застосування розробленого в роботі методу дозволило знизити рівень вибухонебезпеки для модельного прикладу на 29 %, а для типової

абсорбційно-газофракціонуючої установки – на 64,3 % для умов розглянутого варіанту начального компонування технологічного блоку.

Наукові результати дисертаційної роботи є подальшим розвитком конструктивних засобів розв'язання задач зниження вибухонебезпеки технологічних блоків газонафтопереробного підприємства в умовах надзвичайних ситуацій з вибухами дрейфуючих хмар газоповітряної суміші шляхом оптимізації розміщення вибухонебезпечного обладнання блоку.

Математична модель та метод оптимального розміщення вибухонебезпечного обладнання технологічного блоку можуть використовуватися науково-дослідними, проектно-конструкторськими організаціями на етапах побудови генеральних планів підприємств газонафтопереробної галузі України, що дозволить мінімізувати рівень їх вибухонебезпеки та знизити ймовірність руйнування обладнання в умовах надзвичайних ситуацій з вибухами дрейфуючих хмар газоповітряної суміші.

Застосування запропонованого в роботі кількісного критерію для оцінки рівня вибухонебезпеки технологічного блоку газонафтопереробного підприємства дозволить підвищити точність його визначення шляхом врахування дрейфу хмари газоповітряної суміші, зниження концентрації вибухонебезпечної речовини у хмарі завдяки процесу розсіяння, а також характеристик вибухонебезпечних речовин, режиму вибуху та особливостей забудови території.

Результати роботи можуть бути використані при складанні планів ліквідації аварійних ситуацій газонафтопереробного підприємства для визначення параметрів надзвичайних ситуацій з вибухами дрейфуючих хмар газоповітряної суміші та кількісної оцінки впливу вибуху на технологічне обладнання, установки, будівлі та споруди підприємства.

Математична модель та метод мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку газонафтопереробного підприємства можуть застосовуватися при розв'язанні задач оптимізації параметрів складних технічних систем з вибухонебезпечними об'єктами.

Основні результати дисертаційного дослідження були впроваджені в Гнідинцівському газопереробному заводі, в підрозділах Управління Державної служби України з надзвичайних ситуацій в Чернігівській області та в навчальному процесі Національного університету цивільного захисту України.

Матеріали дисертаційної роботи опубліковано в 15 наукових працях: в 5 статтях у наукових фахових виданнях України (з них 1 стаття у виданні, яке входить до міжнародної наукометричної бази Web of Science та 2 статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus і Ulrich's Periodicals) та 10 тезах доповідей на Міжнародних та Всеукраїнських наукових конференціях.

Ключові слова: мінімізація рівня вибухонебезпеки, надзвичайна ситуація, вибух хмари газоповітряної суміші, оптимізація розміщення.

#### Список публікацій здобувача

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

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

1. Чуб І.А., Новожилова М.В., Матухно В.В. Моделювання надзвичайної ситуації з вибухом хмари газоповітряної суміші. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2017. №3 (42). С. 71-77. (Стаття у міжнародній наукометричній базі Web of Science).

*Здобувачу особисто належить аналіз останніх публікацій, проведення розрахунків та аналіз отриманих результатів.*

2. Чуб І.А., Матухно В.В. Метод мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку шляхом раціонального розміщення обладнання. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2017. Вип. 26. С. 196-202. (Стаття у міжнародній наукометричній базі Index Copernicus та Ulrich's Periodicals).

*Здобувачу особисто належить математична модель оптимізаційної задачі розміщення та загальна схема методу.*

3. Чуб І.А., Матухно В.В. Мінімізація рівня вибухонебезпеки технологічного блоку в умовах вибуху хмари газоповітряної суміші. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2018. Вип. 27. С. 160-168. (Стаття у міжнародній наукометричній базі Index Copernicus та Ulrich's Periodicals).

*Здобувачу особисто належить загальна схема та алгоритмічна реалізація методу розв'язання задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку.*

**Статті у наукових фахових виданнях України:**

4. Чуб І.А., Матухно В.В. Прогнозування наслідків надзвичайної ситуації з вибухом хмари газоповітряної суміші. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2016. Вип. 23. С. 186-191. (Стаття у науковому фаховому виданні України).

*Здобувачу особисто належить методика прогнозування наслідків надзвичайної ситуації з вибухом газоповітряної хмари та розрахунок параметрів вибуху.*

5. Чуб І.А., Матухно В.В. Модель задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки об'єктів з вибухами хмар газоповітряних сумішей. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2016. Вип. 24. С. 137-142. (Стаття у науковому фаховому виданні України).

*Здобувачу особисто належить математична модель задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки об'єкту нафтопереробного підприємства, на якому можливо виникнення надзвичайної ситуації з вибухом хмари газоповітряної суміші.*

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

6. Чуб И.А., Матухно В.В. Размещения пожароопасных объектов с минимизацией негативного экологического влияния аэрозольных выбросов пожара. *Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних*

*підрозділів (теорія та практика):* зб. матеріалів Всеукр. наук.-тех. конф. Ч. 2, м. Харків, НУЦЗУ, 12 березня 2014 р. Харків, 2014. С. 193-195. (Форма участі - очна).

*Здобувачу особисто належить математична модель оптимізаційної задачі розміщення та загальна схема методу.*

7. Чуб І.А., **Матухно В.В.** Розробка критерію кількісної оцінки рівня пожежовибухонебезпеки потенційно небезпечного об'єкту. *Сучасний стан цивільного захисту України: перспективи та шляхи до Європейського простору:* матеріали 17 Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників, м. Київ, ІДУЦЗ, 22-23 вересня 2015 р. Київ, 2015. С. 430-433. (Форма участі - заочна).

*Здобувачу особисто належить розробка структури інтегрального критерію кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки об'єкту та проведення розрахунків.*

8. **Матухно В.В.** Підвищення пожежовибухонебезпеки нафтопереробного комплексу за рахунок оптимального розміщення установок з можливими вибухами газоповітряних сумішей. *Проблеми цивільного захисту: управління, попередження, аварійно-рятувальні та спеціальні роботи:* зб. матеріалів III Всеукр. наук.-практ. конф., м. Харків, НУЦЗУ, 1-2 жовтня 2015 р. Харків, 2015. С. 151-153. (Форма участі - очна).

9. Чуб І.А., **Матухно В.В.** Підвищення пожежовибухонебезпеки об'єктів нафтопереробного комплексу за рахунок оптимального розміщення установок з можливими вибухами газоповітряних сумішей. *Забезпечення пожежної та техногенної безпеки:* матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., м. Харків, НУЦЗУ, 29-30 жовтня 2015 р. Харків, 2015. С. 166-167. (Форма участі - очна).

*Здобувачу особисто належить математична модель задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки об'єкту нафтопереробного підприємства, на якому можливо виникнення надзвичайної ситуації з вибухом хмари газоповітряної суміші.*

10. Чуб І.А., **Матухно В.В.** Оцінка рівня техногенної небезпеки потенційно небезпечного промислового об'єкта. *Обеспечение безопасности*



*жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сб. материалов X Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых: курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов): В 2-х ч.Ч.1. г. Минск, КИИ МЧС РБ, 7-8 апреля 2016 г. Минск, 2016.С. 68-69. (Форма участі - заочна).*

*Здобувачу особисто належить розробка структури інтегрального критерію кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки об'єкту та проведення розрахунків.*

11. Чуб І.А., Матухно В.В. Оцінка рівня пожежовибухонебезпеки потенційно-небезпечного об'єкту. *Забезпечення промислової та цивільної безпеки в Україні та світі: матеріали I Міжнар. наук.-практ. конф., м. Луцьк, РВВ Луцького НТУ, 19-21 травня 2016 р. Луцьк, 2016. С. 56-58. (Форма участі - заочна).*

*Здобувачу особисто належить розробка структури інтегрального критерію кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки об'єкту та проведення розрахунків.*

12. Чуб І.А., Матухно В.В. Оцінка впливу надзвичайної ситуації з вибухом хмари газоповітряної суміші. *Проблеми пожежної безпеки: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, НУЦЗУ, 28-29 жовтня 2016 р. Харків, 2016. С. 146-148. (Форма участі - очна).*

*Здобувачу особисто належить методика прогнозування наслідків надзвичайної ситуації з вибухом газоповітряної хмари та розрахунок параметрів вибуху.*

13. Чуб І.А., Матухно В.В. Метод мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку газопереробного підприємства. *Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку: матеріали 19 Всеукр. наук.-практ. конф., м. Київ, ІДУЦЗ, 10-11 жовтня 2017 р. Київ, 2017. С. 466-469. (Форма участі - заочна).*

*Здобувачу особисто належить загальна схема та алгоритмічна реалізація методу розв'язання задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку.*

14. **Матухно В.В.** Мінімізація рівня вибухонебезпеки технологічного блоку за рахунок оптимального розміщення обладнання. *Пожезна безпека: проблеми та перспективи*:зб. тез доповідей Всеукр. наук.-практ. конф., м. Харків, НУЦЗУ, 1-2 березня 2018 р. Харків, 2018. С. 182-184. (Форма участі - очна).

15. **Матухно В.В.** Визначення характеристик хмари газоповітряної суміші при надзвичайній ситуації з викидом газоподібної вибухонебезпечної речовини. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту*: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених, м. Харків НУЦЗУ, 29 березня 2018 р. Харків, 2018р. С. 280. (Форма участі - очна).

## ABSTRACT

Matukhno V.V. Reducing the explosion hazard of oil-gas-refineries (at the design stage) in emergencies with explosions of clouds of gas-air mixtures. – Qualifying research paper on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences (doctor of philosophy) in specialty 21.02.03 "Civil defense" – National University of Civil Defense of Ukraine, State Emergency Service of Ukraine, Kharkiv, 2018.

In the dissertation the decision of important scientific-practical problem in the field of civil defense concerning development of quantitative estimation of the level of explosion hazard of the technological unit of the gas refinery at the design stage under the conditions of a possible emergency with explosion of the gas-air mixture drift cloud and the method of minimization of the level by optimal placement of the explosive equipment of the block is proposed.

To achieve the purpose of the dissertation quantitative methods for determining the parameters of a gas-air mixture cloud explosion, methods of mathematical modeling of the explosion impact on neighboring technological unit objects, optimization methods of geometrical design theory, nonlinear mathematical programming, methods of probability theory, reliability theory have been performed.

The mathematical model to minimize the level of explosion hazard of the gas refinery technological unit at the design stage under the conditions of an emergency situation with the explosion of the gas-air mixture drifting cloud has been developed.

The quantitative criterion for assessing the level of explosion hazard of the gas refinery technological unit at the design stage in an emergency situation with the explosion of the gas-air mixture drifting cloud has been improved by taking into account the characteristics of the explosive substances, the mode of explosion, the impact of the explosion on the equipment of the block and features of the development of the territory.

In the dissertation the method of minimizing the level of explosion hazard of the technological unit of the gas refinery at the design stage in an emergency situation with the explosion of the gas-air mixture drifting cloud by optimally placing the explosive equipment of the block has been further developed.

The thesis analyzes the statistical data on emergencies with explosions of clouds of gas-air mixture, which arose as a result of the destruction of the technological equipment of the gas refinery. The analysis of the peculiarities of man-made emergency situations with explosions of gas-air mixture clouds on the gas-refining enterprise is carried out. To this end typical schemes of analysis of probable models of occurrence and development of emergency situations with equipment depressurization and explosion of cloud of gas-air mixture have been analyzed, and the stages and characteristics of the development of emergency situations with the release of explosive substances have been analyzed.

The analysis of the state of the normative-legal base in the field of industrial safety of Ukraine and foreign countries is fulfilled.

On the basis of the study of known scientific references, an analytical review of the state-of-art of the problem of the development of methods and means for quantitative assessment and minimization of the level of explosion hazard of technological units of the gas refinery at the design stage in conditions of emergency situations with explosions of clouds of gas-air mixtures has been carried out.

Available methods of quantitative estimation of the level of explosion and fire safety of industrial objects, as well as methods of its reduction, are analyzed.

In the dissertation the optimization problem of reducing the explosion hazard of the technological unit of the gas refinery in the conditions of an emergency situation with the formation and explosion of the cloud of the gas-air mixture through the optimal placement of technological equipment in a given area has been carried out. Placement is carried out taking into account the explosion mode, the characteristics of explosive substances, as well as the ability to drift the cloud of gas-air mixtures under the influence of wind.

The integral and partial criteria of the technological unit explosion hazard evaluation of the have been developed, the concept "explosion center of the technological unit" is introduced and defined.

The objective of the optimization problem of the placement of explosive equipment of the block, in its function as an integral criterion for assessing the explosion hazard of a technological unit, is investigated.

The system of constraints of the placement optimization problem for the explosive equipment of the block, which in the general case includes geometric and technological conditions, has been investigated. The formalization of geometric constraints on the base of  $\Phi$ -functions apparatus is carried out.

In the dissertation the solution numerical method for the optimization problem of minimizing the level of explosion hazard of the technological unit of the gas refinery in the conditions of an emergency situation with the explosion of the cloud of gas-air mixture that arose as a result of the destruction of the equipment of the block was developed.

Minimization of the level of explosion hazard of a technological unit is accomplished by optimizing the placement of equipment within the block with a given block orientation relative to the direction of the most probable surface wind.

In the dissertation the numerical implementation of the method of minimizing the level of explosion hazard of the technological unit in the conditions of explosion of the cloud of gas-air mixture at the expense of optimal placement of equipment was performed.

The implementation of the method is carried out for a model example of a technological unit consisting of four objects and a technological unit of the gas processing plant – a typical absorption-gas-friction plant. Application of the method developed in the work allowed to reduce the level of explosion for the model example by 29%, and for the typical absorption-gas-friction equipment – by 64.3% for the conditions of the considered variant of the initial layout of the technological unit.

The scientific results of the dissertation work are the further development of constructive apparatus for solving the problems of reducing the explosion hazard of technological units of the gas refinery in the conditions of emergency situations with explosions of drifting clouds of gas-air mixture by optimizing the location of explosive equipment of the block.

The mathematical model and the method of optimal placement of explosive equipment of the technological unit can be used by research and design organizations at the stages of construction of general plans of enterprises of the gas-refining industry of Ukraine, which will minimize the level of their explosion hazard and reduce the probability of destruction of equipment in emergency situations with explosions of gas-air mixtures drifting clouds.

Application of the proposed quantitative criterion for assessing the level of explosion hazard of the technological unit of the gas refinery will increase the accuracy of its determination by taking into account the cloud drift of the gas-air mixture, reducing the concentration of explosive substance in the cloud due to the scattering process, as well as the characteristics of explosive substances, explosion mode and features of the development of the territory.

The results of the work can be used in drawing up plans for liquidation of emergency situations of the gas refinery to determine the parameters of emergency situations with explosions of drifting clouds of gas-air mixture and quantitative assessment of the impact of the explosion on technological equipment, installations, buildings and facilities of the enterprise.

The mathematical model and method of minimizing the level of explosion hazard of a technological unit of a gas refinery may be used in solving problems of optimization of parameters of complex technical systems with explosive objects.

The main results of the dissertation research were introduced at the Gnidintsy gas processing plant (Varva, Chernihiv region), in the departments of the State Service of Ukraine for Emergency Situations in the Chernihiv region and the National University of Civil Protection of Ukraine.

The materials of the dissertation are published in 15 scientific papers: 5 works in the scientific professional editions of Ukraine (1 of them in the publication, which is part of the international scientometric base of Web of Science, and 2 papers in the editions included to the international scientometric bases Index Copernicus and Ulrich's Periodicals) and 10 materials at International and All-Ukrainian scientific conferences.

Keywords: minimization of explosion level, emergency situation, explosion of cloud of gas-air mixture, optimization of placement.

### **List of publications of degree-seeker**

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

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

1. Chub I.A., **Matukhno V.V.** (2017). Modeliuvannia nadzvychnoi sytuatsii z vybukhom khmary hazopovitrianoi sumishi [Simulation of an emergency situation with the explosion of a cloud of gas-air mixture]. *Radioelektronika, informatyka, upravlinnia - Radio electronics, computer science, management*, 3(42), pp 71-77 [in Ukrainian]. (The article in the international science-based database of Web of Science).

*The analysis of recent publications, calculations and analysis of the results is belongs to the degree-seeker in particular*

2. Chub I.A., **Matukhno V.V.** (2017). Metod minimizatsii rivnia vybukhonebezpeky tekhnolohichnoho bloku shliakhom ratsionalnoho rozmishchennia obladnannia [Method of minimization of the level of explosion hazard of the technological unit through the efficient placement of equipment]. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii - Emergencies problems*, issue 26, pp. 196-202 [in Ukrainian]. (The article in the international science-based database Index Copernicus and Ulrich's Periodicals).

*The mathematical model of optimization placement problem and general scheme of the method is belongs to the degree-seeker in particular.*

3. Chub I.A., **Matukhno V.V.** (2018). Minimizatsiia rivnia vybukhonebezpeky tekhnolohichnoho bloku v umovakh vybukhu khmary hazopovitrianoi sumishi [Minimization of the level of explosion hazard of a technological unit in conditions of explosion of a cloud of gas-air mixture]. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii - Emergencies problems*, issue 27, pp. 160-168 [in Ukrainian]. (The article in the international science-based database Index Copernicus and Ulrich's Periodicals).

*The general scheme and algorithmic realization of the method of solving the problem of minimizing the level of explosion hazard of a technological unit is belongs to the degree-seeker in particular*

**Articles in scientific professional editions of Ukraine:**

4. Chub I.A., **Matukhno V.V.** (2016). Prohnozuvannia naslidkiv nadzvychainoi sytuatsii z vybukhom khmary hazopovitrianoi sumishi [Forecasting the consequences of an emergency with an explosion of a cloud of gas-air mixture]. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii - Emergencies problems*, issue 23, pp. 186-191 [in Ukrainian].

*The method of forecasting the consequences of an emergency situation with the explosion of the gas cloud and calculating the parameters of the explosion belongs to the degree-seeker in particular.*

5. Chub I.A., **Matukhno V.V.** (2016). Model zadachi minimizatsii rivnia vybukhonebezpeky ob'ektiv z vybukhamy khmar hazopovitrianykh sumishei [Model of the task of minimizing the explosion hazard of objects with explosions of clouds of gas-air mixtures]. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii - Emergencies problems*, issue 24, pp. 137-142 [in Ukrainian].

*The mathematical model of the task of minimizing the level of explosion of the object of the refinery, on which the emergence of an emergency situation with the explosion of the cloud of gas-air mixture belongs to the degree-seeker in particular.*



**Scientific works certifying the practical of the dissertation materials:**

6. Chub I.A., **Matukhno V.V.** (2014). Razmeshcheniya pozharoopasnykh ob'ektov s minimizatsiyei negativnogo ekhologicheskogo vliyaniya aehrozol'nykh vybrosov pozhara [Placement of fire hazardous objects with minimization of negative environmental impact of aerosol fire releases]. Zbirnyk materialiv Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii: «*Naukove zabezpechennia diialnosti operatyvno-riatuvalnykh pidrozdiliv (teoriiia ta praktyka) Chastyna 2*» - Collection of materials of the All-Ukrainian scientific and technical conference: «*Scientific support of operations and rescue units' activities (theory and practice) Part 2*», Kharkov, NUCZU, March 12, 2014, pp. 193-195 [in Ukrainian]. (Form of participation - intramural).

*The mathematical model of optimization placement problem and general scheme of the method is belongs to the degree-seeker in particular.*

7. Chub I.A., **Matukhno V.V.** (2015). Rozrobka kryteriiu kilkisnoi otsinky rivnia pozhezhovybukhonebezpeky potentsiino nebezpechnoho ob'iektu [Development of a criterion for quantification of the level of fire hazard of a potentially dangerous object]. Materialy 17 Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii riatuvalnykh: «*Suchasnyi stan tsyvilnoho zakhystu Ukrainy: perspektyvy ta shliakhy do Yevropeiskoho prostoru*» - Materials of the 17th All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Rescuers: «*The Current State of Civil Protection of Ukraine: Prospects and Ways to the European Space*», Kyiv, IPACZ, September 22-23, 2015, pp 430-433 [in Ukrainian]. (Form of participation - extramural).

*The development of the structure of the integral criterion for quantitative estimation of the level of explosion hazard of the object and conducting of calculations belongs to the degree-seeker in particular.*

8. **Matukhno V.V.**(2015) Pidvyshchennia pozhezhovybukhobezpeky naftopererobnoho kompleksu za rakhunok optymalnoho rozmishchennia ustanovok z mozhlyvymy vybukhamy hazopovitrianykh sumishei [Increasing the fire safety of the oil refining complex due to the optimal placement of installations with

possible explosions of gas-air mixtures]. Zbirnyk materialiv III Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii: «*Problemy tsyvilnoho zakhystu: upravlinnia, poperedzhennia, avariino-riatuvalni ta spetsialni roboty*» - Collection of Materials of the Third All-Ukrainian Scientific and Practical Conference: «*Problems of Civil Protection: management, prevention, rescue and special work*», Kharkov, NUCZU, October 1-2, 2015, pp. 151-153 [in Ukrainian]. (Form of participation - intramural).

9. Chub I.A., **Matuhno V.V.** (2015). Pidvyshchennia pozhezhovybukhobezpeky ob'ektiv naftopererobnoho kompleksu za rakhunok optimalnoho rozmishchennia ustanovok z mozhyvymy vybukhamy hazopovitrianykh sumishei [Increase fire safety of objects of the oil-refining complex due to the optimal placement of installations with possible explosions of gas-air mixtures]. Materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii: «*Zabezpechennia pozhezhoi ta tekhnogennoi bezpeky*» - Materials of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference: «*Providing of fire and technogenic safety*», Kharkov, NUCZU, October 29-30, 2015, pp. 166-167 [in Ukrainian]. (Form of participation - intramural).

*The mathematical model of the task of minimizing the level of explosion of the object of the refinery, on which the emergence of an emergency with the explosion of the cloud of gas-air mixture belongs to the degree-seeker in particular.*

10. Chub I.A., **Matukhno V.V.** (2016). Ocenka urovnya tekhnogennoj opasnosti potencial'no opasnogo promyshlennogo ob"ekta [Assessment of the level of technogenic danger of a potentially hazardous industrial facility]. Sbornik materialov X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoi konferencii molodyh uchenykh: kursantov (studentov), slushatelej magistratury i ad"yunktov (aspirantov): V 2-h ch. CH.1: «*Obespechenie bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti: problemy i perspektivy*» - Collection of materials of the X International Scientific Practical Conference young scientists: cadets (students), graduate students and adjuncts (graduate students): In 2 parts, Part 1: «*Ensuring health and safety:*

*problems and prospects*», Minsk, KII of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, April 7-8, 2016, pp. 68-69 [in Russian]. (Form of participation - extramural).

*The development of the structure of the integral criterion for quantitative estimation of the level of explosion hazard of the object and conducting of calculations belongs to the degree-seeker in particular.*

11. Chub I.A., **Matukhno V.V.** (2016). Otsinka rivnia pozhezhovybukhonebezpeky potentsiino-nebezpechnoho ob'ektu [Estimation of fire hazard level of potentially dangerous object]. Materialy I Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii: «Zabezpechennia promyslovoi ta tsyvilnoi bezpeky v Ukraini ta sviti» - Materials of the 1st International Scientific and Practical Conference: «Ensuring industrial and civil security in Ukraine and in the world», Lutsk, May 19-21, 2016, pp. 56-58 [in Ukrainian]. (Form of participation - extramural).

*The development of the structure of the integral criterion for quantitative estimation of the level of explosion hazard of the object and conducting of calculations belongs to the degree-seeker in particular.*

12. Chub I.A., **Matuhno V.V.** (2016). Otsinka vplyvu nadzvychainoi sytuatsii z vybukhom khmary hazopovitrianoi sumishi [Assessment of the impact of the emergency with the explosion of the cloud of gas-air mixture]. Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii: «Problemy pozhezhnoi bezpeky» - Materials of the International Scientific and Practical Conference: «Problems of fire safety», Kharkov, NUCZU, October 28-29, 2016, pp. 146-148 [in Ukrainian] (Form of participation - intramural).

*The method of forecasting the consequences of an emergency with the explosion of the gas cloud and calculating the parameters of the explosion belongs to the degree-seeker in particular.*

13. Chub I.A., **Matukhno V.V.** (2017). Metod minimizatsii rivnia vybukhonebezpeky tekhnolohichnoho bloku hazopererobnoho pidpriemstva [Method of minimization of the level of explosion hazard of the technological unit

of the gas processing enterprise]. Materialy 19 Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii: «*Suchasnyi stan tsyvilnoho zakhystu Ukrainy ta perspektyvy rozvytku*» - Materials of the 19th All-Ukrainian Scientific and Practical Conference: «*Current State of Civil Protection of Ukraine and Development Prospects*», Kyiv, IPACZ, October 10-11, 2017, pp. 466-469 [in Ukrainian]. (Form of participation - extramural).

*The general scheme and algorithmic realization of the method of solving the problem of minimizing the level of explosion hazard of a technological unit is belongs to the degree-seeker in particular.*

14. **Matuhno V.V.** (2018). Minimizatsiia rivnia vybukhonebezpeky tekhnolohichnoho bloku za rakhunok optymalnoho rozmishchennia obladnannia [Minimization of the level of explosion hazard of the technological unit due to the optimal placement of equipment]. Zbirnyk tez dopovidei Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii: «*Pozhezhna bezpeka: problemy ta perspektyvy*» - Collection of Abstracts of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference: Fire Safety: «*Problems and Prospects*», Kharkov, NUCZU, March 1-2, 2018, pp. 182-184 [in Ukrainian]. (Form of participation - intramural).

15. **Matukhno V.V.** (2018). Vyznachennia kharakterystyk khmary hazopovitrianoi sumishi pry nadzvychainii sytuatsii z vykydom hazopodibnoi vybukhonebezpechnoi rehovyny [Determination of the characteristics of the cloud of a gas-air mixture in an emergency with the release of a gaseous explosive substance]. Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii molodykh uchenykh: «*Problemy ta perspektyvy zabezpechennia tsyvilnoho zakhystu*» - Materials of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists: «*Problems and Perspectives of Providing Civil Protection*», Kharkov, NUCZU, March 29, 2018, p. 280 [in Ukrainian]. (Form of participation - intramural).

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	25
ВСТУП.....	26
1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	33
1.1. Надзвичайні ситуації з вибухами на технологічному обладнанні ГНПП.....	33
1.2. Особливості техногенних НС з вибухами на ГНПП.....	37
1.3. Аналіз вітчизняної та закордонної нормативно-правової бази в сфері промислової безпеки.....	46
1.3.1. Міжнародні правові акти у сфері промислової безпеки.....	47
1.3.2. Правові акти у сфері промислової безпеки СНД.....	50
1.3.3. Правові акти у сфері промислової безпеки України.....	52
1.4. Аналіз методів оцінки рівня вибухопожежонебезпеки газонафтопереробних об'єктів і методів його мінімізації.....	55
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 1.....	62
2. ПОСТАНОВКА ОПТИМІЗАЦІЙНОЇ ЗАДАЧІ МІНІМІЗАЦІЇ РІВНЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕКИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО БЛОКУ ГНПП.....	64
2.1. Постановка оптимізаційної задачі.....	64
2.2. Визначення екзогенних параметрів моделі (2.3).....	66
2.2.1. Ідентифікація функції мети.....	67
2.2.1.1. Визначення часткових критеріїв $\Lambda_i$ .....	67
2.2.1.2. Визначення вагових функцій $\lambda_i$ .....	72
2.2.1.3. Визначення енергетичного центру вибухонебезпеки технологічного блоку.....	77
2.2.1.4. Розрахунок параметрів вибуху хмари ГПС.....	81
2.2.2. Ідентифікація обмежень оптимізаційної задачі.....	84
2.2.2.1. Формалізація геометричних обмежень.....	86

2.2.3 Особливості оптимізаційної задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку.....	87
2.2.4. Зв'язок задачі мінімізації наслідків НС з вибухом хмари ГПС на об'єкті та оптимізаційної задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки об'єкту.....	90
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 2.....	93
3. МЕТОД РОЗВ'ЯЗАННЯ ОПТИМІЗАЦІЙНОЇ ЗАДАЧІ МІНІМІЗАЦІЇ РІВНЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕКИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО БЛОКУ.....	95
3.1. Загальна схема методу розв'язку оптимізаційної задачі.....	95
3.1.1. Визначення початкового варіанту розміщення об'єктів у межах технологічного блоку (Етап 1).....	97
3.1.2. Визначення початкових даних для оптимізації (Етап 2).....	98
3.2. Розрахунок коефіцієнтів $k_{ij}$ , $\alpha_{ij}$ та часткових критеріїв $\Lambda_i$ для об'єктів $S_i$ ( $i=1,2,\dots, I$ ) і інтегрального критерію $\Lambda$ . (Етап 3).....	108
3.3. Визначення вектору розміщення об'єктів, що відповідає локальному мінімуму цільового критерію оптимізаційної задачі при заданій орієнтації блоку відносно сторін світу (Етап 4).....	109
3.3.1. Визначення послідовності зміни параметрів розміщення об'єктів (крок 1).....	111
3.3.2. Формування області $W_k^p$ допустимих параметрів розміщення рухомого об'єкта $S_k$ на $p$ -ой ітерації (крок 2).....	112
3.3.3. Визначення нових параметрів розміщення $S_k$ (Крок 3–6).....	113
3.4 Перебір локальних мінімумів (Етап 5).....	119
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 3.....	121
4. РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ МІНІМІЗАЦІЇ РІВНЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕКИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО БЛОКУ.....	122
4.1. Характеристика технологічного блоку та постановка оптимізаційної задачі.....	122
4.2. Визначення початкових даних оптимізаційної задачі.....	127

4.2.1. Визначення початкового розміщення об'єктів (етап 1).....	127
4.2.2. Розрахунок початкових характеристик хмар ГПС (етап 2).....	127
4.2.3. Розрахунок концентраційного поля вибухонебезпечної речовини в хмарах ГПС для початкового варіанту розміщення об'єктів (етап 2).....	128
4.2.3.1. Надзвичайна ситуація на об'єкті $S_1$ .....	129
4.2.3.2. Надзвичайна ситуація на об'єктах $S_2$ та $S_3$ .....	130
4.2.3.3. Розрахунок маси вибухонебезпечної речовини хмари ГПС, що приймає участь у вибуху.....	131
4.2.4. Розрахунок характеристик вибухів хмар ГПС для початкового варіанту розміщення об'єктів (етап 2).....	134
4.2.5. Розрахунок коефіцієнтів $k_{ij}$ , $\alpha_{ij}$ та інтегрального критерію $\Lambda$ для початкового варіанту $S^0(x_1^0, y_1^0, \dots, x_4^0, y_4^0)$ розміщення об'єктів (Етап 3).....	139
4.3. Визначення вектору параметрів розміщення об'єктів, що відповідає локальному мінімуму цільового критерію оптимізаційної задачі при заданій орієнтації блоку відносно сторін світу (етап 4).....	141
4.3.1. Вибір об'єкту, що першим змінює своє положення.....	141
4.3.2. Визначення області допустимих розв'язків оптимізаційної задачі (2.42).....	142
4.3.3. Визначення нових параметрів розміщення об'єкту $S_k$ .....	147
4.4. Перебір локальних мінімумів (Етап 5).....	153
4.5. Зниження рівня вибухонебезпеки абсорбційно-газофракціонуючої установки газонафтопереробного підприємства.....	157
4.5.1. Постановка оптимізаційної задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки АГФУ.....	161
4.5.2. Визначення початкових даних для розв'язання оптимізаційної задачі (4.38) для АГФУ.....	163

4.5.3. Визначення множини локальних мінімумів оптимізаційної задачі та їх перебір.....	164
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 4.....	168
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	170
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	173
ДОДАТОК А.....	188
ДОДАТОК Б.....	193



## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АГФУ	– абсорбційно-газофракціонуюча установка;
ВНР	– вибухонебезпечна речовина;
ГПС	– газоповітряна суміш;
ГНПП	– газонафтопереробне підприємство;
ЕП	– епіцентр вибуху;
ЕЦ	– енергетичний центр вибухонебезпеки технологічного блоку;
ЛТО	– лінійно-технологічне обладнання;
МНК	– метод найменших квадратів;
НС	– надзвичайна ситуація;
ПГФ	– парогазова фаза;
РФ	– рідка фаза.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Газонафтопереробні підприємства (ГНПП) є одними з найбільш небезпечних виробничих об'єктів промисловості України, на яких утворюються, використовуються, переробляються, зберігаються, транспортуються у великій кількості небезпечні речовини, і, як правило, вони розташовуються поблизу великих населених пунктів. Надзвичайні ситуації (НС) на цих об'єктах характеризуються великими об'ємами викидів вибухонебезпечних речовин, утворенням хмар газоповітряних сумішей (ГПС), вибухами та пожежами, які приводять до руйнування або пошкодження будівель, споруд, технологічних установок.

Зростаюче в останні роки число НС, пов'язаних з вибухами, на газонафтопереробних підприємствах в Україні [16, 17] обумовлено, з одного боку, прогресуючим зношуванням основних фондів підприємств та, з другого боку, зменшенням кількості коштів, що виділяються на розвиток систем техногенної безпеки об'єктів. Для подолання ситуації, що склалася, необхідно: по-перше, забезпечити прийнятний рівень вибухонебезпеки об'єктів, по-друге – передбачити зниження ступеня впливу наслідків можливого вибуху. Ситуація ускладнюється тим, що існуюча структура нормативної бази України в галузі техногенної безпеки не дозволяє достовірно оцінити рівень вибухонебезпеки газонафтопереробних підприємств.

Діюча нормативна база в Україні майже не містить необхідних практичних рекомендації щодо визначення рівня та забезпечення вибухобезпеки об'єктів газонафтопереробки. При цьому слід відмітити складність та трудомісткість розрахункових методик, відсутність даних, що дають кількісну оцінку рівню вибухонебезпеки технологічного обладнання.

У зв'язку з цим особливої важливості набуває задача аналізу та усунення недоліків наявних методів кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки об'єктів газонафтопереробної галузі та розробка методів його зниження на

основі математичного моделювання НС на газонафтопереробних підприємствах України та комплексного аналізу їх кількісних характеристик. При цьому домінуючу роль повинна займати превентивна спрямованість задач зниження рівня вибухонебезпеки.

Одним із заходів, спрямованих на попередження розвитку НС на газонафтопереробних підприємствах, є поділ технологічної схеми на окремі технологічні блоки [18]. Але при існуючих принципах розміщення технологічного обладнання даний захід є неефективним, оскільки вибух всередині технологічного блоку хмари ГПС, яка виникла внаслідок НС з руйнуванням обладнання, призводить до появи вражаючих факторів критичної величини.

У зв'язку з цим при розробці генеральних планів ГНПП необхідним є такий підхід до розміщення технологічного обладнання в блоці, при якому зводиться до мінімуму вплив вражаючих факторів на сусіднє обладнання в разі виникнення НС.

Таким чином, розробка кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП в умовах НС з вибухом хмари ГПС та методу мінімізації цього рівня шляхом оптимального розміщення вибухонебезпечного обладнання є актуальною науково-практичною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано на кафедрі пожежної профілактики в населених пунктах НУЦЗ України відповідно до Загальнодержавної цільової соціальної програми захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру на 2012-2016 роки (Розпорядження КМУ від 27 квітня 2011 року № 368-р) у рамках науково-дослідної роботи «Підвищення пожежовибухобезпеки об'єктів з можливими викидами хмар газоповітряних сумішей» (№ ДР 0117U002004), в якій здобувач був відповідальним виконавцем.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є розробка кількісної оцінки та методу мінімізації рівня вибухонебезпеки

технологічного блоку газонафтопереробного підприємства (на етапі проектування) в умовах можливої надзвичайної ситуації з вибухом дрейфуючої хмари газоповітряної суміші шляхом оптимізації розміщення вибухонебезпечного технологічного обладнання.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі були поставлені та розв'язані наступні наукові задачі:

1. Проведено аналіз літературних джерел щодо моделей та методів визначення та зниження рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП (на етапі проектування) в умовах НС з вибухом дрейфуючої хмари ГПС.

2. Визначено структуру критерію кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП в умовах НС з вибухом дрейфуючої хмари ГПС з урахуванням особливостей забудови території, режиму вибуху, впливу вибуху на обладнання блоку та характеристик вибухонебезпечних речовин.

3. Побудовано математичну модель задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП (на етапі проектування) в умовах НС з вибухом дрейфуючої хмари ГПС та проаналізовано її особливості.

4. Доведено еквівалентність задачі мінімізації наслідків НС з вибухом дрейфуючої хмари ГПС у технологічному блоці ГНПП та оптимізаційної задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП.

5. Розроблено метод розв'язання задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП (на етапі проектування) в умовах НС з вибухом дрейфуючої хмари ГПС шляхом оптимального розміщення вибухонебезпечного обладнання блоку.

6. Виконано практичну реалізацію методу мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП (на етапі проектування) в умовах НС з вибухом дрейфуючої хмари ГПС на прикладі оптимального розміщення вибухонебезпечного обладнання модельного технологічного блоку та типової абсорбційно-газофракціонуючої установки (АГФУ).

**Об’єкт дослідження** – вибухонебезпека технологічного блоку ГНПП, на якому можливі НС з вибухами дрейфуючих хмар ГПС.

**Предмет дослідження** – методи зниження рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП (на етапі проектування), в якому можливі НС з вибухами дрейфуючих хмар ГПС.

**Методи дослідження.** Для розв’язання поставлених наукових задач в дисертаційному дослідженні використовувалися кількісні методи визначення параметрів вибуху, методи математичного моделювання впливу вибуху на сусідні об’єкти технологічного блоку, для розробки критерію кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП в умовах НС з вибухом дрейфуючої хмари ГПС використовувалися теорія ймовірностей та теорія надійності, для розв’язання задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП (на етапі проектування) в умовах НС з вибухом дрейфуючої хмари ГПС застосовувалися оптимізаційні методи теорії геометричного проектування та нелінійного математичного програмування.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У дисертаційній роботі розв’язано важливу науково-практичну задачу в галузі цивільного захисту – розробку кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП (на етапі проектування) в умовах можливої НС з вибухом дрейфуючої хмари ГПС та методу мінімізації цього рівня шляхом оптимального розміщення вибухонебезпечного обладнання блоку.

При виконанні дисертації отримано нові наукові результати:

1. Вперше розроблено математичну модель задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку газонафтопереробного підприємства (на етапі проектування) в умовах надзвичайної ситуації з вибухом хмари газоповітряної суміші з урахуванням її дрейфу.

2. Вдосконалено кількісний критерій оцінки рівня вибухонебезпеки технологічного блоку газонафтопереробного підприємства (на етапі проектування) в умовах надзвичайної ситуації з вибухом дрейфуючої хмари газоповітряної суміші шляхом урахування характеристик вибухонебезпечних

речовин, режиму вибуху, впливу вибуху на обладнання блоку та особливостей забудови території.

3. Отримав подальший розвиток метод мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку газонафтопереробного підприємства (на етапі проектування) в умовах надзвичайної ситуації з вибухом дрейфуючої хмари газоповітряної суміші за рахунок оптимального розміщення вибухонебезпечного обладнання блоку, що дозволило знизити рівень вибухонебезпеки типової абсорбційно-газофракціонуючої установки ГНПП на 64,3 % без порушень технологічного процесу.

**Практичне значення отриманих результатів.** Наукові результати дисертаційної роботи є подальшим розвитком конструктивних засобів розв'язання задач зниження вибухонебезпеки технологічних блоків ГНПП в умовах НС з вибухами дрейфуючих хмар ГПС шляхом оптимізації розміщення вибухонебезпечного обладнання блоку.

Математична модель та метод оптимального розміщення вибухонебезпечного обладнання технологічного блоку можуть використовуватися науково-дослідними, проектно-конструкторськими організаціями на етапах побудови генеральних планів підприємств газонафтопереробної галузі України, що дозволить мінімізувати рівень їх вибухонебезпеки та знизити ймовірність руйнування обладнання в умовах НС з вибухами дрейфуючих хмар ГПС.

Застосування запропонованого в роботі кількісного критерію для оцінки рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП дозволить підвищити точність його визначення шляхом врахування дрейфу хмари ГПС, зниження концентрації вибухонебезпечної речовини у хмарі завдяки процесу розсіяння, а також характеристик вибухонебезпечних речовин, режиму вибуху та особливостей забудови території.

Результати роботи можуть бути використані при складанні планів ліквідації аварійних ситуацій (ПЛАС) ГНПП для визначення параметрів НС з

вибухами дрейфуючих хмар ГПС та кількісної оцінки впливу вибуху на технологічне обладнання, установки, будівлі та споруди підприємства.

Математична модель та метод мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП можуть застосовуватися при розв'язанні задачі мінімізації наслідків НС з вибухом хмари ГПС у технологічному блоці ГНПП.

Основні результати дисертаційного дослідження були впроваджені на Гнідинцівському газопереробному заводі (м. Варва Чернігівської області) при складанні проекту абсорбційно-газофракціонуючої установки, в підрозділах Управління Державної служби України з надзвичайних ситуацій в Чернігівській області при розробці ПЛАС об'єктів газонафтопереробки та в навчальному процесі Національного університету цивільного захисту України.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором особисто і наведені в роботах [1–15].

В наукових роботах [1–7, 9–13], що опубліковані у співавторстві, особисто здобувачу належать: в роботі [1] – аналіз останніх публікацій, проведення розрахунків, аналіз отриманих результатів; в роботах [2, 6] – математична модель оптимізаційної задачі розміщення, загальна схема методу; в роботах [3, 13] – загальна схема та алгоритмічна реалізація методу розв'язання задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку; в роботах [4, 12] – методика прогнозування наслідків надзвичайної ситуації з вибухом газоповітряної хмари, розрахунок параметрів вибуху; в роботі [5, 9] – математична модель задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки об'єкту нафтопереробного підприємства, на якому можливо виникнення надзвичайної ситуації з вибухом хмари газоповітряної суміші; в роботах [7, 10, 11] – розробка структури інтегрального критерію кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки об'єкту, проведення розрахунків.

**Апробація результатів дисертаційного дослідження.** Основні

результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: Всеукраїнській науково-практичній конференції «Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів (теорія та практика)» (Харків, 2014); 17 Всеукраїнській науково-практичній конференції рятувальників «Сучасний стан цивільного захисту України: перспективи та шляхи до Європейського простору» (Київ, 2015); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Забезпечення пожежної та техногенної безпеки» (Харків, 2015); I Міжнародній науково-практичній конференції «Забезпечення промислової та цивільної безпеки в Україні та світі» (Луцьк, 2016); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми пожежної безпеки «Fire Safety Issues» (Харків, 2016); науково-практичному семінарі «Профілактика, попередження та ліквідація надзвичайних ситуацій» (Харків, 2017); 19 Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку» (Київ, 2017); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Пожежна безпека: проблеми та перспективи» (Харків, 2018); Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту» (Харків, 2018); наукових семінарах НУЦЗ України (2015-2018).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 15 наукових праць: 5 статей у наукових фахових виданнях України (з них 1 стаття у виданні, яке входить до міжнародної наукометричної бази Web of Science та 2 статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus і Ulrich's Periodicals) та 10 тез доповідей на Міжнародних та Всеукраїнських наукових конференціях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота загальним об'ємом 196 сторінок складається з анотації, змісту, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел зі 139 найменувань і 2 додатків, містить 33 рисунки, з них 1 рисунок на окремій сторінці та 29 таблиць.



## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

В даному розділі виділено та проаналізовано основні групи наявних в науковій літературі публікацій з тематики дисертаційної роботи і суміжних напрямків досліджень.

Проаналізовано статистичні дані щодо НС з вибухами хмар ГПС, які утворилися в наслідок руйнування технологічного обладнання ГНПП. Проведено аналіз особливостей техногенних НС з вибухами хмар ГПС на ГНПП, розглянуто типові схеми аналізу ймовірних моделей виникнення та розвитку НС з розгерметизацією обладнання і вибухом хмари ГПС, проаналізовано стадії і характеристики розвитку НС з викидом вибухонебезпечної речовини.

Проведено аналіз стану нормативно-правової бази в сфері промислової безпеки України і зарубіжних країн.

На основі вивчення літературних джерел проведено аналітичний огляд сучасного стану проблеми розробки методів та засобів кількісної оцінки і мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічних блоків ГНПП (на етапі проектування) в умовах НС з вибухами хмар ГПС.

Проаналізовано наявні методи кількісної оцінки рівня вибухопожежонебезпеки виробничих об'єктів, а також методи його зниження.

Матеріали розділу викладено в роботах автора [4, 5, 9, 10].

#### 1.1 Надзвичайні ситуації з вибухами на технологічному обладнанні ГНПП

За останні роки в світі було зареєстровано велику кількість НС з вибухами, що сталися на ГНПП. У таблиці 1.1 наведено приклади

статистичних даних по НС з вибухами хмар ГПС на підприємствах з переробки вуглеводневої сировини різних країн [19, 20].

Таблиця 1.1 – Статистичні дані щодо НС з вибухами хмар ГПС на ГНПП різних країн за 2000-2015 рр.

Місце НС	Характер НС	Маса викиду, т	Кількість загиблих	Кількість постраждалих
ФРН, Людвигсхафен	Вибух хмари бутилену	20	57	439
ФРН, Людвигсхафен	Вибух хмари діметилового ефіру	30	207	300
Франція, Фейзен	Вибух хмари нафтового газу	200	18	81
США, Гудзон	Вибух хмари нафтового газу	70	0	7
ПАР, Потчеструм	Вибух хмари метану	15	18	64
США, Декейтор	Вибух хмари пропану	63	7	152
Нідерланди, Бек	Вибух хмари пропану	5	14	107
Англія, Фликсборо	Вибух хмари циклогексану	50	28	89
США, Веєю	Вибух хмари пропілену	5,5	14	45
Колумбія, Санта-Крус	Вибух хмари метану	7	52	106
Іспанія, Сан-Карлос	Вибух хмари пропілену	38	215	780
Мексика, Мехіко	Вибух хмари природного газу	45	452	5250
Бразилія, Кубатао	Вибух хмари газоліну	18	500	7000
Росія, Ярославль	Вибух хмари суміші вуглеводневих газів	3,3	6	13
Росія, Красноярськ	Вибух хмари суміші вуглеводневих газів	5,2	4	5
Росія, Уфа	Вибух хмари суміші вуглеводневих газів	7,6	2	8

За даними міжнародної організації «The Major Hazard Incident Data Service» (MHIDAS), що займається реєстрацією та аналізом великих НС на підприємствах, в світі відбувається (2-3) великі аварії на рік в хімічній, нафтохімічній і нафтопереробній промисловості, при яких розміри зон дії вражаючих факторів досягають декількох сотень або навіть тисяч метрів і з загибеллю понад 25 осіб і більше 100 поранених. В цілому в світі спостерігається неухильне зростання числа промислових аварій, викликане як зростанням числа небезпечних об'єктів, так і збільшенням щільності населення.

Згідно зі статистикою MHIDAS, щорічно в світі на об'єктах газонефтепереработки відбувається до 1500 аварій, 4% яких супроводжуються масовою загибеллю людей; щорічний матеріальний збиток від аварій, що відбулися, перевищує суму в 100 млн дол. При цьому до 13% великих аварій – це вибухи.

За висновком фахівців MHIDAS, аварійність підприємств безперервно зростає [19]. Це стосується як країн ЄС так і США.

У квітні 2013 року на підприємстві компанії West Fertilizer Company в місті Вест (Техас, США), стався потужний вибух. В результаті вибуху 15 людей загинули, більше 160 отримали поранення, було пошкоджено більше 90 будинків і одна школа, зруйновано 80 будинків, один 50-квартирний житловий будинок повністю знищений [21].

За даними Ради з хімічної безпеки США (The U.S. Chemical Safety Board – CSB), яка відстежує і контролює аварії та інциденти в хімічній, нафтохімічній і нафтопереробній промисловості США, в результаті яких

- стався нещасний випадок зі смертельним наслідком або госпіталізацією;
- заподіяно майнову шкоду на суму понад \$ 500 тис .;
- потрібна масштабна евакуація людей;
- завдано збитків за межами виробничого майданчика,

кількість промислових аварій, що супроводжуються вибухами, щорічно зростає на (1-1,5)% в останні 5 років [22].

У 2010 р. CSB зареєструвала 162 великих аварій і інцидентів (серед них 14 вибухів), в 2011 р – 282 (16 вибухів). За даними, отриманим від Статистичного управління США, кількість пожеж і вибухів на ГНПП, а також смертельні випадки на робочих місцях від їх вражаючої дії за останні кілька років в США не скоротилися.

У країнах СНД ситуація з вибухонебезпекою підприємств газонафтопереробної галузі значно гірше, ніж в країнах ЄС і США. За даними статистичних досліджень [22] за період з 2012 по 2017 роки було зафіксовано 46 вибухів, які забрали життя 62 людей і 173 людини отримали важкі травми. При цьому спостерігається стійка тенденція до зростання подібних НС.

Аналіз статистичних даних про вибухи на ГНПП України показав, що виникнення НС найчастіше відбувається в результаті розгерметизації технологічних установок з викидом вибухонебезпечної речовини в газоподібній фазі і утворенням хмари ГПС.

Викидом вибухонебезпечної речовини називається його вихід при розгерметизації за короткий проміжок часу з технологічних установок, ємностей для зберігання тощо в кількості, здатній викликати вибух.

За даними [23-27] основними причинами руйнування технологічного обладнання ГНПП є:

- природне старіння і знос – 17%;
- процеси корозії – 17%;
- заводські дефекти виготовлення – 5%;
- порушення правил безпечної експлуатації устаткування – 43%.

Розподіл економічних втрат по типу небезпеки від НС для ГНПП, представлений на рис. 1.1 [25], показує, що найбільші економічні втрати пов'язані з вибуховим перетворенням викидів вибухонебезпечних речовин.

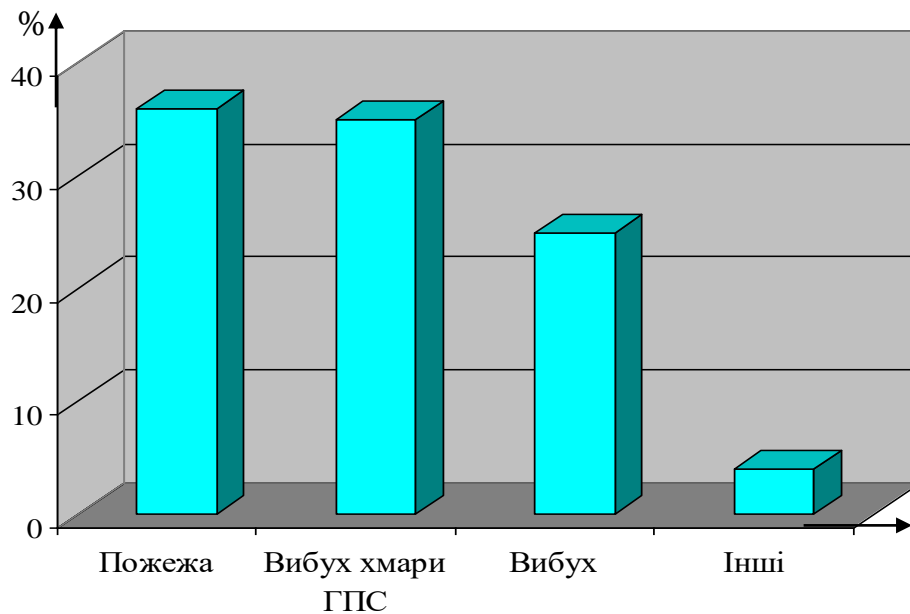


Рисунок 1.1 – Розподіл економічних втрат (в %) від НС за типом небезпеки

Аналіз можливих наслідків НС свідчить [23, 25, 28], що вибухи на відкритих майданчиках ГНПП найбільш небезпечні внаслідок розгалуженості мережі технологічних комунікацій, великої щільності насичення території технологічним обладнанням та високий вміст вибухонебезпечних речовин в установках.

Тому в дисертаційній роботі в якості вихідної події для НС на ГНПП приймається розгерметизація обладнання, що відбулася в результаті його руйнування, відмови, помилки персоналу або з інших причин, далі відбуваються проміжні події – етапи розвитку НС, що призводять до кінцевої події – вибуху хмари ГПС і впливу на персонал, будівлі та споруди об'єкта, сусідні об'єкти небезпечних факторів вибуху [29-31].

## 1.2 Особливості техногенних НС з вибухами на ГНПП

Аналізу фізичних процесів, що відбуваються при вибухах хмар ГПС,

які утворилися при руйнуванні технологічного обладнання, та їх впливу на навколишнє середовище присвячено багато робіт вітчизняних та закордонних дослідників [32-39].

Роботи [32, 33, 28, 34, 35] містять результати математичного моделювання вибухів хмар газоповітряних та пароповітряних сумішей. У теорії вибуху розрізняють детонаційний та дефлаграційний механізми вибухового перетворення. Перший з них – це вибух, при якому запалення наступних шарів вибухової речовини відбувається в результаті стиснення і нагрівання ударною хвилею, такою, що ударна хвиля і зона хімічної реакції йдуть нерозривно одна за одною з постійною надзвуковою швидкістю. Дефлаграційним є вибух з енерговиділенням в об'ємі хмари горючих газоподібних сумішей і аерозолів при поширенні екзотермічної хімічної реакції з дозвуковою швидкістю.

У роботах [36-45] розглядаються питання визначення кількісних характеристик детонаційних та дефлаграційних вибухів вуглеводневих газів та їх сумішей з повітрям в умовах відкритого простору.

Питання аналізу наслідків вибухів хмар ГПС у відкритому просторі досліджені меншою мірою [46, 47]. В Україні на даний час відсутній єдиний підхід до прогнозування можливих наслідків вибуху хмар ГПС на об'єктах газонафтопереробки. Вітчизняний нормативний документ [46] містить методику визначення параметрів вибуху хмари ГПС, яка виникла при НС з викидом вибухонебезпечних речовин в результаті розгерметизації устаткування. Але дана методика не враховує склад вибухонебезпечної суміші та режим її вибуху.

Закордонні джерела [48-50] при визначенні наслідків вибуху рекомендують розглядати детонаційний режим. Але за статистичними даними до 90% вибухів хмар ГПС відбувається за дефлаграційним механізмом. У роботі [51] розглядаються питання надійності технологічного обладнання потенційно-небезпечних об'єктів (ПНО) та дається аналіз причин виникнення НС, пов'язаних з відмовами технологічного обладнання.

Характеристики НС, які пов'язані з вибуховим перетворенням хмар ГПС, визначаються в основному кількістю вибухонебезпечної речовини і її фізико-хімічними характеристиками, такими як [24, 42]:

- щільність ГПС;
- стехіометрична концентрація вибухонебезпечної речовини в ГПС;
- концентраційні межі поширення полум'я в повітрі;
- температури спалаху, займання і самозаймання;
- мінімальна енергія запалювання та ін.

Врахування даних характеристик є обов'язковою умовою при проектуванні ГНПП або їх окремих технологічних блоків і установок [21].

Областю (діапазоном) займання (вибуху) хмари ГПС є проміжок між нижнім (НКМПП) і верхнім (ВКМПП) концентраційними межами поширення полум'я. На рис. 1.2 показані діапазони займання для деяких типів ГПС [52].

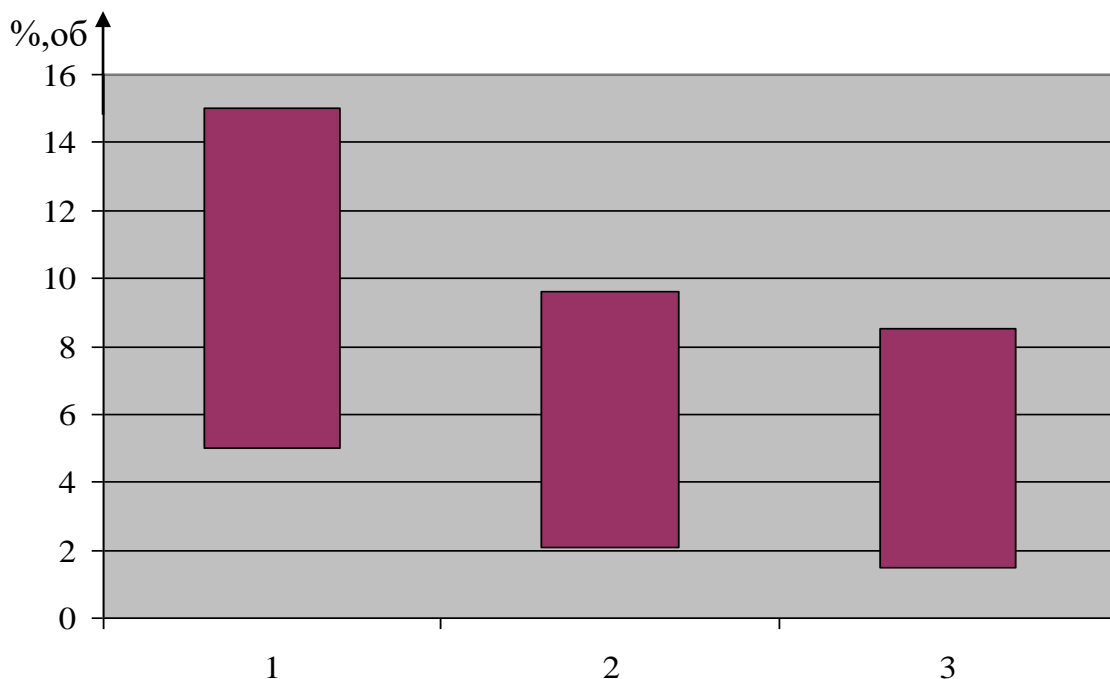


Рисунок 1.2 – Діапазон займання для деяких ГПС

1 – метан, (5,1 ... 14,9) %;

2 – пропан, (2,1 ... 9,5) %;

3 – бутан, (1,8 ... 8,5) %.

Механізми виникнення і розвитку НС, пов'язаних з вогненным перетворенням викиду вибухонебезпечної речовини, як правило, мають складні сценарії, що включають різні типи подій надзвичайних ситуацій, а число можливих сценаріїв може досягати декількох тисяч.

Типова схема виникнення та розвитку НС з вибухом хмари ГПС на технологічних установках ГНПП в результаті розгерметизації обладнання, заснована на аналізі та систематизації реальних подій, представлена на рис. 1.3 [21, 53, 54],

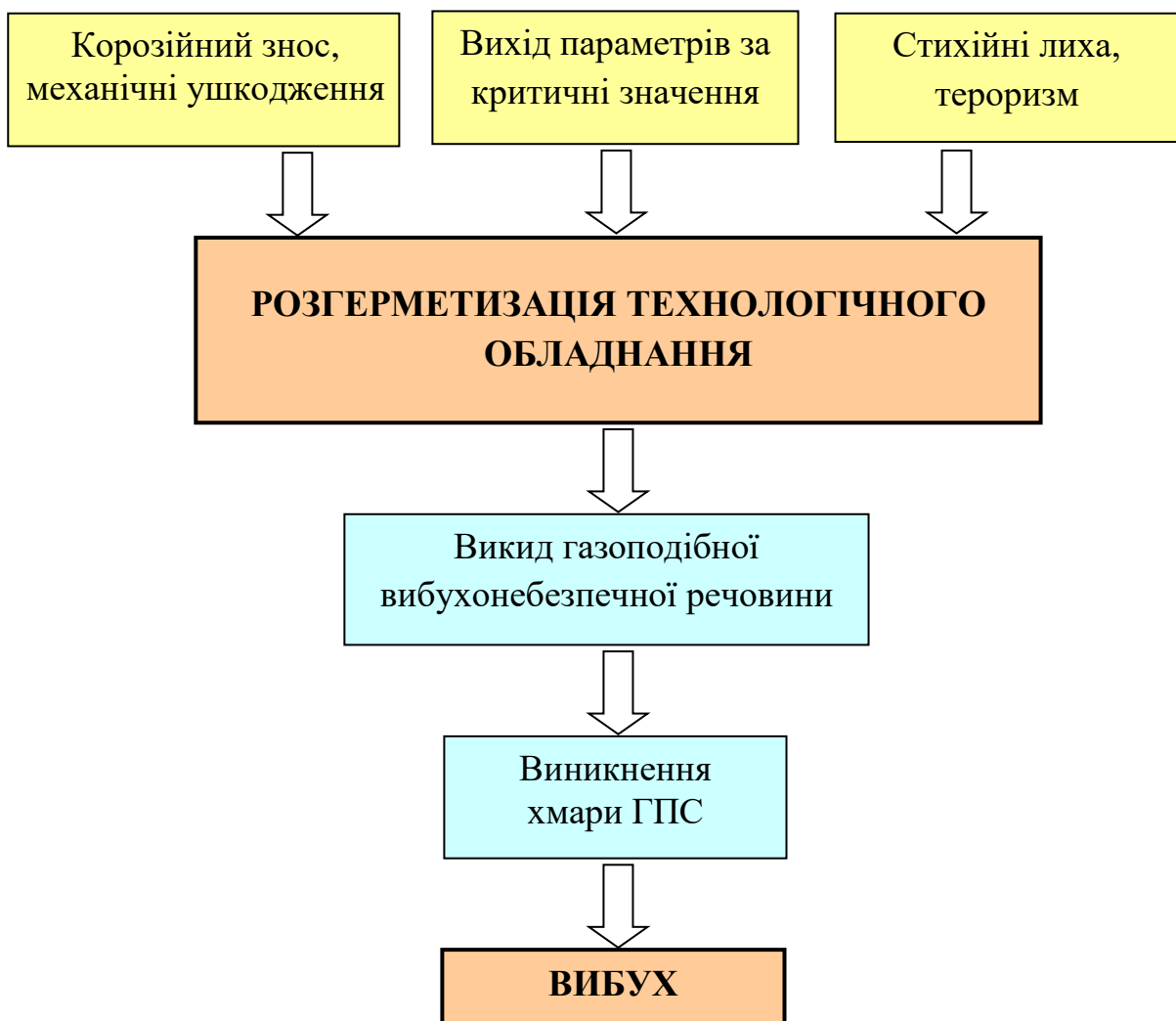


Рисунок 1.3 – Типова схема аналізу ймовірних моделей виникнення та розвитку НС з розгерметизацією обладнання і вибухом хмари ГПС



Розвиток НС з викидом вибухонебезпечної речовини [21, 22] можна розділити на шість послідовних стадій (рис. 1.4), що мають свої характерні особливості. Слід зазначити, що час від початку НС (розгерметизація обладнання) до завершального події (вибуху) може коливатися в широких межах оскільки досягнення хмарою ГПС конкретної точки простору ще не означає виникнення вибухових процесів [21].

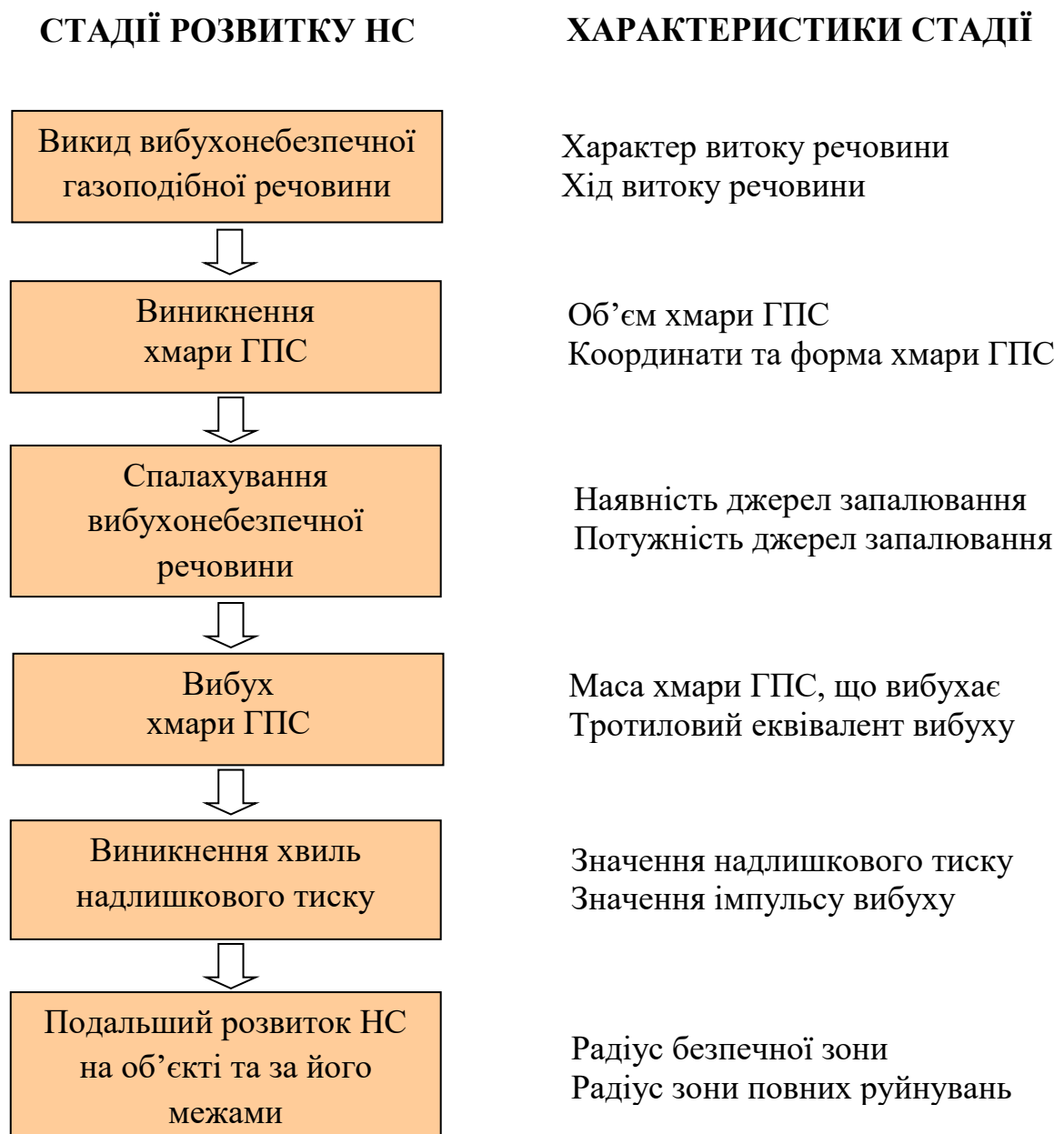


Рисунок 1.4 – Стадії і характеристики розвитку НС з викидом вибухонебезпечної речовини

Перераховані фактори в значній мірі є випадковими подіями, що обумовлює ймовірну природу вибуху.

Характеристики НС з вибухами хмар ГПС на підставі статистичних даних [21] наведені на рис. 1.5-1.8.

На рис. 1.5 показано розподіл загальної кількості вибухів в залежності від маси хмари ГПС.

Як видно з рисунка, найбільш часто спостерігаються НС з вибухами хмар ГПС, що мають маси від 1000 кг до 10000 кг (32,9%) і від 10000 до 100000 кг (32,8%). Менша кількість вибухів доводиться на хмари ГПС з малими і дуже великими масами.

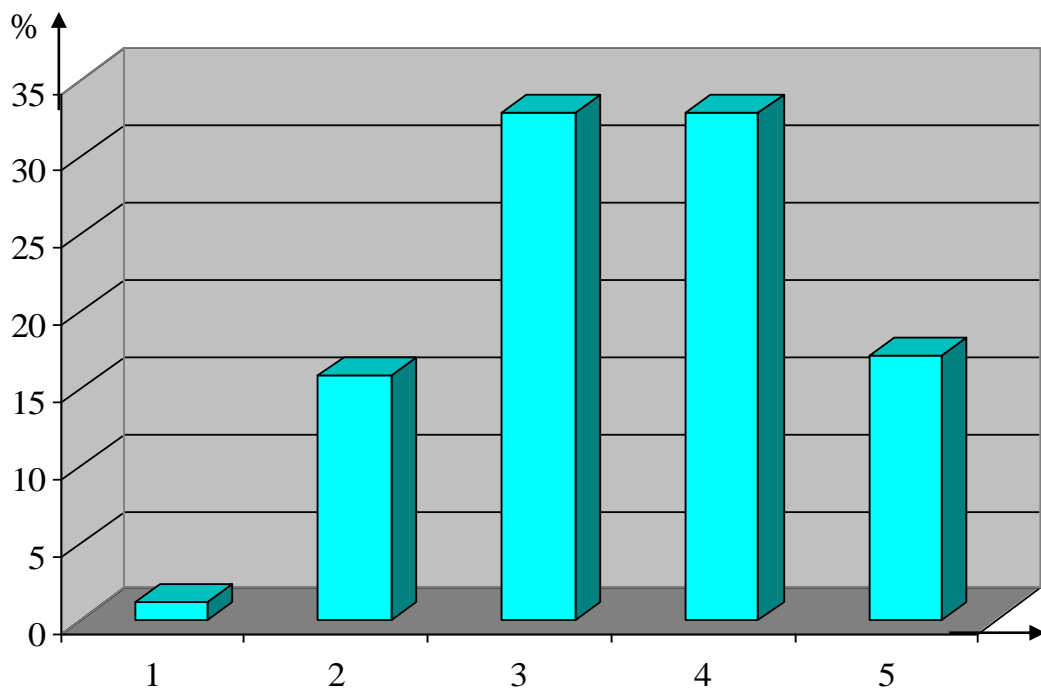


Рисунок 1.5 – Частка вибухів хмар ГПС в залежності від маси хмари

- 1 - маса хмари менш 100 кг;
- 2 - маса хмари від 100 кг до 1000 кг;
- 3 - маса хмари від 1000 кг до 10000 кг;
- 4 - маса хмари від 10000 кг до 100000 кг;
- 5 - маса хмари більш 100000 кг.

На рис. 1.6 наведено розподіл числа вибухів хмар ГПС в залежності від тривалості існування хмари, тобто часу, що пройшов від розгерметизації технологічного обладнання, викиду газоподібної вибухонебезпечної речовини і формування хмари ГПС до його займання і вибуху.

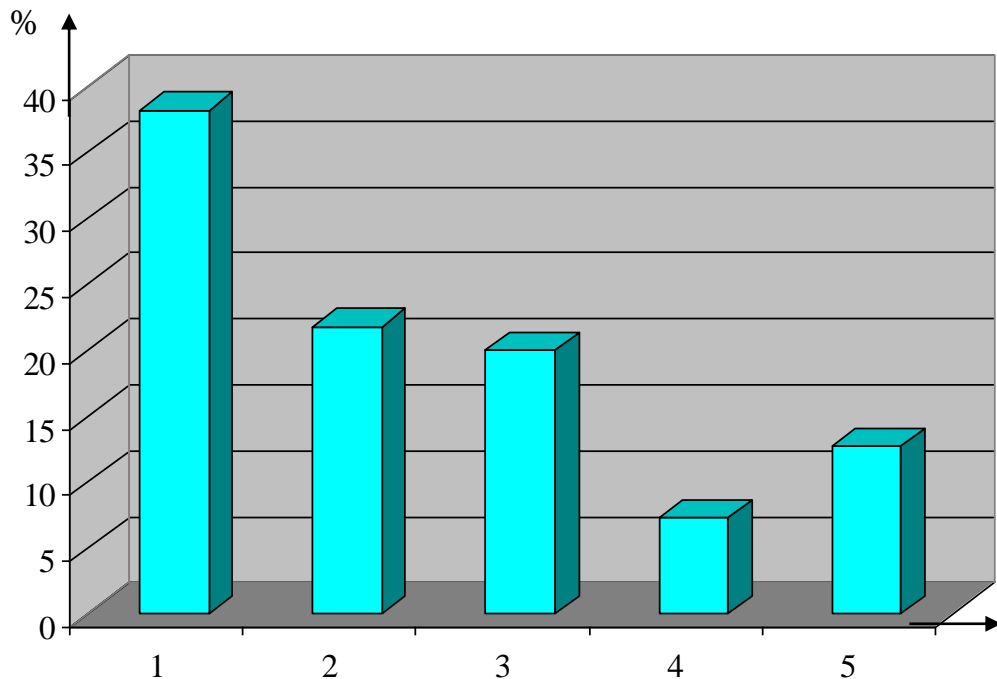


Рисунок 1.6 – Час існування хмари ГПС до її вибухового перетворення

- 1 – менше хвилини;
- 2 – від 1 хвилини до 5 хвилин;
- 3 – від 5 хвилин до 15 хвилин;
- 4 – від 15 хвилин до 30 хвилин;
- 5 – більше 30 хвилин.

Аналіз даних рис. 1.6 показує, що найбільша ймовірність вибуху хмари ГПС спостерігається в перші 60 секунд її існування, потім зменшується приблизно в півтора рази і залишається на цьому рівні аж до 30 хвилин.

Переміщення хмари ГПС до його вибухового перетворення показано на рис. 1.7.

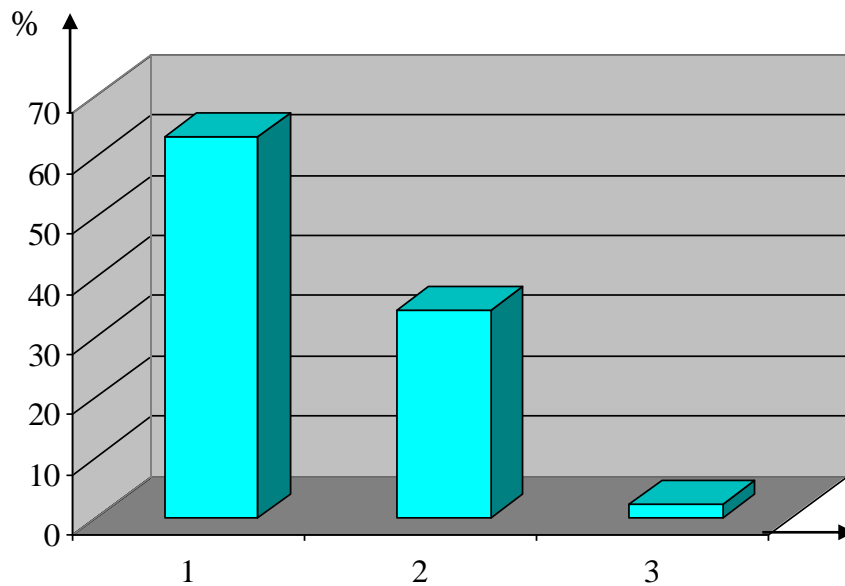


Рисунок 1.7 – Переміщення хмари ГПС до її вибухового перетворення

1 – менш 100 м;

2 – від 100 м до 1000 м;

3 – більш 1000 м.

Як видно з рис. 1.7, для найбільшої частки хмар ГПС, що утворилися в результаті НС з розгерметизацією технологічного обладнання ГНПП (63,2%), довжина дрейфу до вибухового перетворення не перевищує 100 м. У два рази меншу кількість хмар ГПС (34,5%) встигають до вибуху переміститися на відстань від 100 м до 1000 м, величина дрейфу, що перевищує 1 км, практично не спостерігається (2,3%).

На плавучість хмари ГПС впливають багато чинників, серед яких слід зазначити [55, 21, 25]:

- метеорологічні умови (час року, час доби, стан атмосфери);
- напрямок і швидкість вітру, зміна його швидкості по висотах;
- рельєф місцевості, забудова технологічної установки;
- місце розміщення джерела НС, його форма і габаритні розміри;
- параметри витоку вибухонебезпечної речовини;
- наявність джерел запалювання, їх тип (потужність) і ймовірність

контакту хмари ГПС з ними.

Інформація про розподіл кількості НС з вибухами хмар ГПС, що утворилися в результаті розгерметизації технологічного обладнання, за видами технологічного обладнання представлена на рис. 1.8.

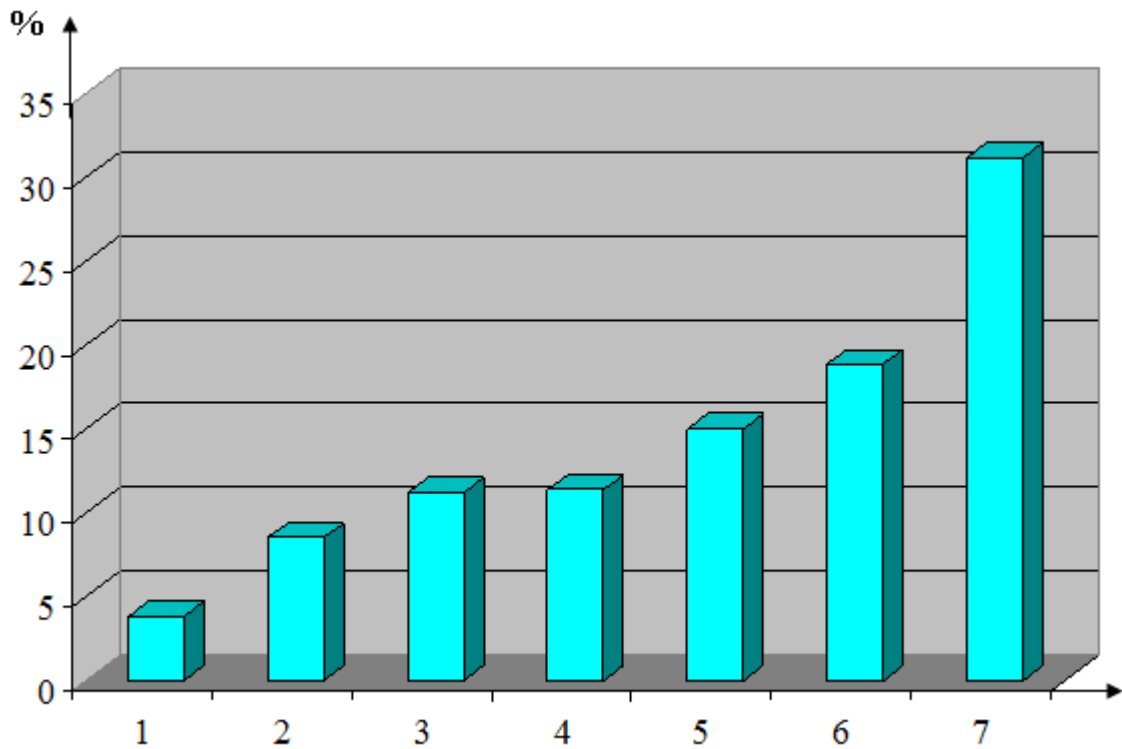


Рисунок 1.8 – Розподіл кількості НС з вибухами хмар ГПС за видами технологічного обладнання ГНПП

- 1 – резервуарні парки;
- 2 – промислова каналізація;
- 3 – колонні апарати;
- 4 – печі;
- 5 – ємнісні апарати;
- 6 – насосні станції;
- 7 – технологічні трубопроводи.

Джерелами займання хмар ДПС на відкритих майданчиках технологічних установках ГНПП є [21]:

- нагріта до високої температури поверхня технологічного обладнання – 36,8%;
- відкритий вогонь печей – 22,8%;
- електричні іскри від несправного обладнання – 8,9%;
- відкритий вогонь під час зварювальних робіт – 8,8%;
- підвищення температури при терті – 7,6%;
- самозаймання продуктів – 7,5%;
- інші джерела – 7,6%.

Середня оцінка ймовірності різних сценаріїв розвитку НС з викидом стислого вуглеводневого газу приведена в таблиці 1.2 [54].

Таблиця 1.2 – Середня оцінка ймовірності різних сценаріїв розвитку НС з викидом стислих вуглеводневих газів

Сценарій розвитку НС	Ймовірність
Факельне горіння	0,0868
Вогняна куля	0,6190
Вибух хмари ГПС	0,2650
Без горіння та вибуху	0,0292

На підставі аналізу статистичних даних про аварії на ГНПП можна стверджувати, що при миттєвих викидах вуглеводневих газів займання практично неминуче і в 26,5% випадках супроводжується вибухом.

### 1.3 Аналіз вітчизняної та закордонної нормативно-правової бази в сфері промислової безпеки

Зростання кількості крупних НС із пожарами і вибухами на небезпечних промислових об'єктах, у тому числі хімічних та

газонафтопереробних, яке об'єктивно обумовлене інтенсифікацією виробництва, старінням основних фондів підприємств і збільшенням показників аварійності технологічного обладнання, вимагало від державної влади розвинутих країн прийняття нових ефективних заходів у сфері регулювання промислової безпеки [56].

### 1.3.1 Міжнародні правові акти у сфері промислової безпеки

Одним з перших міжнародних правових актів у сфері промислової безпеки стала Директива ЄС SEVESO [57]. Директива спрямована на запобігання великим аваріям за участю небезпечних речовин і обмеження їх соціальних та екологічних наслідків. Вона застосовується до об'єктів, на яких кількість небезпечних речовин перевищує відповідні граничні значення. Своїми положеннями Директива вимагає від промислових операторів (власників) підприємств:

- детального повідомлення про види та кількість усіх небезпечних речовин, що перебувають або використовуються на об'єкті;
- наявності плану дій на випадок аварії й демонстрації його ефективності;
- наявності системи керування безпекою для перевірки й контролю ефективності процедур з експлуатації та безпеки;
- здійснення оцінки ступеня ризику при визначенні потенційних проблем, пов'язаних зі зберіганням і переробкою небезпечних речовин;
- розроблення політики щодо запобігання великим аваріям.

Основна мета Директиви має два напрями. Насамперед вона спрямована на запобігання великим аваріям з утворенням небезпечних речовин. По-друге, оскільки аварії продовжують відбуватися, Директива спрямована на мінімізацію їх наслідків не тільки для людини (безпека й здоров'я), але й для довкілля (екологічний аспект).

Значною подією у світовій практиці попередження та протидії крупним промисловим аваріям та техногенним НС на особливо небезпечних підприємствах стала Конвенція ООН «Про транскордонний вплив промислових аварій» [58], яка була підписана у Гельсінкі 17 березня 1992 року представниками 41 держави, у тому числі ЕС. У матеріалах Конвенції відзначається, що «Сторони, враховуючи зусилля, вже прийняті на національному та міжнародному рівнях, вживають відповідних заходів і співробітничать в рамках цієї Конвенції з метою захисту людей і навколишнього середовища від промислових аварій шляхом запобігання таких аварій, зменшення їх частоти і пом'якшення їх впливу. З цією метою вживаються заходи щодо запобігання аварій, забезпечення готовності до них і ліквідації їх наслідків, включаючи відновлювальні заходи. Сторони шляхом обміну інформацією, консультацій та інших спільних заходів розробляють і здійснюють політику і стратегію для зниження ризику промислових аварій та вдосконалення заходів по їх запобіганню, забезпечення готовності до них і ліквідації їх наслідків, включаючи відновлювальні заходи »

Важливими міжнародними законодавчими актами, спрямованими на попередження промислових аварій, є Кодекс МОП «По попередженню крупних промислових аварій» [59] та Конвенція МОП «Про попередження крупних промислових аварій» [60].

Відповідно до [59, 60] керівництво небезпечного підприємства, в тому числі підприємства газонафтопереробки, зобов'язано скласти декларацію безпеки, що включає в себе інформацію про ідентифікацію і оцінку основних небезпек і обґрунтуванні прийнятих заходів щодо безпечної експлуатації об'єкта, а також забезпечення безпеки персоналу в разі НС .

На базі вимог [59, 60] у багатьох країнах світу були розроблені національні нормативно-правові акти. На приклад, у США був прийнятий закон «Про право громадськості на інформацію» [61], в якому регламентувалася структура інформації про небезпечні об'єкти, яка повинна містити:



- опис об'єкта потенційної небезпеки;
- характеристику небезпечних речовин і матеріалів, які використовуються, а також методів контролю над ними;
- опис способів оповіщення про НС;
- характеристику заходів, які необхідно вжити в разі поразки людей і пошкодження матеріальних цінностей в результаті НС.

У відповідності до ідеології міжнародних актів [57 - 60] країнами ЄС та США були розроблені стандарти та інші нормативно-правові документи, що регламентують питання кількісного розрахунку та зниження рівня вибухопожежонебезпеки потенційно-небезпечних промислових об'єктів, у тому числі з визначенням величини ризику [62 - 66].

Нормативні документи [65, 66], які розроблені Національною Асоціацією протипожежної охорони США, стосуються стратегії забезпечення безпеки життя у разі виникнення НС з пожежами та вибухами. Документи містять методики оцінки рівня вибухопожежонебезпеки та засновані на їх використанні способи дій, які мінімізують наслідки вибуху або пожежі та пов'язані з ними небезпеки.

Міжнародний стандарт ІЕС 60079-10-1 [62] встановлює методику оцінки рівня вибухонебезпеки промислових зон, у яких можливо виникнення вибухонебезпечних газових сумішей як всередині так і поза приміщень. Методика базується на розрахункових значеннях параметрів, пов'язаних з просторовими та часовими характеристиками існування в цих зонах вибухонебезпечних газових середовищ. Стандарт встановлює порядок класифікації зон за ступенем небезпеки виникнення вибуху від джерела запалювання, пов'язаного з електрообладнанням. Перевагою стандарту є наявність методики кількісної оцінки впливу на клас вибухонебезпеки та розміри вибухонебезпечної зони різних факторів, що характеризують властивості та стан вибухонебезпечних газових сумішей, особливості технологічного обладнання тощо.

Міжнародний стандарт ISO 17776:2016 [64] описує процеси управління небезпеками виникнення НС під час розробки проектів наземних та морських нафтогазових установок, які базуються на оцінці вірогідності та можливих наслідків НС. Він встановлює вимоги та методики розробки стратегій як для запобігання виникненню НС, так і для обмеження можливих наслідків. Він також містить деякі вимоги щодо управління небезпеками виникнення НС при експлуатації об'єктів.

Міжнародний стандарт ISO/TS 16901:2015 [63] спрямований на забезпечення безпечного проектування та експлуатації споруд із зрідженим природним газом (ЗПГ). Він регламентує загальний підхід та методику кількісної оцінки основних небезпек в рамках планування, проектування та експлуатації об'єктів, на яких обертається ЗПГ, використовуючи методи та стандарти, що ґрунтуються на оцінці ризику.

### 1.3.2 Правові акти у сфері промислової безпеки СНД

Основним документом нормативної бази СНД, на основі якої проводиться проектування підприємств, що мають у своєму складі вибухонебезпечні технологічні об'єкти, є «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» [67], доповнені низкою документів [47, 48, 68, 90], які регламентують, в тому числі, оцінку рівня вибухонебезпечності промислових об'єктів.

У якості критерія вибухонебезпеки в [47, 67-70] запропонований відносний енергетичний потенціал, який визначається по повній енергії згоряння парогазової фази, що вивільняється при повному руйнуванні аварійного апарату. При цьому вважається, що вибух відбувається відразу після утворення хмари ГПС, у вибуховому перетворенні бере участь вся маса викиду газоподібної вибухонебезпечної речовини, а епіцентр вибуху збігається з положенням аварійного апарату. Для оцінки рівня впливу вибуху

рекомендується використання тротилового еквівалента, за яким визначають 5 класів зон руйнування з величинами надлишкового тиску від 100 кПа до 2 кПа. Наслідки аварійного вибуху визначаються по закономірностям детонаційної ударної хвилі, тобто передбачається максимально можливий варіант вибухового горіння.

Однак слід зазначити, що підходи [47, 67-70] не вільні від недоліків, через які при розрахунках радіусів зон руйнування і тиску ударної хвилі виходять значення, завищені настільки, що проектування і будівництво виробничого об'єкта стає технічно і економічно недоцільним [71-73]. Причини цього наступні:

- *використання при розрахунку параметрів вибухового перетворення хмари ГПС детонаційного механізму.* Відомо [69, 70, 74, 75], що в детонаційному режимі можуть згоряти тільки кілька (менше 10) речовин, та й то за певних умов – досить великий (сотні метрів) розмір хмари ГПС і можливість істотного прискорення полум'я для утворення ударної хвилі. Таким чином, для більшості вибухонебезпечних речовин детонація не реалізується ніколи.

- *припущення, що вибух хмари ГПС відбувається відразу ж після його формування в результаті НС з руйнуванням технологічного апарату.* Таке припущення фактично означає відсутність врахування дрейфу хмари ГПС під дією вітру. Наслідками цього є: по-перше, завищена в декілька разів маса ГПС, що бере участь у вибуху, по-друге, обов'язковий збіг епіцентру вибуху хмари ГПС з центром аварійного технологічного апарату.

Що стосується першого наслідку, то в даний час велика частина обладнання технологічних установок, особливо великотоннажних, розміщується на відкритих майданчиках. Завдяки цьому основна частина газів (парів), що виділяються при розгерметизації обладнання, швидко змішується з великою кількістю повітря і розсіюється вітром, який дує з тією чи іншою швидкістю практично завжди. Як наслідок, концентрація вибухонебезпечної речовини в значних об'ємах хмари виявляється нижче

НКМПП і не бере участі у вибуху. Тому проведення розрахунків параметрів вибуху з урахуванням всієї маси продукту, що виділяється при повній розгерметизації обладнання, не є правомірним. Крім того, маса ГПС, що бере участь у вибуху, виявляється залежною від кліматичних характеристик області НС (швидкості вітру і стану атмосфери).

Що стосується другого наслідку, то, як показують статистичні дослідження [75], вибухове перетворення хмари ГПС майже ніколи не відбувається відразу після її формування, а, як правило, лише через (5...10) секунд [41]. За цей час в результаті дрейфу хмари ГПС епіцентр можливого вибуху може зміститися в напрямку вітру від аварійного технологічного апарату на відстань в декілька десятків метрів, що істотно змінює картину і характер впливу вибуху на сусідні об'єкти. Таким чином, і в цьому випадку наслідки вибуху хмари ГПС залежать від кліматичних характеристик області НС.

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що вказані методики, які викладені в нормативних документах [47, 48, 67, 68, 90], не дозволяють реально оцінювати рівень вибухонебезпеки промислового об'єкта і можуть бути використані тільки для орієнтовної оцінки верхньої межі можливого рівня вибухонебезпеки.

### 1.3.3 Правові акти у сфері промислової безпеки України

В Україні також прийняті і реалізовані на практиці ряд Законів та інших нормативно-правових документів, орієнтованих на забезпечення безпеки територій та потенційно небезпечних об'єктів, на яких можливі НС з пожежами та вибухами [76-80].

Документ [76] регламентує загальні принципи класифікації НС за рівнями впливу. Залежно від масштабів заподіяних наслідків, технічних і матеріальних ресурсів, необхідних для їх ліквідації, надзвичайна ситуація класифікується як державного, регіонального, місцевого або об'єктового

рівня. Для визначення рівня надзвичайної ситуації встановлюються такі критерії:

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

2) кількість людей, які внаслідок дії вражаючих чинників джерела НС загинули або постраждали, або нормальні умови життєдіяльності яких порушено;

3) розмір збитків, завданих вражаючими чинниками джерела НС.

Класифікатор надзвичайних ситуацій ДК 01912010 [77] містить впорядковані назви НС та їх коди. У Класифікаторі наведено перелік НС, визначених у відповідних нормативно-правових актах і згрупованих за ознаками належності до відповідних НС, які , які можуть виникнути на окремій території України чи об'єкті в різних галузях національного господарства країни.

Документом [78] регламентуються класифікаційні ознаки НС. Кожна ознака містить короткий опис НС, одиниці виміру показника ознаки та порогові значення показника ознаки.

Важливим питанням визначення та забезпечення рівня безпеки, у тому числі вибухобезпеки, в країні є ідентифікація та моніторинг потенційно небезпечних об'єктів. Потенційно небезпечний об'єкт (ПНО) – об'єкт, що створює реальну загрозу виникнення НС, на якому використовуються, виготовляються, переробляються, зберігаються або транспортуються радіоактивні, вибухонебезпечні, пожежонебезпечні, хімічні речовини та біологічні препарати, а також об'єкти з видобування корисних копалин, гідротехнічні споруди тощо.

Методика ідентифікації ПНО наведена в [79]. Ідентифікація передбачає аналіз структури об'єктів господарської діяльності та характеру їх функціонування для встановлення факту наявності або відсутності джерел небезпеки, які за певних обставин можуть ініціювати виникнення НС, а також визначення рівнів можливих НС. При цьому проводиться:

- 1) аналіз показників ознак НС та визначення їх порогових значень з використанням Класифікаційних ознак надзвичайних ситуацій;
- 2) виявлення за результатами аналізу джерел небезпеки, які при певних умовах (аварії, порушення режиму експлуатації, виникнення природних небезпечних явищ тощо) можуть стати причиною виникнення НС;
- 3) визначення видів небезпеки для кожного з виявлених джерел небезпеки;
- 4) визначення переліку небезпечних речовин, що використовуються на об'єкті господарської діяльності, їх кількості та класу небезпеки;
- 5) оцінка на підставі отриманих даних зони поширення НС, які можуть ініціювати кожне з виявлених джерел небезпеки;
- 6) оцінка можливих наслідків НС для кожного з джерел небезпеки.

Основні питання моніторингу ПНО розглянуті у Положенні про моніторинг потенційно небезпечних об'єктів [80]. Це Положення визначає загальні засади моніторингу ПНО та порядок його здійснення у межах завдань Єдиної державної системи запобігання і реагування на надзвичайні ситуації техногенного та природного характеру.

Мета моніторингу ПНО – отримання даних про поточний стан ПНО та актуалізація інформації, що міститься у базі даних Державного реєстру потенційно небезпечних об'єктів для запобігання НС та мінімізації їх наслідків.

Моніторинг ПНО передбачає спостереження за якісними і кількісними параметрами стану ПНО, збирання, оброблення, передавання та збереження інформації про стан ПНО.

Державний стандарт України [46] регламентує питання категорювання об'єктів за рівнем вибухопожежонебезпеки. Він встановлює вимоги до визначення категорій приміщень і будинків (або частин будинків у межах протипожежних відсіків) виробничого та складського призначення, лабораторій, а також зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою залежно від кількості й вибухопожежонебезпечних властивостей

речовин і матеріалів, що в них знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються), з урахуванням особливостей технологічних процесів виробництв та об'ємно-планувальних рішень, наявності технічних засобів, що запобігають виникненню аварійних ситуацій. Цей стандарт застосовують на стадії проектування, експлуатації, реконструкції, технічного переоснащення та зміни технологічного процесу у приміщеннях, будинках та зовнішніх установках незалежно від форм власності та відомчої належності, а також під час розроблення відомчих норм технологічного проектування та переліків приміщень з визначенням категорій за вибухопожежною та пожежною небезпекою. Категорії приміщень, будинків та зовнішніх установок, які визначені відповідно до цього стандарту, слід використовувати для встановлення вимог щодо забезпечення вибухопожежної та пожежної безпеки зазначених приміщень, будинків та зовнішніх установок стосовно планування і забудови, поверховості, площ, розташування приміщень, конструктивних рішень, інженерного устаткування та систем захисту. Цей документ також дає методику визначення параметрів вибуху хмари ГПС, яка виникла при НС з викидом вибухонебезпечної речовини в результаті розгерметизації устаткування. Але дана методика не враховує склад вибухонебезпечної суміші, режим її вибуху та не визначає шляхів зменшення негативних наслідків вибуху. Крім того, як показує аналіз, на теперішній час в Україні є відсутнім єдиний підхід до розв'язання задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки на об'єктах з виникненням та вибухом хмар ГПС.

#### 1.4. Аналіз методів оцінки рівня вибухопожежонебезпеки газонафтопереробних об'єктів і методів його мінімізації

Визначення рівня небезпеки виникнення вибуху на підприємствах газонафтопереробки є частиною загальної проблеми кількісної оцінки рівня вибухопожежонебезпеки виробничих об'єктів. Вирішення даної актуальної проблеми присвячені численні наукові роботи як вітчизняних, так і

зарубіжних авторів [81, 82, 56, 83].

Аналіз літературних джерел показує, що методи, які використовуються для визначення рівня вибухопожежонебезпеки об'єктів, можна об'єднати в три групи [56, 82].

*Методи, засновані на індексації небезпеки* [82, 84-89]. Індексація об'єктів по вибухопожежонебезпеці [82] використовується при віднесенні будівель, споруд, приміщень і відкритих технологічних установок до тієї чи іншої категорії [46]. При цьому враховується горюче навантаження, агрегатний стан і вибухонебезпечні властивості речовин. У даній методиці при можливості вибуху будівлі, споруди, приміщення та відкриті технологічні установки відносяться до категорій А або Б (вибухонебезпечні), в іншому випадку – до категорій В, Г або Д (пожежонебезпечні).

В роботах [88, 89] для виявлення порівняльного рівня вибухопожежонебезпеки об'єктів запропоновані регресивні моделі, засновані на точкових схемах. Схеми характеризуються призначенням точок, які кількісно визначають фактори, що впливають на рівень пожежної безпеки об'єктів. Недоліком моделей є умовність у розподілі точок і оцінці значущості факторів, яка визначається на основі експертного оцінювання.

Для оцінки небезпеки використовуваних речовин розраховується індекс вибухопожежонебезпеки сировини і матеріалів [84-87], який характеризує їх здатність до займання та утворення горючих і вибухонебезпечних сумішей. Основні вибухопожежонебезпечні характеристики речовин (здатність до самозаймання та ін.) враховуються в індексі шляхом введення спеціальних коефіцієнтів. Недоліком даного методу є умовність вибору коефіцієнтів при розрахунку індексу.

Таким чином, методи, засновані на індексації небезпеки, і показники розрахунків вибухопожежонебезпеки є умовними, не характеризують фізичну небезпеку об'єктів і можуть служити для порівняльної оцінки рівня їх небезпеки. Вони в основному використовуються при порівняльній класифікації об'єктів за ступенем небезпеки і виборі засобів попередження і



захисту.

*Методи детермінованої оцінки допустимого рівня вибухопожежонебезпеки об'єктів* [31, 56, 90-96]. Ці методи дозволяють розрахувати допустиму вибухопожежонебезпеку речовин, технологічних блоків і процесів і ґрунтуються на визначенні абсолютних значень енергетичних потенціалів об'єктів (технологічних блоків). Розрахунок енергетичних потенціалів для горючих газів, парів і рідин при аварійній розгерметизації технологічних блоків проводиться з використанням фізико-хімічних і вибухопожежонебезпечних властивостей цих речовин [90]. При розрахунку приймається, що:

- при аварійній розгерметизації технологічного блоку відбувається його повне руйнування;
- площа розливу рідкої фази визначається з конструктивних рішень приміщення або майданчика зовнішньої технологічної установки;
- час випаровування розливу не перевищує 3600 секунд.

Визначається повна енергія згоряння горючих сумішей, які перебували в аварійному блоці, розраховується робота адіабатичного розширення, повного згоряння рідини, що випарувалася з максимально можливої площі розливу, а також енергія і надлишковий тиск вибуху, розміри вибухонебезпечних і пожежонебезпечних зон, величина теплового випромінювання від пожежі. На основі методів детермінованою оцінки даються рекомендації щодо застосування засобів і способів автоматичного пожежогасіння та пожежної сигналізації, вогнезахисних покриттів, теплоізоляції і т.п.

Іноді для визначення енергетичних потенціалів об'єктів (технологічних блоків) використовується система додаткових коефіцієнтів [91], які враховують фактори, що впливають на рівень вибухопожежонебезпеки об'єктів (агрегатний стан речовини, можливості розгерметизації, появи джерел запалення і т.п.). Однак велика кількість коефіцієнтів і умовність їх визначення (на основі експертних оцінок) істотно знижує точність і

надійність одержуваних результатів.

Найбільш широко методи детермінованої оцінки використовуються для визначення рівня вибухопожежонебезпеки хімічних, нафтохімічних і газонафтопереробних виробництв [56, 96, 97].

*Статистико-ймовірнісні методи оцінки рівня вибухо- і пожежної небезпеки об'єктів* [56, 90-92, 96, 99, 100]. Методи ймовірнісної оцінки вибухопожежонебезпеки засновані на тому факті, що аварія, яка призводить до виникнення НС, – це подія випадкова, що підкоряється статистичним закономірностям. За критерії, що визначають рівень небезпеки об'єкту, приймаються ймовірності виникнення вибуху (пожежі) на ньому.

Ймовірності аварій, які можуть призвести до вибуху (пожежі) визначаються зазвичай з аналізу особливостей технологічного процесу на об'єкті, вибухопожежонебезпечних характеристик речовин і матеріалів, що обертаються в ньому, і технічних характеристик технологічного обладнання [31]. Як зазначалося вище, для підприємств газонафтопереробної галузі найбільш ймовірними аваріями, що приводять до вибуху (пожежі), є викиди горючих речовин в результаті розгерметизації технологічних установок, резервуарів, трубопроводів, виходу з ладу насосного обладнання, запірної арматури [21, 53, 54].

Основні методи визначення ймовірності виникнення НС на виробничих об'єктах детально викладаються в монографії [101]. Вона містить результати узагальнення досвіду американських фахівців у зазначеній галузі. Викладаються і критично аналізуються основні методологічні підходи до оцінки ймовірності виникнення НС, наводяться приклади практичної реалізації різних підходів в умовах конкретних об'єктів. Серед методів визначення ймовірності виникнення НС виділяються:

- метод дерев відмов (FTA);
- метод дерев подій (ETA);
- метод аналізу небезпеки і працездатності (HAZOR);
- метод перевірконого листа (Check-list);

- топологічні методи;
- GO - технології та інші.

Відповідно до ідеології [101], ймовірності виникнення на об'єктах аварій, що призводять до НС з вибухами, визначаються з урахуванням особливостей технологічного процесу, побудови логічних дерев подій (дерев відмов) і на основі аналізу статистичних даних [30-32, 102-104]. Наприклад, ймовірність  $Q_q$  виникнення вибуху (пожежі) на об'єктах може бути знайдена за формулою [98]:

$$Q_q = Q_{qa} Q_{qp}, \quad (1.1)$$

де  $Q_{qa}$  – ймовірність аварії на  $q$ -му об'єкті, яка може призвести до вибуху (пожежі),  $Q_{qp}$  - ймовірність виникнення вибуху (пожежі) в результаті аварії.

Методичні підходи до визначення ймовірності виникнення НС на об'єктах і розрахунки, виконані в [56, 90, 96, 99], дозволяють оцінити реальний рівень вибухопожежонебезпеки об'єктів, здійснити вибір заходів щодо мінімізації наслідків НС.

Таким чином, огляд методів оцінки рівня пожежовибухонебезпеки об'єктів показує, що отримання найбільш повної і об'єктивної характеристики реальної небезпеки промислового підприємства досягається ймовірностно-статистичними методами з визначенням ймовірності виникнення вибуху або пожежі на ньому з використанням підходів [101]. Однак при практичному застосуванні вказаних методів виникає складність знаходження кількісних показників надійності конкретного технологічного обладнання, яке функціонує в умовах конкретного виробничого об'єкту (часу напрацювання на відмову, частоти відмов, ймовірності відмови і т.п.), а також невизначеність виникнення і параметрів впливу зовнішніх факторів, що призводять до виникнення НС (процесів корозійного та механічного зносу, помилок персоналу, стихійних лих, терористичних актів тощо). Тому, як правило, ймовірність виникнення НС визначається в результаті обробки

статистичних даних щодо розподілу НС вказаного характеру для технологічних апаратів одного типу, які функціонують у приблизно однакових умовах.

Проблемі розробки методів мінімізації рівня вибухопожежонебезпеки промислових об'єктів присвячено значно менше як вітчизняних так і закордонних досліджень. Аналіз літературних джерел показує, що на теперішній час відсутній єдиний методологічний підхід щодо вирішення цієї проблеми. Найвні роботи присвячені розв'язанню часткових задач, побудова методик зниження рівня вибухонебезпеки, що пропонуються, виконується, як правило, з урахуванням особливостей задач та специфіки конкретних об'єктів, що ускладнює їх використання для інших випадків.

Як свідчить аналіз літератури, дослідження з розробки методів зниження рівня вибухопожежонебезпеки промислових об'єктів виконуються, в основному, за двома напрямками.

Перший напрям пов'язаний з поділом технологічної схеми на окремі технологічні блоки [20, 67]. Але, по перше, в даний час відсутні рекомендації по угрупованню обладнання за технологічними блоками, по друге, при існуючих принципах розміщення технологічного обладнання даний підхід є неефективним, оскільки вибух всередині технологічного блоку хмари ГПС, яка виникла внаслідок НС з руйнуванням обладнання, призводить до появи вражаючих факторів критичної величини.

Другий напрямок пов'язаний з розв'язком задачі оптимізації розміщення технологічного обладнання за деяким критерієм оптимальності. Цей напрямок є більш перспективним, в його рамках слід відмітити наступні роботи [5, 105-110].

В роботах [105, 106] сформульована і розв'язана задача підвищення рівня пожежовибухобезпеки нафтопереробного підприємства в умовах НС з вибухом хмари ГПС за рахунок зменшення сумарного об'єму зон застою, в яких можливе скупчення ГПС з вибухонебезпечними концентраціями. Для цього автором розроблено алгоритм раціонального розміщення обладнання

промислового об'єкта, який дозволяє мінімізувати скупчення небезпечних газоподібних речовин на його території при їх аварійному викиді з урахуванням домінуючих вітрів.

Ряд досліджень [107-109] присвячений підвищенню рівня вибухонебезпеки промислових об'єктів в умовах можливості виникнення ефекту «доміно» в результаті вибуху. В них сформульована і розв'язана задача оптимізації розміщення технологічного обладнання з урахуванням технологічних зв'язків, показників безпеки і стійкості до впливу вражаючих факторів. Як показники безпеки та стійкості до впливу вражаючих факторів вибуху введені критерії захищеності і безпеки обладнання. У якості критерію захищеності апарату пропонується прийняти ймовірність його повного руйнування в разі вибуху хмари ГПС при розгерметизації будь-якого іншого апарату установки. Критерій безпеки апарату – це ймовірність того, що в разі вибуху хмари ГПС при аварійній розгерметизації розглянутого апарату відбудеться повне руйнування будь-якого іншого апарата. При варіанті розташування технологічного обладнання, отриманого в результаті рішення оптимізаційної задачі, виключається вплив вражаючих факторів критичної величини на сусіднє обладнання в разі виникнення НС і, таким чином, запобігається виникнення ефекту «доміно».

Робота [110] присвячена підвищенню рівня вибухопожежобезпеки об'єктів зі зберігання нафтопродуктів і скраплених газів. Запропоновано методику розміщення резервуарів з урахуванням рельєфу місцевості, яка мінімізує площу розливу продуктів, кількість вибухонебезпечної парогазової фази, що утворюється, і величину повного енергетичного потенціалу для варіанта типового резервуара РВС-1000.

Методи, які базуються на розв'язанні оптимізаційної задачі розміщення обладнання, застосовуються також для зниження рівня пожежонебезпеки та екологічної безпеки промислових об'єктів [111-115]. В роботах [111-114] розроблено метод оптимального розміщення пожежонебезпечних об'єктів,

який дозволяє мінімізувати рівень забруднення навколишнього середовища аерозольними викидами пожежі з урахуванням параметрів пожежі та геокліматичних умов в області розміщення. Дослідження [115] присвячено моделюванню раціонального розміщення об'єктів техногенної небезпеки для мінімізації впливу небезпечних факторів можливої НС.

Методологічною базою розв'язання задач оптимального розміщення геометричних об'єктів та джерел фізичних полів, у тому числі вибухопожежонебезпечних об'єктів, служить теорія оптимізаційного геометричного проектування, розвинена в роботах [116-120]. Ці дослідження містять математичні моделі задач оптимізації розміщення об'єктів різної фізичної природи, аналіз та формалізацію системи обмежень оптимізаційних задач розміщення та методи їх розв'язання, як точні так і наближені.

Таким чином, з урахуванням гострої практичної необхідності та недостатнім ступенем розвитку теоретичного апарату удосконалення методів кількісної оцінки та мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП (на етапі проектування) в умовах можливої НС з вибухами дрейфуючих хмар ГПС шляхом оптимізації розміщення технологічного обладнання є актуальною науковою задачею і складає мету даної дисертаційної роботи.

## **ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 1**

В даному розділі виділено та проаналізовано основні групи наявних в науковій літературі публікацій з тематики дисертаційної роботи і суміжних напрямків досліджень.

1. Проаналізовано статистичні дані щодо НС з вибухами хмар ГПС, які утворилися в наслідок руйнування технологічного обладнання ГНПП. Аналіз статистичних даних показав, що виникнення НС найчастіше відбувається в результаті розгерметизації технологічних установок з викидом вибухонебезпечної речовини в газоподібній фазі і утворенням хмари ГПС.

2. Проведено аналіз особливостей техногенних НС з вибухами хмар ГПС на ГНПП, розглянуто типові схеми аналізу ймовірних моделей виникнення та розвитку НС з розгерметизацією обладнання і вибухом хмари ГПС, проаналізовано стадії і характеристики розвитку НС з викидом вибухонебезпечної речовини.

3. Проведено аналіз стану нормативно-правової бази в сфері промислової безпеки України і зарубіжних країн. Проведений аналіз дозволив зробити висновок, що методики, які викладені в нормативних документах, не дозволяють реально оцінювати рівень вибухонебезпеки промислового об'єкта і можуть бути використані тільки для орієнтовної оцінки верхньої межі можливого рівня вибухонебезпеки. Крім того, на теперішній час в Україні є відсутнім єдиний затверджений підхід до розв'язання задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки об'єктів з можливим виникненням та вибухом хмар ГПС.

4. На основі вивчення літературних джерел проведено аналітичний огляд сучасного стану проблеми розробки методів мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічних блоків ГНПП (на етапі проектування) в умовах НС з вибухами хмар ГПС. Результати огляду показали, що найбільш перспективним методом є оптимізація розміщення вибухонебезпечних апаратів блоку.

## РОЗДІЛ 2

### ПОСТАНОВКА ОПТИМІЗАЦІЙНОЇ ЗАДАЧІ МІНІМІЗАЦІЇ РІВНЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕКИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО БЛОКУ ГНПП

В даному розділі здійснена постановка оптимізаційної задачі зниження вибухонебезпечності технологічного блоку ГНПП в умовах НС з утворенням і вибухом хмари ГПС шляхом оптимального розміщення технологічного обладнання в заданій області. Розміщення здійснюється з урахуванням режиму вибуху, характеристик вибухонебезпечних речовин, а також можливості дрейфу хмари ГПС під дією вітру.

Розроблено інтегральний та частковий критерії оцінки вибухонебезпечності технологічного блоку, визначено поняття «центр вибухонебезпечності технологічного блоку».

Досліджено функцію мети оптимізаційної задачі розміщення вибухонебезпечного обладнання блоку, в якості якої виступає інтегральний критерій оцінки вибухонебезпечності технологічного блоку.

Досліджено систему обмежень оптимізаційної задачі розміщення вибухонебезпечного обладнання блоку, яка в загальному випадку включає умови геометричного і технологічного характеру. Проведена формалізація геометричних обмежень з використанням апарату  $\Phi$ -функцій.

Матеріали розділу опубліковані у роботах автора [1, 4, 5, 7, 11, 12, 15].

#### 2.1 Постановка оптимізаційної задачі

Нехай є деяка замкнута область  $\mathcal{R} \subset \mathbb{R}^3$  (технологічний блок), що містить  $I$  об'єктів (технологічних апаратів)  $S_i$ ,  $i=1, 2, \dots, I$ , які мають задану просторову форму і метричні характеристики [121, 122].

В області  $\mathcal{R}$  можуть бути присутніми деякі області, розміщення об'єктів  $S_i$  в яких не допускається. Моделями розглянутих областей виступають нерухомі зони заборон  $T_k$  ( $k=1, 2, \dots, K$ ) із заданою просторовою формою.



Розміщення об'єктів  $S_i$  допускається в деякій під області  $\Omega$  області  $\mathfrak{R}$ :

$$\Omega = (\mathfrak{R}^* \setminus \bigcup_{k=1}^K T_k),$$

де область  $\mathfrak{R}^*$  – проекція області  $\mathfrak{R}$  на  $R^2$ , т.е.  $\mathfrak{R}^* = \text{Pr}_{R^2} \mathfrak{R}$ .

*Зауваження 2.1.* вважатимемо, що об'єкти  $S_i$  розміщуються на земній поверхні ( $z=0$ ), тому область  $\Omega \subset R^2$ .

Зв'яжемо область  $\Omega$  з нерухомою системою координат  $ХОУ$ , а кожен об'єкт  $S_i$  – з рухомою (власною) системою координат  $X_iO_iY_i$ . Позначимо через  $z_i = (x_i, y_i)$  параметри положення рухомої системи координат  $X_iO_iY_i$  (параметри розміщення) відносно нерухомої системи координат  $ХОУ$ ,  $i=1,2,\dots, I$ . У цьому випадку місце розташування множини  $I$  об'єктів  $S_i$  в області  $\Omega$  визначається вектором  $Z$  виду

$$Z = (z_1, z_2, \dots, z_I) = (x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_I, y_I), \quad Z \in R^{2I}.$$

Усюди далі будемо вважати позначення  $S_i$  і  $S_i(x_i, y_i)$  еквівалентними.

Аналогічно, кожену зону заборони (об'єкт  $T_k$ ) зв'яжемо з рухомою системою координат  $X_{kd}O_{kd}Y_{kd}$ . Тоді розташування безлічі  $K$  об'єктів  $T_k$  в області  $\Omega$  визначається вектором  $D$  виду

$$D = (d_1, d_2, \dots, d_K) = (x_{1d}, y_{1d}, x_{2d}, y_{2d}, \dots, x_{Kd}, y_{Kd}), \quad D \in R^{2K}.$$

На кожному з об'єктів  $S_i$  може статися НС з викидом вибухонебезпечної речовини в газоподібній фазі, утворенням хмари ГПС і її подальшим вибухом, в результаті якого можуть бути зруйновані сусідні об'єкти. Нехай  $(x_{Vi}, y_{Vi})$  – координати епіцентру вибуху хмари ГПС, що утворилися в результаті НС на об'єкті  $S_i$ . В цьому випадку вектором  $V$  буде

описуватися розташування епіцентрів вибухів хмар ГПС, що утворилися в результаті НС на об'єктах технологічного блоку

$$B = (x_{B1}, y_{B1}, x_{B2}, y_{B2}, \dots, x_{BN}, y_{BN}). \quad (2.1)$$

Для кількісної характеристики рівня вибухонебезпеки технологічного блоку  $\mathfrak{R}$  введемо інтегральний критерій  $\Lambda$ , який має вигляд:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^I \lambda_i \Lambda_i, \quad (2.2)$$

де  $\Lambda_i$  – частковий критерій, що кількісно характеризує рівень вибухонебезпеки об'єкту  $S_i$  ( $i$ -го технологічного апарату);  $\lambda_i$  – вагова функція об'єкту  $S_i$ , що моделює ступінь вплив вибуху хмари ГПС, яка утворилася при НС на ньому, на сусідні об'єкти  $i=1, 2, \dots, I$ .

У цьому випадку оптимізаційна задача мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку має вигляд:

знайти

$$\min_W \Lambda = \min_W \left( \sum_{i=1}^I \lambda_i \Lambda_i \right), \quad (2.3)$$

де  $W$  – область допустимих рішень задачі.

Визначимо екзогенні параметри моделі (2.3).

## 2.2. Визначення екзогенних параметрів моделі (2.3)

Визначення екзогенних параметрів оптимізаційної моделі (2.3) тобто її параметрична ідентифікація включає в себе [123]:

- ідентифікація функції мети;
- ідентифікація обмежень задачі.

### 2.2.1 Ідентифікація функції мети

Як випливає з аналізу виразу (2.3), цільовою функцією завдання мінімізації рівня вибухонебезпечності технологічного блоку підприємства є величина інтегрального показника  $\Lambda = \Lambda(\Lambda_i, \lambda_i)$ . В якості змінних параметрів, від яких залежить величина  $\Lambda$ , виступають часткові критерії  $\Lambda_i$  і вагові коефіцієнти  $\lambda_i$ , які характеризують ступінь впливу окремих критеріїв  $\Lambda_i$  на загальний рівень вибухонебезпечності технологічного блоку. Таким чином, ідентифікація функції мети задачі вимагає визначення значення часткових критеріїв  $\Lambda_i$ , а також оцінку величин вагових коефіцієнтів  $\lambda_i$ .

#### 2.2.1.1 Визначення часткових критеріїв $\Lambda_i$

Приймаємо, що кожна  $i$ -а одиниця технологічного обладнання (апарату) технологічного блоку ГНПП, що розглядається у даному дослідженні, може бути п'яти типів ( $n = 1, 2, \dots, 5$ ) – колонне ( $n=1$ ), ємнісне ( $n=2$ ), насосне ( $n=3$ ), теплообмінне ( $n=4$ ) та пічне ( $n=5$ ), рівень небезпеки яких є різним. Це обумовлено особливостями технології, кількістю та видом вибухонебезпечних речовин тощо [23].

Вважаємо також, що технологічний блок працює в штатному режимі, якщо усе обладнання справне, а режим НС настає при виході з ладу хоча б одного апарата. В загальному випадку руйнування технологічного апарата супроводжується НС трьох видів ( $k = 1, 2, 3$ ) –вибух, пожежа, викид [23]. Нас буде цікавити НС, що супроводжується викидом вибухонебезпечної речовини та утворенням хмари ГПС з її наступним вибухом.

Вибухове перетворення може відбуватися за двома сценаріями ( $v = 1, 2$ ) – або по детонаційному, або по дефлаграційному механізму.

В відомих джерелах [46-48, 75, 107] для кількісної характеристики вибухонебезпеки технологічного об'єкту застосовується відносний

енергетичний потенціал вибухонебезпеки  $E_B$ .

Відносний енергетичний потенціал вибухонебезпеки  $E_B^i$   $i$ -го технологічного об'єкту залежить від загального енергетичного потенціалу вибухонебезпеки  $E$  та визначається за формулою [67]:

$$E_B^i = \frac{1}{16,534} \sqrt[3]{E}. \quad (2.4)$$

Загальний енергетичний потенціал вибухонебезпеки  $E$  технологічного об'єкту визначається повною енергією згоряння парогазової фази (ПГФ), що перебуває в об'єкті, з урахуванням величини роботи її адіабатичного розширення, а також величини енергії повного згоряння рідкої фази (РФ), що випарувалася з максимально можливої площі її розливу [67]:

$$E = E'_1 + E'_2 + E''_1 + E''_2 + E''_3 + E''_4, \quad (2.5)$$

де  $E$  – загальний енергетичний потенціал вибухонебезпеки або повна енергія ПГФ, що вийшла в навколишнє середовище при аварійній розгерметизації (АРБ), кДж;  $E'_1$  – енергія адіабатичного розширення й згоряння ПГФ, що перебуває безпосередньо в аварійному об'єкті, кДж;  $E'_2$  – енергія згоряння ПГФ, яка поступила до об'єкту, що розгерметизувався, від суміжних об'єктів, кДж;  $E''_1$  – енергія згоряння, що утворюється за рахунок енергії перегріву рідкої фази розглянутого об'єкту та яка поступила від суміжних об'єктів, кДж;  $E''_2$  – енергія згоряння ПГФ, що утворюється із РФ за рахунок тепла екзотермічних реакцій, кДж;  $E''_3$  – енергія згоряння ПГФ, що утворюється з рідкої фази за рахунок притока тепла овід зовнішніх теплоносіїв, кДж;  $E''_4$  – енергія згоряння парогазової хмари, що утворюється із пролітої на тверду поверхню рідкої фази за рахунок тепловідводу від навколишнього середовища, кДж.

Позначення символу параметра одним штрихом відповідає

парогазовим станам середовища, двома штрихами – рідким середовищам.

При цьому вважається, що [67]:

- при аварійній розгерметизації апарата (об'єкта) відбувається його повне розкриття (руйнування);
- площа розливу рідини визначається, виходячи з конструктивних рішень будинків або майданчика зовнішньої установки;
- час випару приймається не більш 1 години.

У даному дослідженні розглядається НС з руйнуванням технологічного апарата (об'єкта) та викидом у навколишнє середовище газоподібної вибухонебезпечної речовини. Тому компоненти формули (2.5), які відповідають рідкій фазі, вважаються відсутніми, тобто

$$E''_1, E''_2, E''_3 \text{ та } E''_4 = 0.$$

Для обчислення величини часткового критерію  $\Lambda_i$  у дисертації пропонується використання наступної формули [4]:

$$\Lambda_i = E_B^i \cdot Q_{\text{НС}}^{\text{in}} \cdot Q_B^{\text{in}} \cdot q_{iv}, \quad n \in \{1, 2, \dots, 5\}, \quad v \in \{1, 2\}, \quad (2.6)$$

де  $Q_{\text{НС}}^{\text{in}}$  – ймовірність виникнення НС, яка супроводжується викидом вибухонебезпечної речовини та виникненням хмари ГПС, на  $i$ -му технологічному обладнанні  $n$ -го типу;  $Q_B^{\text{in}}$  – ймовірність вибухового перетворення хмари ГПС, яка виникла при НС на  $i$ -му технологічному обладнанні  $n$ -го типу,  $q_{iv}$  – ймовірність реалізації сценарію вибухового перетворення.

Для визначення величини  $Q_{\text{НС}}^{\text{in}}$  необхідно виявити НС, що тягнуть за собою реалізацію небезпеки вибуху, і визначити кількісні значення ймовірностей  $Q_B^{\text{in}}$  і  $q_{iv}$ .

Дані зарубіжних і вітчизняних джерел [23, 73, 75] свідчать про те, що аварії на об'єктах газонафтопереробки (що містять велику кількість легкозаймистих рідин, займистих і зріджених газів), що призводять до утворення хмари ГПС з її подальшим вибухом, пов'язані в основному: з розгерметизацією технологічного обладнання, викидом і витоком вибухонебезпечних продуктів.

Для оцінки ймовірності зазначених НС доцільно було б використовувати дані, які відносяться безпосередньо до даного об'єкту, а не середньостатистичні. Але даних про НС на більшості об'єктів або мало, або вони відсутні. Тому для цих цілей застосовують різні статистичні методи, зокрема метод «дерев відмови» [102-104].

При побудові «дерева відмов» використовуються дані найближчих аналогів обладнання з літератури. Побудови починаються з кінцевої результуючої події (вибух), яке розташовується в вершині дерева, і включає в себе визначення небажаної події, виявлення логічного взаємозв'язку подій, здатних привести до відмови системи, вивчення можливої поведінки системи.

Події, що становлять блок схему аварійних сценаріїв і окремі її гілки, з'єднуються між собою логічними символами «і», «або», «ні».

У цьому випадку ймовірність виникнення НС визначається в результаті обробки статистичних даних щодо розподілу надзвичайних ситуацій вказаного характеру для технологічних апаратів одного типу, які функціонують у приблизно в однакових умовах.

У табл. 2.1 наведені усереднені дані [71] про ймовірності виникнення НС з викидом вибухонебезпечної хімічної речовини для технологічного обладнання ГПП.

Основну небезпеку при НС на технологічному обладнанні ГНПП являють викиди стислих або скраплених вуглеводних газів. Як показують статистичні дослідження, при миттєвих викидах вуглеводнів горіння та вибух відбуваються практично завжди [4, 98].

Таблиця 2.1 – Оцінка ймовірності виникнення НС з викидом вибухонебезпечної хімічної речовини на обладнанні ГПП в залежності від типу п

Номер обладнання, п	Тип обладнання	$\cdot Q_{\text{НС}}^{\text{in}}, \text{ рік}^{-1}$
1	Теплообмінне	$1,02 \cdot 10^{-4}$
2	Ємнісне	$1,1 \cdot 10^{-4}$
3	Колонне	$1,3 \cdot 10^{-4}$
4	Пічне	$1,8 \cdot 10^{-4}$
5	Насосне	$1,88 \cdot 10^{-4}$

У табл. 2.2 наведено оцінку [59, 72] ймовірності різних сценаріїв розвитку НС при руйнуванні технологічного обладнання ГНПП, яке містить стислі вуглеводневі гази.

Таблиця 2.2 – Оцінка ймовірності розвитку НС при руйнуванні обладнання ГНПП, яке містить стислі вуглеводневі гази

Вид НС, k	Ймовірність виникнення НС виду k	Сценарій розвитку НС, j	$q_{iv}$
<b>Вибух (k=1)</b>	<b>0,265</b>	<b>Детонаційний вибух</b>	<b>0,0638</b>
		<b>Дефлаграційний вибух</b>	<b>0,9362</b>
Пожежа (k=2)	0,7058	Вогняна куля	0,8770
		Факельне горіння	0,1230
Викид (k=3)	0,0292	Без горіння та вибуху	1,00

Останній стовпчик табл. 2.2 містить ймовірності  $q_{iv}$  виникнення при реалізації НС визначених типів того чи іншого сценарію розвитку НС на  $i$ -му обладнанні.

Таким чином, для обладнання ГНПП ймовірність  $Q_{НС}^1$  вибухового перетворення хмари ГПС, яка виникла при НС з викидом стислого вуглеводневого газу дорівнює  $Q_{НС}^1 = 0,265$ . При цьому, наприклад, ймовірності  $q_{1v}$ , які визначають ймовірність протікання вибуху за детонаційним ( $q_{11}$ ) або дефлаграційним ( $q_{12}$ ) механізмом, дорівнюють 0,0638 та 0,9362 відповідно.

#### 2.2.1.2 Визначення вагових функцій $\lambda_i$

Вагові функції  $\lambda_i$  моделюють ступінь вплив вибуху хмари ГПС, яка утворилася в результаті НС на  $i$ -му технологічному апараті, на сусіднє обладнання та визначаються як [5]

$$\lambda_i = 1 + \sum_{j=1}^J \alpha_{ij} k_{ij}, \quad (2.7)$$

де  $J$  – кількість одиниць технологічного обладнання (апаратів), яке було повністю зруйновано або пошкоджено в результаті вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на  $i$ -му обладнанні;  $k_{ij}$  – коефіцієнт, що визначає ймовірність повного руйнування  $j$ -го технологічного обладнання (апарата) від вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на  $i$ -му обладнанні;  $\alpha_{ij}$  – коефіцієнт, що враховує ступінь впливу ударної хвилі від вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на  $i$ -му обладнанні, на інші технологічні апарати.

#### **Визначення коефіцієнтів $k_{ij}$ .**

Коефіцієнти  $k_{ij}$  обчислюються наступним чином:



$$k_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } L_{ij} \leq R_i^{100}, \\ p_{ij}, & \text{якщо } R_i^0 \geq L_{ij} \geq R_i^{100}, \\ 0, & \text{якщо } L_{ij} \geq R_i^0, \end{cases} \quad (2.8)$$

де  $R_i^{100}$  – радіус зони повних (100%) руйнувань від вибуху хмари ГПС, що утворилася при НС на  $i$ -му обладнанні, м;  $R_i^0$  – радіус безпечної зони від вибуху хмари ГПС при НС на  $i$ -му обладнанні, м;  $L_{ij}$  – відстань між центром  $j$ -го технологічного обладнання та центром вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на  $i$ -му обладнанні;  $p_{ij}$  – ймовірність повного руйнування  $j$ -го технологічного обладнання від вибуху хмари ГПС при НС на  $i$ -му обладнанні.

Зоною руйнування під час вибуху хмари ГПС, що утворився при НС на  $i$ -му об'єкті, вважається площа з кордоном, яка визначається радіусом  $R_i^0$ , центром якої є епіцентр вибуху хмари ГПС.

Усередині зони руйнування виділяється кілька зон, що характеризуються різним ступенем ушкоджень будівель і технологічних установок. Межі кожної зони характеризуються значеннями надлишкових тисків  $\Delta P$  [кПа] по фронту ударної хвилі і безрозмірним характеристичним коефіцієнтом  $K$ . Класифікація зазначених зон приведена в таблиці 2.3 [47].

Таблиця 2.3 – Класифікація зон руйнування при вибухах

Категорія пошкодження	Характеристика пошкодження	$\Delta P$ , кПа	$K$
А	повне	100,00	3,80
В	сильне	70,00	5,60
С	середнє	28,00	9,60
Д	слабке	14,00	28,00
Е	руйнування скління	2,00	56,00

Для можливості визначення величини коефіцієнта  $K$  на всьому діапазоні зміни надлишкового тиску у фронті вибуху, а не тільки у реперних точках, які відповідають границям зон руйнування, наведених у табл. 2.3, була проведена процедура інтерполяції та отримана аналітична залежність коефіцієнта  $K$  від значення надлишкового тиску  $K = K(\Delta P)$ :

$$K = \begin{cases} 111,05(\Delta P)^{-0,726}, & \text{якщо } 28 \leq \Delta P \leq 100, \\ a(\Delta P)^3 + b(\Delta P)^2 - c\Delta P + d, & \text{якщо } 2 \leq \Delta P < 28, \end{cases} \quad (2.9)$$

де коефіцієнти  $a = -2,26 \cdot 10^{-4}$ ,  $b = 0,0498$ ,  $c = -3,0678$ ,  $d = 61,922$ .

Графік залежності  $K = K(\Delta P)$  наведений на рис. 2.1.

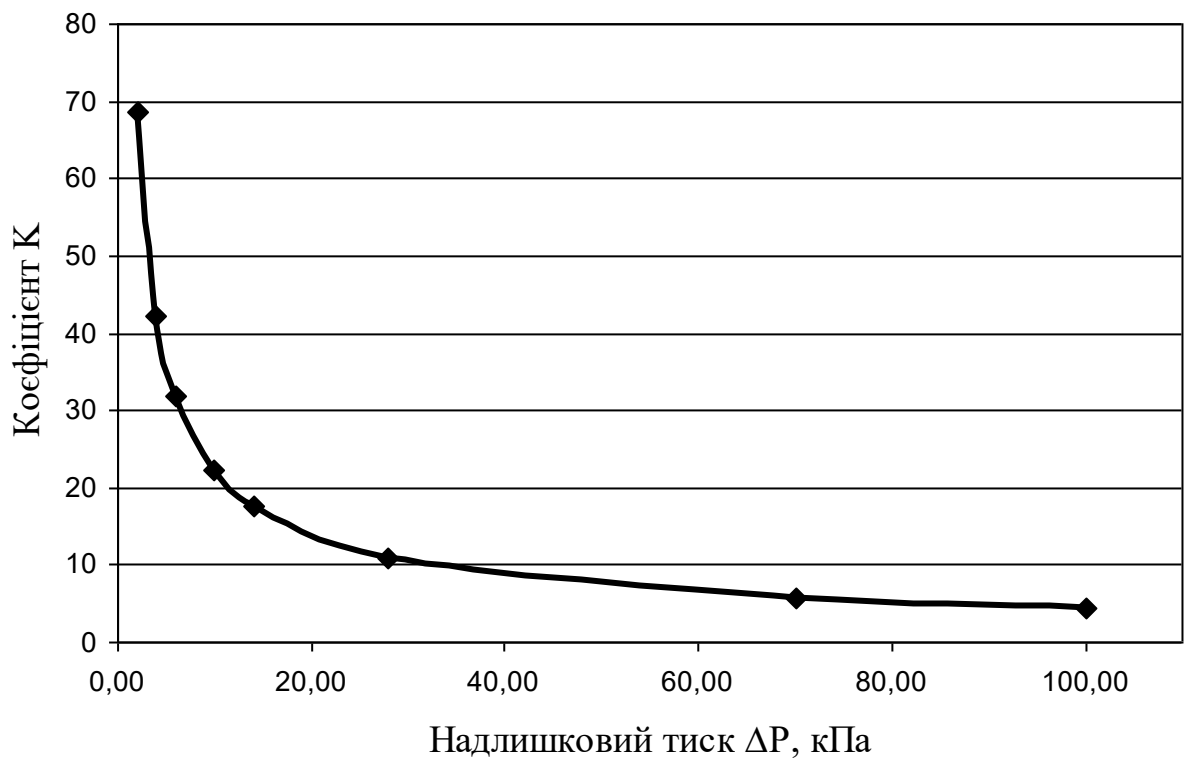


Рисунок 2.1 – Графік залежності коефіцієнта  $K$  від значення надлишкового тиску вибуху хмари ГПС

Процедура кускової інтерполяції була проведена за допомогою нелінійного методу найменших квадратів (МНК), який застосовано на виділених інтервалах значень  $\Delta P$ . При цьому забезпечується, що у точці

розриву при  $\Delta P = 28$  значення побудованих апроксимуючих функцій збігаються з точністю до  $10^{-4}$ .

Визначення коефіцієнтів детермінації  $R_{1,2}^2 > 0,96$  для наведених апроксимуючих функцій (2.8) свідчить про достатньо високу достовірність наближення.

Таким чином, для визначення множини  $k_{ij}$  необхідно знайти радіуси  $R_i^{100}$  зони повних руйнувань та  $R_i^0$  безпечної зони від вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на  $i$ -му обладнанні.

Згідно рекомендацій [47, 48] для оцінки рівня впливу вибуху можливо використання тротилового еквіваленту, а обчислення радіусів зон ураження виконується за наступною формулою:

$$R_i = \frac{KW_i^{1/3}}{\left(1 + \left(\frac{3180}{W_i}\right)^2\right)^{1/6}}, \quad (2.10)$$

де  $W_i$  – тротильовий еквівалент вибуху хмари ГПС, кг.

Як свідчить (2.8), для  $j$ -го технологічного обладнання, що знаходиться від епіцентру вибуху хмари ГПС на відстані  $L_{ij}$ , яке задовольняє умові  $R_i^0 \geq L_{ij} \geq R_i^{100}$ , значення коефіцієнтів  $k_{ij}$  дорівнюють ймовірностям  $p_{ij}$  повного руйнування  $j$ -го технологічного обладнання від вибуху хмари ГПС при НС на  $i$ -му обладнанні та обчислюються на основі параметрів вибуху та відстані  $L_{ij}$  з використанням пробіт-функції [47]:

$$k_{ij} = p_{ij} = f [Pr_2(\Delta P, I_B, L_{ij})], \quad (2.11)$$

де  $I_B$  – імпульс хвилі тиску вибуху, Па·с;

Згідно [47, 74], пробіт-функція  $Pr_2$ , яка визначає оцінку ймовірності

повного руйнування промислових будівель, споруд та зовнішнього технологічного обладнання у результаті вибуху (залишки підлягають зносу) визначається як

$$Pr_2 = 5 - 0,22 \ln V_2. \quad (2.12)$$

Фактор  $V_2$  розраховується за формулою:

$$V_2 = (40000/\Delta P_{ij})^{7,4} + (460/L_{ij})^{11,3}. \quad (2.13)$$

Після визначення пробіт-функцій знаходяться ймовірності  $p_{ij}$  згідно з даними [47, табл. 3].

Відмітимо, що узагальнено ймовірність  $p_{ij}$  є оберненою нелінійною функцією відстані  $L_{ij}$  між об'єктами  $i$  та  $j$ .

#### **Визначення коефіцієнтів $\alpha_{ij}$ .**

Коефіцієнти  $\alpha_{ij}$  впливу ударної хвилі вибуху хмари ГПС, що утворилася при НС на  $i$ -му технологічному обладнанні на сусідні технологічні об'єкти, величина якого залежить від взаємної орієнтації об'єктів  $i$  та  $j$ , обчислюються з наступних міркувань:

##### *1). Для об'єктів у формі паралелепіпеду*

- найбільш небезпечній орієнтації стіни  $j$ -го об'єкту по нормалі до напрямку розповсюдження ударної хвилі вибуху на  $i$ -му об'єкті відповідає найбільше значення  $\alpha_{ij}^{\max} = 1,1$ . Таке ж значення  $\alpha_{ij}$  буде відповідати куту  $\theta=0$ , тому що при цьому суміжна стіна буде орієнтована по нормалі до напрямку розповсюдження ударної хвилі вибуху;
- найбільш безпечній орієнтації стіни  $j$ -го об'єкту під кутом  $\theta=45^\circ$  до напрямку розповсюдження ударної хвилі вибуху на  $i$ -му об'єкті відповідає найменше значення  $\alpha_{ij}^{\min} = 0,9$ ;

- для інших значень кута  $\theta$  величина  $\alpha_{ij}$  має проміжні значення.

2). Для об'єктів сферичної та циліндричної форми

- значення коефіцієнту  $\alpha_{ij}$  не залежить від кута  $\theta$  та дорівнює  $\alpha_{ij}=1,0$ .

Для кількісного визначення величини коефіцієнтів  $\alpha_{ij}$  у першому випадку пропонується застосування або тригонометричної залежності

$$\alpha_{ij}(\theta) = 2,1 - (\sin\theta + \cos\theta) + 0,22\sin(2\theta), \quad (2.14)$$

або поліноміальної залежності

$$\alpha_{ij}(\theta) = 0,0001 \theta^2 - 0,0078 \theta + 1,114. \quad (2.15)$$

Точність визначення коефіцієнтів  $\alpha_{ij}$  для об'єктів у формі паралелепіпеду при застосуванні формул (2.16) або (2.17) майже не відрізняється.

### 2.2.1.3 Визначення енергетичного центру вибухонебезпеки технологічного блоку

Коефіцієнти  $\alpha_{ij}$  характеризують вплив вибуху хмари ГПС на  $i$ -му технологічному об'єкті блоку на  $j$ -й технологічний об'єкт. Але вибух може статися і на інших технологічних об'єктах  $S_i$ ,  $i \neq j$ , з визначеною долею ймовірності – одночасно. Тому для  $j$ -го об'єкту знаходиться множина з  $(I-1)$  коефіцієнтів  $\alpha_{ij}$ ,  $i \neq j$ . Орієнтація технологічного об'єкту  $S_j$  по відношенню до інших об'єктів є різною, що ускладнює процедуру пошуку найбільш безпечної його орієнтації.

Для зниження впливу вибуху на технологічний об'єкт  $S_j$  необхідно визначити його орієнтацію по відношенню до джерела найбільшої вибухонебезпеки з урахуванням можливості одночасного вибуху на кількох

технологічних об'єктах. Для вирішення цієї проблеми і [107] введено поняття «центр енергопотенціалів». При цьому були прийняті наступні припущення:

- координати епіцентру вибуху співпадали з координатами центру технологічного об'єкту;
- кількісною характеристикою вибухонебезпеки технологічного об'єкту був його відносний енергетичний потенціал, тобто розглядався випадок детонаційного вибуху усєї кількості небезпечної речовини об'єкту.

Таким чином, не враховувалися можливості утворення хмари ГПС та її дрейфу і розсіювання під дією вітру, що призводить до суттєвого зменшення потужності вибуху.

У даному дослідженні при визначенні величини впливу вибуху при виникненні НС на і-му технологічному обладнанні (апараті),  $i=1, 2, \dots, I$ , замість відносного енергетичного потенціалу пропонується застосовувати величину ефективного енергетичного запасу  $E_{ix}$  [Дж] хмари ГПС, що виникла при НС на і-му технологічному обладнанні.

Визначення  $E_{ix}$  виконується за формулою:

$$E_{ix} = 2M_{vi} q_{vi}, \text{ якщо } c_{cti} \geq c_{ti} \quad (2.16)$$

або

$$E_{ix} = 2M_{vi} q_{vi} c_{cti} / c_{ti}, \text{ якщо } c_{cti} < c_{ti}, \quad (2.17)$$

де  $M_{vi}$  – маса вибухонебезпечної речовини у хмарі, яка бере участь у вибуховому перетворенні, кг;  $q_{vi}$  – питома теплота згорання (вибуху) вибухонебезпечної речовини, Дж·кг<sup>-1</sup>;  $c_{ti}$  – середня концентрація вибухонебезпечної речовини у хмарі, кг·м<sup>-3</sup>;  $c_{cti}$  – стехіометрична концентрація вибухонебезпечної речовини в суміші з повітрям, кг·м<sup>-3</sup>.

Тому замість «центру енергопотенціалів» у даному дисертаційному дослідженні пропонується ввести поняття «енергетичного центру вибухонебезпеки технологічного блоку» (ЕЦ).

Координати  $(X_{\text{ЕЦ}}, Y_{\text{ЕЦ}})$  «енергетичного центру вибухонебезпеки технологічного блоку» обчислюються за наступними формулами:

$$X_{\text{ЕЦ}} = \frac{\sum_{i=1}^I x_{ei} E_{ix}}{\sum_{i=1}^I E_{ix}}; \quad Y_{\text{ЕЦ}} = \frac{\sum_{i=1}^I y_{ei} E_{ix}}{\sum_{i=1}^I E_{ix}}, \quad (2.18)$$

де  $(x_{ei}, y_{ei})$  – координати епіцентру вибуху хмари ГПС, яка виникла при НС на  $i$ -му об'єкті.

При визначенні найбільш безпечної орієнтації технологічного об'єкту  $S_i$ , який має форму паралелепіпеду, відносно дії можливого вибуху (незалежно від того, на якому з технологічних об'єктів блоку виникла НС) його необхідно розмістити під кутом  $\theta \approx 45^\circ$  до напрямку вектору, що з'єднує центр  $S_i$  з ЕЦ.

#### Приклад 2.1.

Розглянемо приклад визначення положення енергетичного центру вибухонебезпеки технологічного блоку, який складається з 3 технологічних об'єктів. Характеристики блоку наведені у табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Характеристики технологічного блоку

Характеристики блоку		Технологічні об'єкти, $i$		
		1	2	3
Координати епіцентру вибуху хмари ГПС, яка виникла при НС на $i$ -му об'єкті	$X_{\text{ЕВ}i}$	10	180	190
	$Y_{\text{ЕВ}i}$	132	10	120
Ефективний енергетичний запас хмари ГПС на $i$ -му об'єкті	$E_{ix}$	10	20	30

Координати енергетичного центру вибухонебезпеки технологічного блоку, визначені за формулою (2.15) по даним табл. 2.4, мають вигляд

$$X_{\text{ЕЦ}} = 157;$$

$$Y_{\text{ЕЦ}} = 85.$$

Графічна інтерпретація розрахунків наведена на рис. 2.2.

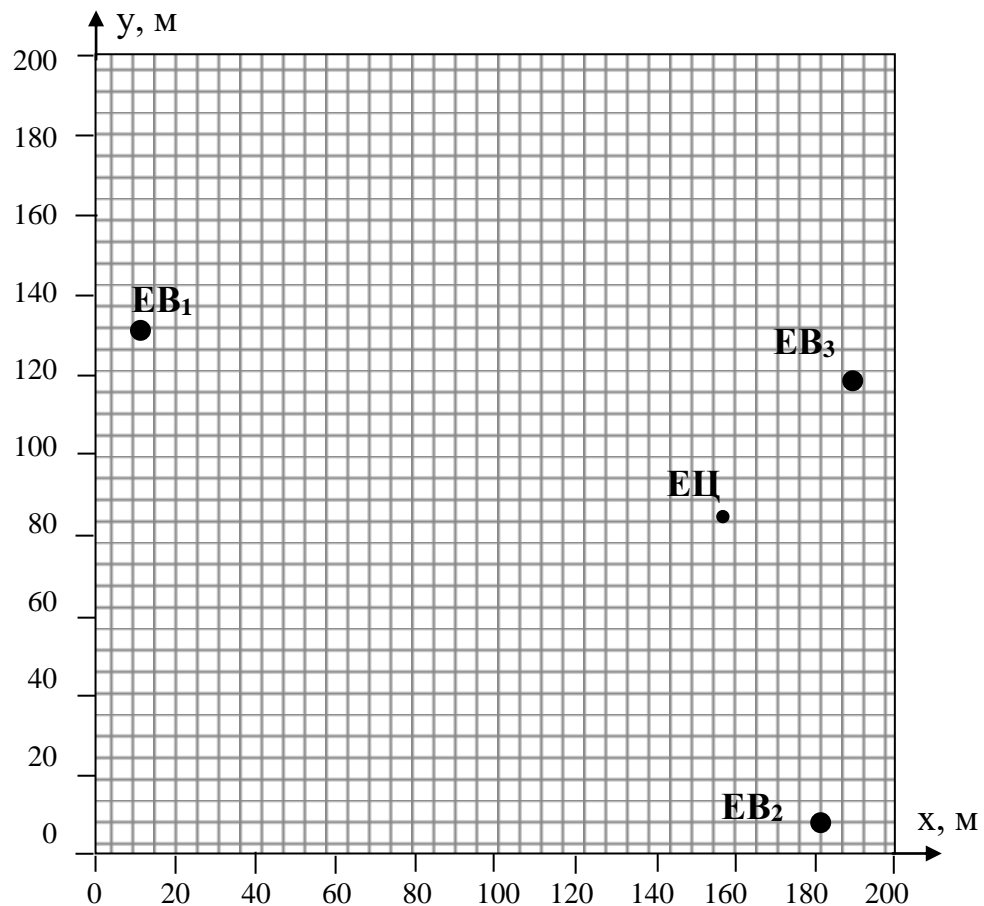


Рисунок 2.2 – Результати розрахунку координат ЕЦ для прикладу 2.1.

Використовуючи поняття «енергетичного центру вибухонебезпеки технологічного блоку», можна визначити найбільш безпечну орієнтацію об'єкта, що знаходиться поза зоною повних руйнувань. Такою орієнтацією буде розміщення стін об'єкта під кутом  $45^\circ$  до напрямку на ЕЦ.



### 2.2.1.4 Розрахунок параметрів вибуху хмари ГПС

Аналіз (2.7), (2.10), (2.13)–(2.14) свідчить, що для визначення критеріїв  $\Lambda_i$  та  $\Lambda$  необхідно розрахувати параметри вибуху хмари ГПС, що утворилася при НС на  $i$ -му технологічному обладнанні.

Розрахунок основних параметрів вибуху хмари ГПС – надлишкового тиску у фронті  $\Delta P$  та імпульсу хвилі тиску  $I_B$  – проведемо відповідно до рекомендацій [47, 48, 128]. Розрахунок виконується у наступній послідовності.

1). Визначення ефективного енергетичного запасу  $E_{ix}$  хмари ГПС, що виникла при НС на  $i$ -му обладнанні за формулами (2.16) або (2.17):

$$E_{ix} = 2M_{vi} q_{vi}, \text{ якщо } c_{cti} \geq c_{vi},$$

$$E_{ix} = 2M_{vi} q_{vi} c_{ct}/c_v, \text{ якщо } c_{cti} < c_{vi}.$$

Маса  $M_{vi}$  вибухонебезпечної речовини у хмарі, яка бере участь у вибуху, може задаватися у якості початкового параметра, або визначається згідно з [47] як

$$M_{vi} = \frac{1}{3} \iiint_{V_{vi}} c_{vi}(x, y, z, t) dx dy dz. \quad (2.19)$$

Об'єм  $V_{vi}$  ( $m^3$ ) хмари, де можливе займання і вибух вибухонебезпечної речовини, є область в просторі, що обмежена поверхнями  $S_{vi}$  та  $S_{Hi}$ , на яких досягаються концентрації газоподібної вибухонебезпечної речовини  $c_{вкмппі}$  та  $c_{нкмппі}$ , де  $c_{вкмппі}$ ,  $c_{нкмппі}$  – відповідно верхня та нижня концентраційні межі поширення полум'я,  $кг \cdot м^{-3}$ .

2). Розрахунок швидкості фронту полум'я  $v_{fi}$  ( $м/с$ ) при вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на  $i$ -му обладнанні, проводиться згідно

рекомендацій [47, табл. 2] в залежності від класу горючої речовини та рівня забудови оточуючого простору.

3). Визначення режиму вибухового перетворення (детонаційний або дефлаграційний) проводиться згідно рекомендацій [47, табл. 2] в залежності від швидкості фронту полум'я.

4). Визначення безрозмірних відстаней  $R_{ji}$  (м) від центру хмари ГПС, що виникла при НС на  $i$ -му технологічному обладнанні, до сусідніх об'єктів:

$$R_{ji} = r_{ji} / (E_{ix} / P_0)^{1/3}, \quad (2.20)$$

де  $r_{ji}$  – відстань від  $j$ -го об'єкту до центру хмари ГПС, що вибухає на  $i$ -му об'єкті, м;  $P_0$  – нормальний атмосферний тиск,  $P_0 = 1,01 \cdot 10^5$  Па.

Центр хмари ГПС (епіцентр вибуху) визначається як точка у середині відрізка, що з'єднує джерело викиду ( $i$ -те технологічне обладнання) з найбільш віддаленою точкою хмари, в якій спостерігається концентрація горючої речовини  $c_{нкмппі}$ .

5). Розрахунок основних параметрів вибуху хмари ГПС, до яких відносяться параметри повітряних ударних хвиль вибуху – надмірний тиск  $\Delta P$  і імпульс хвилі тиску  $I$ :

- визначення безрозмірних величин тиску  $P_{1ji}$  і імпульсу  $i_{1ji}$  для дефлаграційного вибуху для всіх об'єктів ( $j = 1, 2, \dots, I-1; j \neq i$ ):

$$P_{1ji} = \frac{v_r^2}{v_{зв}^2} \cdot \frac{\sigma - 1}{\sigma} \left( \frac{0,83}{R_{ji}} - \frac{0,14}{R_{ji}^2} \right), \quad (2.21)$$

$$i_{1ji} = \frac{v_r}{v_{зв}} \cdot \frac{\sigma - 1}{\sigma} \left( 1 - \frac{0,4v_r}{v_{зв}} - \frac{\sigma - 1}{\sigma} \right) \left( 1 - \frac{0,06}{R_{ji}} + \frac{0,01}{R_{ji}^2} - \frac{0,0025}{R_{ji}^3} \right),$$

де  $v_{зв}$  – швидкість звуку у повітрі,  $v_{зв} = 340$  м/с;  $\sigma$  – безрозмірний параметр, для газоповітряних сумішей  $\sigma = 7$ .

- визначення величин безрозмірного тиску  $P_{2ji}$  і безрозмірного імпульсу  $i_{2ji}$  для детонаційного вибуху для всіх об'єктів ( $j = 1, 2, \dots, I-1; j \neq i$ ):

$$P_{2ji} = \exp(-1,1240 - 1,660 \cdot \ln R_{ji} + 0,2600 \cdot \ln^2 R_{ji}), \quad (2.22)$$

$$i_{2ji} = \exp(-3,4217 - 0,898 \cdot \ln R_{ji} - 0,0096 \cdot \ln^2 R_{ji}). \quad (2.23)$$

- визначення остаточних величин безрозмірних тиску  $P_{ji}$  і імпульсу  $I_{ji}$  для всіх об'єктів (2.11) в залежності від режиму вибуху:

$$(P_{ji}, I_{ji}) = \begin{cases} \text{детонаційний} & P_{ji} = P_{2ji}, \quad I_{ji} = I_{2ji}, \\ \text{дефлаграційний} & P_{ji} = P_{2ji}, \quad I_{ji} = I_{2ji}. \end{cases} \quad (2.24)$$

- визначення розмірних величин надлишкового тиску  $\Delta P_{ij}$  (Па) і імпульсу  $I_{ij}$  (Па·с) в повітряній ударній хвилі для всіх об'єктів:

$$\Delta P_{ij} = P_{ij} \cdot P_0, \quad I_{ij} = \frac{i_{ij}}{V_{3B}} \cdot P_0^{2/3} E_{ix}^{1/3}. \quad (2.25)$$

б). Розрахунок параметрів зон ураження, до яких відносяться величини радіусів  $R_i^{100}$  зони повних руйнувань та  $R_i^0$  безпечної зони. Згідно рекомендацій [47, 48] для обчислення радіусів зон ураження можливо використання формули (2.10):

$$R_i = \frac{KW_i^{1/3}}{\left(1 + \left(\frac{3180}{W_i}\right)^2\right)^{1/6}}.$$

Безрозмірний характеристичний коефіцієнт  $K$  для границі зони повних

руйнувань має значення  $K^{100} = 3,8$  ( $\Delta P = 100$  кПа), для границі безпечної зони він дорівнює  $K^0 = 42$  ( $\Delta P = 5$  кПа) [47, 48].

Троїловий еквівалент вибуху хмари ГПС визначається як

$$W_i = \frac{0,4q_{vi}}{0,9q_T} M_{vi}. \quad (2.26)$$

де  $q_T$  – питома енергія вибуху тротилу, Дж·кг<sup>-1</sup>,  $q_T = 1,52 \cdot 10^6$  Дж·кг<sup>-1</sup>.

Визначення параметрів вибуху хмари ГПС дає змогу оцінити вплив НС на сусідні технологічні об'єкти блоку.

### 2.2.2 Ідентифікація обмежень оптимізаційної задачі

Область  $W$  допустимих рішень задачі містить систему геометричних та технологічних обмежень [119, 120, 124, 125]:  $W = W_G \cup W_T$ .

#### Геометричні обмеження $W_G$ :

- умови взаємного неперетину зон  $S_i$  та  $S_j$ , які зайняті  $i$ -м та  $j$ -м технологічними апаратами (обладнанням)

$$\text{int } S_i \cap \text{int } S_j = \emptyset, \quad i, j = \overline{1, I}, \quad i \neq j, \quad (2.27)$$

де  $\text{int } S_i$  – множина внутрішніх точок зони  $i$ -го технологічного обладнання;

- умови неперетину зон  $S_i$ , які зайняті технологічним обладнанням, з областями, де розміщення обладнання є неприпустимим. Моделями таких областей виступають (див. пп. 2.1) нерухомі зони заборони  $T_k$  з заданою просторовою формою:

$$\text{int } S_i \cap \text{int } T_k = \emptyset, \quad i = \overline{1, I}, \quad k = \overline{1, K}, \quad (2.28)$$

де  $K$  – кількість зон заборони.

У якості зон  $Z_n$  можуть виступати ділянки, по яких проходять під'їзні шляхи, мережі інженерних комунікацій тощо;

- умови приналежності зон  $S_i$  технологічному блоку (розміщення зон  $S_i$  в межах території технологічного блоку):

$$\text{int } S_i \cap \text{int } \Omega^* = \emptyset, \quad (2.29)$$

де область  $\Omega^* = \text{cl} (R^2 \setminus \Omega)$ ; символ  $\text{cl}$  – це замикання точкової множини  $S_i$ .

### Технологічні обмеження $W_T$ :

- обмеженнями на максимальні (мінімальні) допустимі відстані між технологічним обладнанням  $S_i$  та  $S_j$  блоку

$$\left[ (x_m - x_k)^2 + (y_m - y_k)^2 \right]^{1/2} = r_{mk}, \quad (2.30)$$

$$\left[ (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \right]^{1/2} \leq (\geq) r_{ij}, \quad (2.31)$$

де  $r_{ij}$ ,  $r_{mk}$  – максимальні (мінімальні) допустимі відстані між технологічним обладнанням блоку;  $(x_k, y_k)$  – координати центру технологічного обладнання  $S_k$  – довільної точки в межах зони  $S_k$ , зайнятої  $k$ -м технологічним обладнанням (параметри розміщення), яка є центром його власної системи координат;

- обмеження на максимальну (мінімальну) допустиму довжину лінійного технологічного обладнання (продуктопроводів та інших інженерних комунікацій), яке зв'язує технологічні апарати  $S_i$  та  $S_j$  блоку

$$l_{ij}^t \leq (\geq) L_{ij}^t, \quad i = \overline{1, I}, \quad j = \overline{1, J}, \quad t = \overline{1, T}, \quad (2.32)$$

де  $l_{ij}^t$  – довжина лінійно-технологічного обладнання (ЛТО) між  $S_i$  та  $S_j$ , м;  $L_{ij}^t$  – максимальна (мінімальна) допустима довжина ЛТО між  $S_i$  та  $S_j$ , м;

$T$  – кількість видів ЛТО між  $S_i$  та  $S_j$ ;

- обмеження на максимальну (мінімальну) допустиму відстань між технологічним обладнанням  $S_i$  та об'єктами інженерної інфраструктури (II) підприємства (під'їзними шляхами, енергетичною мережею тощо)

$$d_i^q \leq (\geq) D_i^q, \quad i = \overline{1, I}, \quad q = \overline{1, Q}, \quad (2.33)$$

де  $d_i^q$  – відстань між  $S_i$  та об'єктами II підприємства, м;  $D_i^q$  – максимальна (мінімальна) допустима відстань між  $S_i$  та об'єктами II підприємства, м;  $Q$  – кількість об'єктів II підприємства, до яких необхідно підключення  $S_i$ .

*Зауваження 2.1.* Наявність в системі  $W_T$  обмежень-рівностей (2.30) обумовлена неможливістю у деяких випадках зміни відстаней між технологічним обладнанням блоку.

### 2.2.2.1 Формалізація геометричних обмежень

Для формалізації геометричних обмежень (2.27) – (2.28) задачі використовуємо поняття  $\Phi$ -функції двох геометричних об'єктів [126, 127].

$\Phi$ -функція пари довільних об'єктів  $S_i$  і  $S_j$  дозволяє формально визначити міру близькості, а також міру перетину об'єктів  $S_i$  і  $S_j$  в залежності від значень їх параметрів розміщення.

Відзначимо основні властивості  $\Phi$ -функції об'єктів  $S_i$  і  $S_j$  [126, 127]:

- $\Phi_{ij}(x_i, y_i, x_j, y_j) > 0$ , якщо  $cl S_i(x_i, y_i) \cap cl S_j(x_j, y_j) = \emptyset$ ; (2.34)

- $\Phi_{ij}(x_i, y_i, x_j, y_j) = 0$ , якщо  $cl S_i(x_i, y_i) \cap cl S_j(x_j, y_j) \neq \emptyset$ ,  
 $int S_i(x_i, y_i) \cap int S_j(x_j, y_j) = \emptyset$ ; (2.35)

- $\Phi_{ij}(x_i, y_i, x_j, y_j) < 0$ , якщо  $int S_i(x_i, y_i) \cap int S_j(x_j, y_j) \neq \emptyset$ , (2.36)

де  $\Phi_{ij}$  –  $\Phi$ -функція двох геометричних об'єктів  $S_i$  і  $S_j$ , мають параметри розміщення  $(x_i, y_i)$  і  $(x_j, y_j)$  відповідно.

Отже,  $\Phi$ -функція дозволяє описувати умови попарного неперетину (2.34), торкання (2.35) і перетину (2.36) відповідних геометричних об'єктів. Використовуючи поняття  $\Phi$ -функції, умови (2.27) - (2.29) можна представити у вигляді [126, 127]:

$$\Phi_{S_{ij}}(x_i, y_i, x_j, y_j) > 0, \quad (2.37)$$

$$\Phi_{Z_{in}}(x_i, y_i, x_n, y_n) > 0. \quad (2.38)$$

$$\Phi_{i0}(x_i, y_i, m_0) = 0, \quad (2.39)$$

де  $\Phi$ -функція  $\Phi_{S_{ij}}$  (2.37) описує умови попарного неперетину об'єктів  $S_i$  і  $S_j$ ,  $\Phi$ -функція  $\Phi_{Z_{in}}$  (2.38) – умови неперетину об'єктів  $S_i$  з областями заборони, де розміщення обладнання є неприпустимим,  $\Phi$ -функція  $\Phi_{i0}$  (2.39) – умови приналежності об'єктів  $S_i$  межах технологічному блоку,  $m_0$  – метричні характеристики границі технологічного блоку.

Поверхня, яка визначається рівнянням

$$\Phi_{12}(x_1, y_1, x_2, y_2) = 0,$$

називається поверхнею 0-рівня  $\Phi$ -функції об'єктів  $S_1$  і  $S_2$  [126, 127].

2.2.3 Особливості оптимізаційної задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку

З урахуванням (2.6) – (2.15) вираз для цільового критерію  $\Lambda$  запишеться наступним чином

$$\Lambda = \sum_{i=1}^I \Lambda_i + \sum_{i=1}^I \Lambda_i \sum_{j=1}^J \alpha_{ij} k_{ij}, \quad (2.40)$$

а оптимізаційна задача (2.3) мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку буде мати вигляд:

знайти

$$\min_W \Lambda = \min_W \left( \sum_{i=1}^I \lambda_i \Lambda_i \right) = \min_W \left( \sum_{i=1}^I \Lambda_i + \sum_{i=1}^I \Lambda_i \sum_{j=1}^J \alpha_{ij} k_{ij} \right). \quad (2.41)$$

Аналіз цільового критерію оптимізаційної задачі свідчить, що перший доданок у виразі (2.40) є постійною величиною:

$$\sum_{i=1}^I \Lambda_i = \text{const},$$

тому оптимізаційна задача (2.41) у остаточному вигляді зводиться до пошуку

$$\min_W \Lambda = \min_W \left( \sum_{i=1}^I \Lambda_i \sum_{j=1}^J \alpha_{ij} k_{ij} \right), \quad (2.42)$$

де область допустимих рішень  $W$  задачі формується системою обмежень (2.30) – (2.33), (2.37) – (2.39).

Таким чином, в якості змінних параметрів, від яких залежить величина  $\Lambda$ , виступають часткові критерії  $\Lambda_i$ , коефіцієнти  $k_{ij}$  та  $\alpha_{ij}$ .

1). Зменшення коефіцієнтів  $k_{ij}$  можливо виконати:

- за рахунок збільшення відстані між епіцентром вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на  $i$ -му технологічному обладнанні, та сусідніми технологічними апаратами блоку.

- за рахунок належної орієнтації технологічного блоку до найбільш ймовірного напрямку вітру (наприклад, спрямувати дрейф хмари ГПС у місце,



де немає обладнання).

- за рахунок зменшення потужності вибуху хмари ГПС.

Потужність вибуху хмари ГПС пропорційна  $M_i$  – масі горючої речовини у хмарі, яка бере участь у вибуху. При дрейфі хмари під дією вітру відбувається її розсіювання в результаті процесу атмосферної дифузії [128]. При цьому зменшується концентрація горючої речовини та, як результат, її кількість в області, яка обмежена поверхнею  $c_{нкмпп}$ . Таким чином,  $M_i$  залежить від швидкості та напрямку вітру, тому її зменшення може бути досягнуто відповідною орієнтацією технологічного блоку до найбільш ймовірних напрямів вітру.

Найбільшого зменшення потребують ті коефіцієнти, які відповідають технологічному обладнанню (апаратам) з максимальним значенням часткових критеріїв  $\Lambda_i$ .

2). Зменшення коефіцієнтів  $\alpha_{ij}$  можливо виконати:

- за рахунок зменшення впливу ударної хвилі вибуху на сусідні технологічні апарати блоку.

Для цього необхідно належним чином зорієнтувати споруди та технологічне обладнання до епіцентру вибуху.

Таким чином, оптимізаційна задача (2.42), (2.30) – (2.33), (2.37) – (2.39) мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку є еквівалентною до задачі пошуку оптимального розміщення технологічного обладнання блоку, при цьому  $\Lambda = \Lambda(Z)$ .

2.2.4 Зв'язок задачі мінімізації наслідків НС з вибухом хмари ГПС на об'єкті та оптимізаційної задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки об'єкту

Як свідчать результати аналізу вітчизняних та закордонних літературних джерел [129-131], для кількісної характеристики наслідків НС техногенного або природного характеру загальноприйнятим у світі є

використання поняття «ризик». При цьому під терміном «ризик» у його найзагальнішому значенні розуміють два таких кількісних показники, як величину збитків (наслідків) від тих чи інших НС (подій) та ймовірність виникнення цих НС (подій):

$$R_{НС} = C_{НС} P_{НС}, \quad (2.43)$$

де  $R_{НС}$  – ризик виникнення (реалізації) події;  $C_{НС}$  – величина збитків від реалізації події;  $P_{НС}$  – ймовірність виникнення (реалізації) події.

На класі об'єктів, який розглядається у дисертаційному дослідженні, класична задача мінімізації наслідків НС з вибухом хмари ГПС може бути зведена до оптимізаційної задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки об'єкту вигляду (2.42). Покажемо еквівалентність цих взаємопов'язаних оптимізаційних задач.

В теоретичних роботах та практичних застосуваннях розрізняють множину різних типів ризиків, пов'язаних з реалізацією тих чи інших подій [129-131]. Однією з можливих кількісних характеристик наслідків НС з вибухом хмари ГПС у межах технологічного блоку ГНПП є сумарний ризик  $R_{повн}$  повного руйнування технологічного обладнання (об'єктів  $S_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ ) блоку.

Ризик  $R_{ij\_повн}$  для об'єкту  $S_j$  бути повністю зруйнованим від вибуху хмари ГПС, яка виникла при НС на об'єкті  $S_i$ , має вигляд:

$$R_{ij\_повн} = C_{j\_повн} P_{ij\_повн}, \quad (2.44)$$

де  $C_{j\_повн}$  – збитки від повного руйнування об'єкту  $S_j$ ,  $C_{j\_повн} = \text{const}$ , грн.;  $P_{ij\_повн}$  – ймовірність повного руйнування об'єкту  $S_j$  в наслідок вибуху хмари ГПС, яка виникла при НС на об'єкті  $S_i$ .

Величина ймовірності  $P_{ij\_повн}$  з урахуванням орієнтації об'єкта  $S_j$  до напрямку ударної хвилі вибуху, яка характеризується коефіцієнтом  $\alpha_{ij}$ , дорівнює:

$$P_{ij\_повн} = \alpha_{ij} k_{ij}. \quad (2.45)$$

З огляду на (2.45), вираз (2.44) приймає вигляд:

$$R_{ij\_повн} = C_{j\_повн} \alpha_{ij} k_{ij}. \quad (2.46)$$

Тому сумарний ризик  $R_{i\_повн}$  повного руйнування усіх об'єктів технологічного блоку в наслідок вибуху хмари ГПС, що виникла в наслідок НС на об'єкті  $S_i$ , дорівнює

$$R_{i\_повн} = \sum_{j=1}^J R_{ij\_повн} = \sum_{j=1}^J C_{j\_повн} \alpha_{ij} k_{ij}, \quad (2.47)$$

де  $J$  – кількість об'єктів технологічного блоку, які піддаються впливу вибуху хмари ГПС,  $J = N - 1$ ;  $j \neq i$ .

У цьому випадку сумарний ризик  $R_{повн}$  повного руйнування технологічного обладнання блоку при можливості вибуху хмар ГПС на всіх вибухонебезпечних об'єктах  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, I$ ) обчислюється за формулою:

$$R_{повн} = \sum_{i=1}^I R_{i\_повн} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_{j\_повн} \alpha_{ij} k_{ij}. \quad (2.48)$$

Подамо вираз (2.48) у наступному вигляді:

$$R_{повн} = \sum_{i=1}^I 1 \sum_{j=1}^J C_{ij}^* k_{ij}, \quad (2.49)$$

де константа  $C_{ij}^* = C_{j\_ПОВН} \alpha_{ij}$ .

Мінімізація наслідків НС з вибухом хмари ГПС у межах технологічного блоку ГНПП зводиться до розв'язання оптимізаційної задачі вигляду:

$$\min_W \Lambda_{\text{ПОВН}} = \min_W \left( \sum_{i=1}^I 1 \sum_{j=1}^J C_{ij}^* k_{ij} \right). \quad (2.50)$$

Зменшення коефіцієнтів  $k_{ij}$  та  $\alpha_{ij}$  можливо виконати за рахунок оптимального розміщення вибухонебезпечних об'єктів  $S_i$  та за рахунок зменшення впливу ударної хвилі вибуху на технологічні апарати блоку, які мають форму паралелепіпеду. Це означає, що область  $W$  допустимих розв'язків задачі (2.50) формується системою обмежень, яка містить умови вигляду (2.30) – (2.33), (2.37) – (2.39).

Порівняння виразів (2.50) та (2.42) дає змогу зробити висновок, що моделі оптимізаційної задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП при НС з вибухом хмари ГПС та оптимізаційної задачі мінімізації наслідків НС з вибухом хмари ГПС у межах технологічного блоку ГНПП є еквівалентними.

Таким чином, метод розв'язання задачі (2.42) шляхом оптимального розміщення вибухонебезпечного обладнання технологічного блоку визначає і розв'язок задачі (2.50) мінімізації наслідків НС з вибухом хмари ГПС у межах технологічного блоку.

Відзначимо основні властивості оптимізаційної задачі (2.42), (2.30)–(2.33), (2.37)–(2.39), які впливають з її математичної постановки.

- оптимізаційна задача (2.42), (2.30) – (2.33), (2.37) – (2.39) є багатовимірною багатоекстремальною задачею нелінійного математичного програмування спеціального вигляду;
- простір параметрів, в якому визначається екстремум функції мети,

має розмірність  $2I + k$ , де  $I$  – число об'єктів в технологічному блоці, на яких можливе виникнення НС з вибухом хмари ГПС,  $k$  – кількість нерухомих об'єктів в технологічному блоці, які мають форму паралелепіпеду.

- кількість обмежень, що описують область  $W$  допустимих рішень задачі (2.42), квадратично залежить від числа об'єктів в технологічному блоці, на яких можливе виникнення НС з вибухом хмари ГПС, і дорівнює  $0,5I(I - 1) + I \cdot N + T$ , де  $N$  – загальна кількість об'єктів в технологічному блоці,  $T$  – кількість технологічних обмежень  $W_T$ .

## ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 2

1. Здійснена постановка оптимізаційної задачі зниження вибухонебезпечності технологічного блоку ГНПП в умовах НС з утворенням і вибухом хмари ГПС шляхом оптимального розміщення технологічного обладнання в заданій області. При розміщенні технологічного обладнання урахувалися режим вибуху, характеристики вибухонебезпечних речовин, а також можливості дрейфу хмари ГПС під дією вітру.

2. Розроблено інтегральний та часткові критерії оцінки вибухонебезпеки технологічного блоку, визначено поняття «центр вибухонебезпеки технологічного блоку».

3. Проведено формалізацію оптимізаційної задачі та визначення її екзогенних параметрів, що включає в себе ідентифікацію функції мети та ідентифікацію обмежень задачі.

4. Досліджено функцію мети оптимізаційної задачі, в якості якої виступає інтегральний критерії оцінки вибухонебезпеки технологічного блоку.

5. Досліджено систему обмежень оптимізаційної задачі, яка в загальному випадку включає умови геометричного і технологічного характеру. Проведена формалізація геометричних обмежень з використанням апарату  $\Phi$ -функцій.

б. Показано, що моделі оптимізаційної задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП при НС з вибухом хмари ГПС та оптимізаційної задачі мінімізації наслідків НС з вибухом хмари ГПС у межах технологічного блоку ГНПП є еквівалентними.

### РОЗДІЛ 3

## МЕТОД РОЗВ'ЯЗАННЯ ОПТИМІЗАЦІЙНОЇ ЗАДАЧІ МІНІМІЗАЦІЇ РІВНЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕКИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО БЛОКУ

У розділі наведено чисельний метод розв'язання оптимізаційної задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП в умовах НС з вибухом хмари ГПС, яка виникла в наслідок руйнування обладнання блоку.

Мінімізація рівня вибухонебезпеки технологічного блоку виконується за рахунок оптимізації розміщення обладнання в межах блоку при заданій орієнтації блоку відносно напрямку найбільш ймовірного приземного вітру.

Матеріали розділу опубліковані у роботах автора [2, 3, 9, 13, 14].

### 3.1. Загальна схема методу розв'язку оптимізаційної задачі

Як було відмічено у розділі 2, оптимізаційна задача (2.42), (2.30)–(2.33), (2.37)– (2.39) мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку може бути сформульована як задача оптимізації розміщення технологічних апаратів блоку з урахуванням параметрів вибуху хмар ГПС, які виникають при НС на технологічних апаратах, та природно-кліматичних умовах.

Для розв'язку оптимізаційних задач розміщення об'єктів різної фізичної природи використовуються методи як точного [121, 122, 125], так і наближеного розв'язку [121, 122, 125]. З огляду на складність цільового критерію (2.42) та системи обмежень (2.30) – (2.33), (2.37) – (2.39), а також особливості оптимізаційної задачі, отримання її точного розв'язку не є можливим. Тому у даному дослідженні пропонується чисельний метод, який враховує специфіку оптимізаційної задачі та дає змогу отримати її наближений розв'язок.

Перевірка системи геометричних обмежень задачі виконується з застосуванням поняття 0-рівня Ф-функції двох плоских геометричних об'єктів [126, 127].

У якості об'єктів розміщення  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, I$ ) виступають технологічні апарати блоку, на яких можливе виникнення НС з викидом газоподібної вибухонебезпечної речовини, утворенням хмари ГПС та її наступним вибухом.

Область розміщення  $\Omega$  – це територія технологічного блоку без зон  $T_k$  ( $k=1, 2, \dots, K$ ), у яких розташування об'єктів  $S_i$  не допускається.

Розміщення множини об'єктів  $S_i$  в межах області  $\Omega$  задається вектором параметрів розміщення  $Z = (z_1, z_2, \dots, z_N) = (x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_N, y_N)$ .

Пошук локального мінімуму цільового критерію (2.40) виконується чисельним методом, заснованим на схемі методу мінімізації по групах змінних [121, 122], у якості яких виступають параметри розміщення об'єктів  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, I$ ). Об'єкти розміщуються послідовно з урахуванням системи обмежень (2.30) – (2.33), (2.37) – (2.39) та положення блоку відносно сторін світу, зміна положення усіх  $I$  об'єктів складає крок методу.

Зміна положення об'єктів на кожному кроці виконується таким чином, що новому вектору розміщення відповідає менше значення цільового критерію  $\Lambda$ .

Якщо на  $i$ -му кроці не один з об'єктів не змінив свого положення, то вектор параметрів розміщення, отриманий на  $i-1$  кроці вважається рішенням оптимізаційної задачі (2.42), (2.30) – (2.33), (2.37) – (2.39).

Локальний мінімум оптимізаційної задачі (2.42), (2.30) – (2.33), (2.37) – (2.39) знаходиться виходячи з допущення, що вітер в області  $\Omega$  розміщення об'єктів  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, I$ ) відповідає найбільш ймовірному у цій місцевості за напрямком та швидкістю. Зміна орієнтації блоку відносно сторін світу (тобто напрямку найбільш ймовірного вітру) дозволяє отримати інші локальні мінімуми оптимізаційної задачі та організувати їх перебір з визначенням найкращого з них.

Загальна схема методу розв'язку оптимізаційної задачі (2.42), (2.30) – (2.33), (2.37) – (2.39) складається з наступних етапів [2, 3, 13].



**Етап 1.** Визначення початкового варіанта  $S^0(x_1^0, y_1^0, \dots, x_N^0, y_N^0)$  розміщення об'єктів у межах технологічного блоку – початкової точки оптимізації.

**Етап 2.** Визначення для початкового варіанта розміщення параметрів НС з вибухом хмари ГПС для кожного з множини об'єктів розміщення та характеристик впливу вибуху хмари ГПС на  $i$ -му об'єкті на інші об'єкти блоку – початкових даних для оптимізації.

**Етап 3.** Розрахунок коефіцієнтів  $k_{ij}$ ,  $\alpha_{ij}$  та часткових критеріїв  $\Lambda_i$  для об'єктів  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, I$ ) і інтегрального критерію  $\Lambda$ .

**Етап 4.** Визначення вектору розміщення об'єктів, що відповідає локальному мінімуму цільового критерію оптимізаційної задачі при заданій орієнтації блоку відносно сторін світу.

**Етап 5.** Перебір локальних мінімумів для множини заданих орієнтацій блоку відносно сторін світу з визначенням вектору розміщення об'єктів, який відповідає мінімуму цільового критерію  $\Lambda$ .

3.1.1. Визначення початкового варіанту розміщення об'єктів у межах технологічного блоку (Етап 1)

Початковий варіант розміщення об'єктів  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, I$ ) в межах технологічного блоку може визначатися різними шляхами, виходячи з умов конкретного завдання.

При побудові генерального плану підприємства розміщення технологічного обладнання виконується відповідно до особливостей технологічного процесу, що може накладати на розташування обладнання і апаратів набір обмежень, що включають в себе вимоги:

- до їх взаємного розміщення;
- до параметрів і характеристик зв'язуючих інженерних мереж (електропостачання, продуктопроводів і т.п.);

- до заданого розташування по відношенню до транспортних мереж (автомобільним, залізничним і т.п.);
- до заданого розташування по відношенню до населених пунктів, різного роду виробничим і невиробничим об'єктів, рекреаційних територій.

В умовах розробки плану реконструкції підприємства або його окремого структурного підрозділу без істотної зміни технологічного процесу і модернізації виробництва з заміною технологічного обладнання, в якості початкового варіанту розміщення зазвичай використовується наявні варіанти компоновання технологічних апаратів і блоків.

### 3.1.2. Визначення початкових даних для оптимізації (Етап 2)

Початковими даними для оптимізації розміщення об'єктів  $S_i$  ( $i=1,2,\dots, I$ ) технологічного блоку є параметри НС з вибухом хмари ГПС для кожного з множини об'єктів розміщення та характеристики впливу вибуху хмари ГПС на  $i$ -му об'єкті на інші об'єкти блоку.

Розрахунок параметрів НС з вибухом хмари ГПС для кожного з множини об'єктів розміщення містить:

#### **1). Визначення характеристик хмари ГПС, яка виникла внаслідок НС на об'єкті $S_i$ ( $i=1, 2,\dots, I$ ):**

- *розрахунок маси вибухонебезпечної речовини, яка виходить з пошкодженого обладнання при НС на об'єкті  $S_i$  ( $i=1, 2,\dots, I$ ) та утворює хмару ГПС.*

Вважаємо, що при руйнуванні  $i$ -го технологічного обладнання в результаті НС вся кількість газоподібної вибухонебезпечної речовини виходить назовні та утворює хмару ГПС.

У цьому випадку маса  $M_i$  вибухонебезпечної речовини, яка виходить з пошкодженого  $i$ -го технологічного обладнання при НС та переходить до хмари ГПС, визначається наступним чином:

- якщо відома маса  $M_{xi}$  вибухонебезпечної речовини в  $i$ -му технологічному обладнанні, то

$$M_i = M_{xi}; \quad (3.1)$$

- якщо не відома маса  $M_{xi}$  вибухонебезпечної речовини в  $i$ -му технологічному обладнанні, але відомий об'єм  $V_i$ , тиск  $P_i$  та температура  $T_i$  у ньому, то

$$M_i = \frac{\mu_i}{R} \frac{V_i P_i}{T_i}; \quad (3.2)$$

де  $\mu_i$  – молярна маса вибухонебезпечної речовини в  $i$ -му технологічному обладнанні, кг/моль;  $R$  – універсальна газова стала,  $R = 8,3144$  Дж/К·моль.

- *розрахунок початкових характеристик хмари ГПС, що виникла при НС на об'єкті  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, I$ ).*

Передбачається, що при НС викид газоподібної вибухонебезпечної речовини відбувається на рівні землі або площадки (етажерки), де розташоване технологічне обладнання, розсіювання викиду проходить від рівня поверхні землі. Дрейф хмари відбувається над твердою рівною поверхнею, з якої немає обміну масою, а є тільки обмін теплом.

Згідно [68, 128], для розрахунку впливу НС з викидом газоподібної вибухонебезпечної речовини, необхідно розрахувати наступні початкові кількісні характеристики хмари ГПС, що утворилася в результаті НС:

- щільність вибухонебезпечної речовини в хмарі ГПС в початковий момент часу.

Розрахунок проводиться за формулою:

$$\rho_i^0 = \rho_i \left( \frac{P_0}{P_i} \right)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad (3.3)$$

де  $\rho_i^0$  – щільність вибухонебезпечної речовини в хмарі ГПС в початковий момент часу, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_i$  – щільність газоподібної вибухонебезпечної речовини в аварійному обладнанні,  $\rho_i = \frac{\mu_i P_i}{R T_i}$ , кг/м<sup>3</sup>;  $P_0$  – нормальний атмосферний тиск,  $P_0 = 101$  кПа;  $\gamma$  – показник адіабати вибухонебезпечної речовини.

– розміри хмари ГПС в початковий момент часу.

При відсутності даних про розміри хмари ГПС в початковий момент часу, дозволяється використовувати для їх розрахунку формулу [128]:

$$R_i^0 = \sqrt[3]{\frac{3M_i}{4\pi\rho_i^0}}, \quad (3.4)$$

де  $R_i^0$  – радіус хмари ГПС в початковий момент часу, м.

## **2). Розрахунок характеристик динаміки хмари ГПС, що виникла при НС на об'єкті $S_i$ ( $i=1, 2, \dots, I$ )**

Розрахунок характеристик динаміки хмари ГПС, що виникла при НС, заснований на моделі [68].

Модель [29] враховує такі процеси:

- рух хмари з урахуванням зміни швидкості вітру по висоті;
- розсіювання хмари в вертикальному напрямку за рахунок атмосферної турбулентності (підмішування повітря в хмару)
- розсіювання хмари в горизонтальному напрямку як за рахунок атмосферної турбулентності, так і за рахунок гравітаційного розтікання;
- нагрів або охолодження хмари за рахунок підмішування повітря;
- теплообмін хмари з підстильною поверхнею.

В моделі [68] прийняті наступні допущення:

- а) газоподібна вибухонебезпечна речовина вважається ідеальним газом, властивості якого не залежать від температури;

б) газоподібна вибухонебезпечна речовина знаходиться в аварійному обладнанні при тиску, що дорівнює або перевищує атмосферний;

в) осадження (конденсація) на підстилаючу поверхню викиду газоподібної вибухонебезпечної речовини і її хімічного перетворення при розсіюванні не враховуються;

г) при визначенні розмірів зон, де можливий вибух, передбачається, що він може відбутися в областях із середньою концентрацією газоподібної вибухонебезпечної речовини в межах від  $c_{НКМПП}$  до  $c_{ВКМПП}$ .

- *моделювання дрейфу хмари ГПС, що виникла при НС на об'єкті  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, I$ ).*

Для моделювання дрейфу хмари ГПС і динаміки її кількісних властивостей від моменту виникнення в результаті НС до вибуху треба визначити наступні характеристики вибухонебезпечної речовини та навколишнього середовища в зоні НС:

- тип місцевості, де відбувається розсіювання викиду.

Необхідний для визначення  $Z_{ПОВ}$  – характерного розміру шорсткості підстильної поверхні. Визначається за даними [68, табл. 1 Додаток 7];

- температура повітря, щільність повітря, атмосферний тиск (при нормальних умовах приймається рівним 101 кПа);

- швидкість вітру  $u_{10}$  на висоті 10 м;

- клас стійкості атмосфери або рівень інсоляції і хмарності (для визначення класу стійкості атмосфери).

Для опису стійкості атмосфери використовується 6 класів стійкості по Пасквілу - А, В, С, D, E і F [129, 130].

Перші три класи відповідають нестійкій стратифікації атмосфери, останні два - стійкою. Клас D – відповідає нейтральній стратифікації атмосфери (Табл. 3.1, 3.2).

Передбачається, що протягом часу поширення (дрейфу) хмари ГПС

характеристики атмосфери не змінюються.

Таблиця 3.1 – Класифікація класів стійкості атмосфери по Пасквілу

Вертикальний градієнт температури, $dT/dz$ , град./100 м	Клас стійкості
$< -1,9$	A – сильна конвекція
$-(1,9 \div 1,7)$	B – конвекція
$-(1,7 \div 1,5)$	C – помірна конвекція
$-(1,5 \div 0,5)$	D – нейтральна (ізотермія)
$-0,5 \div +1,5$	E – інверсія
$+(1,5 \div 4,0)$ і більше	F – сильна інверсія

Клас стійкості атмосфери визначається за [68, табл. 2 Додаток 7] в залежності від швидкості вітру і інтенсивності теплового потоку біля поверхні (інсоляція і хмарність). Для розрахунку найгіршого варіанту приймається клас стабільності інверсія і швидкість вітру 1 м/с.

Таблиця 3.2 – Визначення класу стійкості атмосфери по Пасквілу

Швидкість вітру $u_{10}$ на висоті 10 м, м/с	Денний час. Рівень сонячного освітлення			Нічний час. хмарність	
	Сильний	Середній	Слабкий	>50%	<50%
<2	Конвекція	Конвекція	Конвекція	Інверсія	Інверсія
2÷3	Конвекція	Конвекція	Конвекція	Інверсія	Інверсія
3÷5	Конвекція	Конвекція	Конвекція	Ізотермія	Інверсія
5÷6	Конвекція	Ізотермія	Ізотермія	Ізотермія	Ізотермія
>6	Ізотермія	Ізотермія	Ізотермія	Ізотермія	Ізотермія

– показник степеневі залежності швидкості вітру від висоти  $\alpha_v$ .

Коефіцієнт  $\alpha_v$  визначається для характерного розміру шорсткості  $Z_{пов}$ , класу стійкості атмосфери і швидкості вітру  $u_{10}$  на висоті 10 м відповідно з даними [68, табл. 5 Додаток 7];

– температура поверхні, над якою відбувається розсіювання викиду;

Індивідуальні характеристики вибухонебезпечної речовини в газовій фазі (молярна маса, показник адіабати, теплоємність, значення нижньої і верхньої концентраційних меж поширення полум'я і т.п.).

• *розрахунок концентраційного поля вибухонебезпечної речовини в хмарі ГПС, що виникла при НС на об'єкті  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, I$ ).*

Концентрація  $c(x, y, z, t)$  при проходженні хмари ГПС (первинної) обчислюється за формулою [68]

$$c_i(x, y, z, t) = \frac{M_i}{\frac{8}{3} \pi R_i^3 + (2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} G_3(x, y, z, t), \quad (3.5)$$

де  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – дисперсія уздовж осей  $OX, OY, OZ$  відповідно, м;  $x, y, z$  – просторові координати, м;  $t$  – час, с.

Функція  $G_3(x, y, z, t)$  має вигляд

$$G_3(x, y, z, t) = \exp\left(-\frac{x - u_{10}}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[ \exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right],$$

де  $h$  – висота джерела викиду, м

При обчисленні функції  $G_3(x, y, z, t)$ , а також у всіх подальших розрахунках, використовуються значення  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  для точки, в якій

знаходиться центр хмари ГПС.

Дисперсія  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  в залежності від віддаленості центру хмари ГПС від джерела викиду (аварійного апарату  $S_i$ ) вздовж напрямку вітру (тобто по осі ОХ) визначаються за формулами [68]:

$$\sigma_x = \frac{C_3 x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}, \quad (3.6)$$

$$\sigma_y = \begin{cases} 0,96 + \frac{x}{13812u_{10}}, & \text{якщо } x / u_{10} \geq 600, \\ \sigma_x, & \text{якщо } x / u_{10} < 600; \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\sigma_z = f(z_{\text{пов}}, x)g(x). \quad (3.8)$$

Функції  $f(z_{\text{пов}}, x)$  і  $g(x)$  обчислюються наступним чином:

$$g(x) = \frac{A_1 x^{B_1}}{1 + A_2 x^{B_2}},$$

$$f(z, x) = \begin{cases} \ln[C_1 x^{D_1} (1 + C_2 x^{D_2})], & \text{якщо } z_{\text{пов}} < 0.1, \\ \ln\left[\frac{C_1 x^{D_1}}{1 + C_2 x^{D_2}}\right], & \text{якщо } z_{\text{пов}} \geq 0.1; \end{cases}$$

де коефіцієнти  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $D_1$ ,  $D_2$  визначаються відповідно до даних [68, табл. 3 и 4 Додаток 7].

Величина  $\sigma_z$ , розрахована за формулою (3.8), не повинна перевищувати величину  $\sigma_z$ , вказану в [68, табл. 5 Додаток 7]. Якщо це має місце, то замість величини, розрахованої за формулою (3.8), слід використовувати відповідне даному класу стійкості атмосфери значення з [68, табл. 5 Додаток 7].

Максимальна концентрація при проходженні первинної хмари спостерігається на осі ОХ ( $y = 0$ ,  $z = 0$ ) в центрі хмари і обчислюється за



формулою

$$c_i(x, y, z, t) = \frac{2M_i}{\frac{8}{3}\pi R_i^3 + (2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} G_0(x), \quad (3.9)$$

де час  $t$  дорівнює  $t = x / u_{10}$ , с.

Функція  $G_0(x)$  має вигляд

$$G_0(x) = \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right).$$

Центр хмари ГПС в початковий момент часу збігається з геометричним центром викиду (сфера радіуса  $R_i^0$ ), при дрейфі хмари ГПС його центр переміщається зі швидкістю  $u_{10}$  в напрямку вітру. У момент часу  $t$  центр хмари знаходиться в точці на осі викиду з координатами  $x_{ц} = t \cdot u_{10}$ .

- *розрахунок маси вибухонебезпечної речовини хмари ГПС, що приймає участь у вибуху.*

Розрахунок маси вибухонебезпечної речовини хмари ГПС, що приймає участь у вибуху, виконується згідно формули (2.19). Для цього в момент часу  $t_0$  визначаються поверхні  $\Sigma_{ВКМПП}$  і  $\Sigma_{НКМПП}$  [68, 128], що обмежують в просторі області зі значеннями концентрації вибухонебезпечної речовини, відповідно верхньою  $c_{ВКМПП}$  і нижньою  $c_{НКМПП}$  концентраційними межами поширення полум'я.

Границя  $\Sigma_{ВКМПП}$  області ВКППП визначається рівнянням

$$c(x, y, z, t_0) = c_{ВКМПП}. \quad (3.10)$$

Границя  $\Sigma_{НКМПП}$  області НКППП визначається рівнянням

$$c(x, y, z, t_0) = c_{НКМПП}.$$

У разі, якщо концентрація вибухонебезпечної речовини в хмарі ГПС, що відповідає  $c_{\text{вкмпп}}$ , не досягається, то область в просторі, де можливе займання і вибух хмари ГПС, визначається як огинаюча поверхня  $\Sigma_{\text{нкмпп}}$  за все момент часу  $t_0$  існування в просторі концентрації вище  $c_{\text{нкмпп}}$ .

Для вибухонебезпечних викидів визначаються розміри зон, на які може дрейфувати викид, зберігаючи здатність до вибуху. покладається [68, 128], що цей розмір відповідає досягненню середніх концентрацій, відповідних НКМПП.

Границя зони досягнення НКМПП на рівні  $z=z_0$  в момент часу  $t_0$  визначається співвідношенням:

$$c(x, y, z_0, t_0) = c_{\text{нкмпп}}. \quad (3.11)$$

Межа зони досягнення НКМПП у вертикальній площині, перпендикулярній вітру ( $x=x_0$ ), в момент часу  $t_0$  визначається співвідношенням:

$$c(x_0, y, z, t_0) = c_{\text{нкмпп}}. \quad (3.12)$$

Межа зони досягнення НКМПП у вертикальній площині, паралельною вітру ( $y=y_0$ ), в момент часу  $t_0$  визначається співвідношенням:

$$c(x, y_0, z, t_0) = c_{\text{нкмпп}}. \quad (3.13)$$

Лінія, що обмежує у відповідній площині ( $z=z_0$ ,  $y=y_0$  або  $x=x_0$ ) область, де можливий вибух, визначається як огинаюча профілю ліній (3.11) – (3.13), за всі моменти часу  $t_0$  існування в просторі концентрації вище НКМПП.

- *визначення координат епіцентру вибуху хмари ГПС.*

Епіцентр (ЕП) вибуху хмари ГПС при його дрейфі (відповідно до рекомендацій [47]) будемо визначати в середині відрізка, що з'єднує джерело

викиду (точка  $O$  на рис. 3.1) і найбільш віддалену від джерела викиду точку території, в якій протягом дрейфу досягається концентрація, що дорівнює НКМПП (точка  $O_1$  на рис. 3.1).

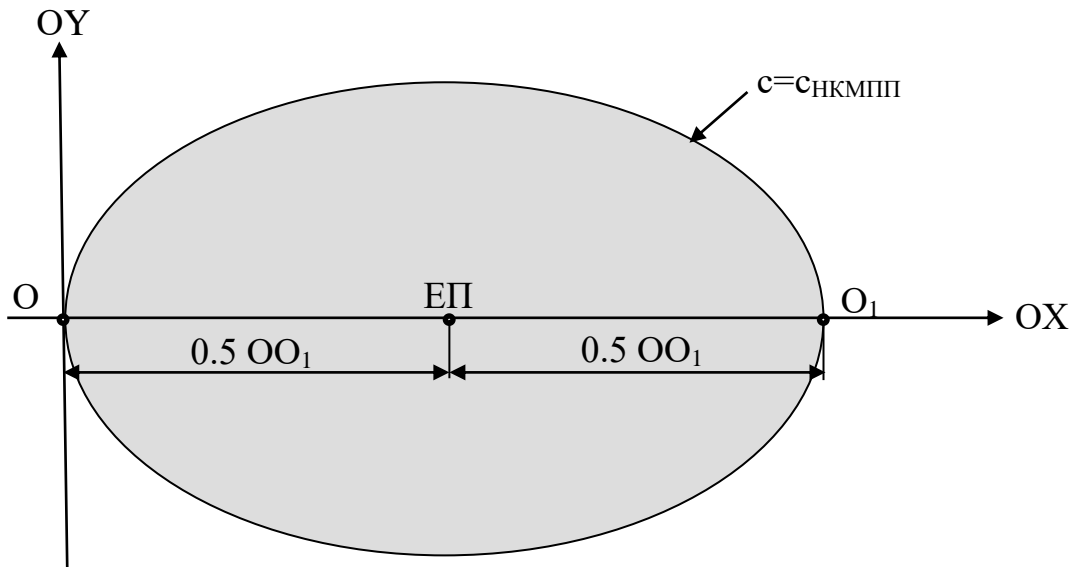


Рисунок 3.1 – Визначення координат епіцентру вибуху хмари ГПС

Після визначення положення епіцентру вибуху хмари ГПС, що сформувався в результаті НС з викидом газоподібної вибухонебезпечної речовини на об'єкті  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, I$ ), розраховуються характеристики вибуху.

### 3). Розрахунок характеристик вибуху хмари ГПС

- визначення величин надлишкового тиску  $\Delta P_{ij}$  і імпульсу  $I_{ij}$  в повітряній ударній хвилі від вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на об'єкті  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, I$ ), для всіх об'єктів ( $j = 1, 2, \dots, I-1; j \neq i$ ).

Розрахунок надлишкового тиску  $\Delta P_{ij}$  і імпульсу  $I_{ij}$  в повітряній ударній хвилі від вибуху хмари ГПС виконується згідно методики, викладеної в Розділі 2 за формулами (2.16), (2.17), (2.19) – (2.25).

- визначення параметрів зон ураження від вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на об'єкті  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, I$ ).

До параметрів зон ураження відносяться величини радіусів  $R_i^{100}$  зони повних руйнувань та  $R_i^0$  безпечної зони. Їх розрахунок виконується за формулами (2.9), (2.10) та (2.26) Розділу 2.

- визначення оцінки ймовірності  $p_{ij}$  повного руйнування об'єктів  $S_j$  ( $j = 1, 2, \dots, I-1; j \neq i$ ) у результаті вибуху на об'єкті  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, I$ ).

Оцінка ймовірності повного руйнування сусідніх об'єктів в результаті вибуху хмари ГПС, що утворилася при НС на об'єкті  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, I$ ), виконується за формулами (2.11) – (2.13) Розділу 2 з використанням пробіт-функції.

- визначення енергетичного центру вибухонебезпеки технологічного блоку.

Розрахунок координат енергетичного центру вибухонебезпеки технологічного блоку (ЕЦ) виконується за формулою (2.18) з урахуванням формул (2.16), (2.17) та визначених координат епіцентрів вибухів хмар ГПС, що виникли при НС на об'єктах  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, I$ ).

3.2. Розрахунок коефіцієнтів  $k_{ij}$ ,  $\alpha_{ij}$  та часткових критеріїв  $\Lambda_i$  для об'єктів  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, I$ ) і інтегрального критерію  $\Lambda$ . (Етап 3)

Множина параметрів  $k_{ij}$ , які залежать від ступеню пошкодження  $j$ -го технологічного об'єкта вибухом хмари ГПС, що виникла при НС на  $i$ -му об'єкті, розраховуються за формулою (2.8) з урахуванням формул (2.9)–(2.13) Розділу 2.

Коефіцієнти  $\alpha_{ij}$  впливу ударної хвилі вибуху хмари ГПС, що утворилася при НС на  $i$ -му технологічному об'єкті на сусідні технологічні об'єкти  $S_j$  ( $j = 1, 2, \dots, I-1; j \neq i$ ), величина якого залежить від взаємної орієнтації об'єктів  $S_i$  та  $S_j$ , обчислюються за формулами (2.14), (2.15) в залежності від геометричної форми об'єкта  $S_j$  та кута  $\theta$  до напрямку вектору,

що з'єднує центр  $S_j$  з епіцентром вибуху хмари ГПС.

Величини часткових критеріїв  $\Lambda_i$  ( $i=1, 2, \dots, I$ ), що кількісно характеризує рівень вибухонебезпеки об'єктів  $S_i$ , визначаються за формулою (2.6) з урахуванням формул (2.4), (2.5) та значень ймовірності  $Q_{НС}^{in}$  виникнення НС, яка супроводжується викидом вибухонебезпечної речовини та виникненням хмари ГПС, на  $i$ -му технологічному об'єкті  $n$ -го типу; ймовірності  $Q_V^{in}$  вибухового перетворення хмари ГПС, яка виникла при НС на  $i$ -му технологічному об'єкті  $n$ -го типу та ймовірності  $q_{iv}$  реалізація сценарію вибухового перетворення.

Після обчислення величин часткових критеріїв для об'єктів блоку за формулою (2.2) розраховується інтегральний критерій  $\Lambda(\lambda_i \Lambda_i)$ , що характеризує рівень вибухонебезпеки технологічного блоку у цілому. Вагові функції  $\lambda_i$ , що моделюють ступінь впливу вибуху хмари ГПС, яка утворилася в результаті НС на  $i$ -му технологічному об'єкті, на сусіднє обладнання, визначаються за формулою (2.7).

3.3. Визначення вектору розміщення об'єктів, що відповідає локальному мінімуму цільового критерію оптимізаційної задачі при заданій орієнтації блоку відносно сторін світу (Етап 4)

Після визначення початкового варіанту  $Z^0(x_1^0, y_1^0, \dots, x_N^0, y_N^0)$  розміщення об'єктів у межах технологічного блоку, розрахунку відповідних йому параметрів НС з вибухом хмари ГПС, коефіцієнтів  $k_{ij}$ ,  $\alpha_{ij}$  та часткових критеріїв  $\Lambda_i$  для об'єктів  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, I$ ) і інтегрального критерію  $\Lambda^f$  технологічного блоку знайдемо вектор  $Z^{f\_min}$  розміщення об'єктів, що відповідає локальному мінімуму критерію  $\Lambda^f$  оптимізаційної задачі (2.42), (2.30)–(2.33), (2.37) – (2.39) при заданій орієнтації  $f$  ( $f=1, 2, \dots, F$ ) блоку відносно сторін світу:

$$\min \Lambda^f = \Lambda^{f_{\min}} = \Lambda(Z^{f_{\min}}).$$

Аналіз особливостей оптимізаційної задачі (2.42), (2.30) – (2.33), (2.37)–(2.39), проведений у п. 2.2.3, показав, що в силу її складності не доводиться розраховувати на можливість отримання точного рішення. Тому пропонується метод пошуку наближеного рішення задачі, що дозволяє з заданою точністю визначити значення мінімуму функції мети завдання.

Наближений метод розв'язку оптимізаційної задачі (2.42), (2.30)–(2.33), (2.37)–(2.39), що пропонується, базується на використанні схеми методу мінімізації за групами змінних [121, 122, 134].

Змінні представляють собою координати полюса розташованого об'єкта  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, I$ ).

Введемо наступні позначення:

$p$  – номер ітерації, кожна ітерація складається з  $(I + M)$  кроків, де  $I$  – число розташованих об'єктів,  $M$  – число об'єктів прямокутної форми, для яких можливий поворот;

$z_k^p = (x_k^p, y_k^p)$  – параметри розташування об'єкта  $S_k$  на  $p$ -ой ітерації;

$Z^p = (z_1^p, z_2^p, \dots, z_I^p)$  – вектор координат полюсів об'єктів на  $p$ -ой ітерації;

Загальна схема визначення вектору розміщення об'єктів, що відповідає локальному мінімуму цільового критерію оптимізаційної задачі (2.42) складається з наступних кроків:

**Крок 1.** По деякому правилу визначається об'єкт  $S_k$ , що змінює своє положення і має на  $p$ -ой ітерації параметри розміщення  $z_k^p = (x_k^p, y_k^p)$ .

**Крок 2.** Виділяються обмеження, що формують в околиці полюса рухомого об'єкта  $S_k$  область  $W_k^p$  допустимих параметрів його розміщення на  $p$ -ой ітерації.

**Крок 3.** Визначається напрямок і крок зсуву об'єкта  $S_k$ . Параметри розміщення об'єкта  $S_k$  отримують приріст  $\Delta_k^p$ , що приводить до зменшення

значення цільового критерію задачі (2.42), визначеного на  $(p-1)$  ітерації:  $\Lambda^p < \Lambda^{p-1}$ . Знаходяться нові параметри розміщення  $z_k^{p+1} = (x_k^{p+1}, y_k^{p+1})$  об'єкта  $S_k$ .

**Крок 4.** Проводиться перевірка виконання системи обмежень для нового положення об'єкта  $S_k$ . У разі її виконання здійснюється перехід до **Кроку 5**, в іншому випадку - до **Кроку 3**

**Крок 5.** Номер  $K$  збільшується на одиницю. При  $K \leq I$  здійснюється повернення до **Кроку 1**.

**Крок 6.** Для об'єктів  $S_m$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ) технологічного блоку, які мають прямокутну форму визначається кут  $\theta_m$  між вектором, що з'єднує ЕЦ для поточного становища об'єктів з центром  $(x_m, y_m)$  об'єкта  $S_m$ , і стіною об'єкта  $S_m$ . Якщо  $\theta_m \neq \pi/4$ , об'єкт  $S_m$  розвертається навколо точки центру таким чином, що кут  $\theta_m$  дорівнював  $\pi/4$ .

**Крок 7.** Якщо на  $p$ -ой ітерації хоча б один з об'єктів змінив своє положення, тобто  $Z^p \neq Z^{p-1}$ , то номер  $P$  збільшується на 1 і здійснюється перехід до **Кроку 1**. В іншому випадку рішенням вважають вектор  $Z^p$  параметром розміщення об'єкта  $S_i$ , ( $i = 1, 2, \dots, I$ ), отриманий на  $(p-1)$  ітерації.

Конкретні алгоритми, що реалізують наведену загальну схему, можуть відрізнитися правилом визначення рухомого об'єкта  $S_k$  (**Крок 1**) і вибором напрямку і величини зсуву  $\Delta_k^p$  (**Крок 3**).

Розглянемо докладніше роботу методу на кожному з кроків.

### 3.3.1 Визначення послідовності зміни параметрів розміщення об'єктів (крок 1)

Вибір об'єкта, який першим розпочинає змінювати параметри розміщення, може здійснюватися різними шляхами, виходячи з умов конкретної задачі. Наприклад, це може бути об'єкт  $S_k$  з найбільшим потенційним рівнем вибухонебезпеки, тобто має максимальне з усіх значення

часткового критерію  $\Lambda_k$ . Однак в реальних умовах з урахуванням розсіювання хмари ГПС під дією вітру і зменшення кількості вибухонебезпечної речовини, що бере участь у вибуху, потенційний рівень вибухонебезпечності об'єкта  $S_k$  може не реалізуватися. Тому в даному дослідженні такий об'єкт визначався з міркувань найбільшого руйнівного впливу на сусідні об'єкти вибуху хмари ГПС, яке утворилося в результаті НС на ньому. В цьому випадку при виборі об'єкта  $S_k$  крім величини  $\Lambda_k$  необхідно враховувати і відповідний ваговий коефіцієнт  $\lambda_k$ .

Процедура визначення послідовності зміни параметрів розміщення об'єктів  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, I$ ) складається з наступних кроків.

**Крок 1.1.** Розраховується величина часткового критерію  $\Lambda_i$  для всієї множини об'єктів  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, I$ ). Послідовність розрахунку описана у п. 3.2 цього розділу.

**Крок 1.2.** Розраховуються величини вагових коефіцієнтів  $\lambda_i$  для всієї множини об'єктів  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, I$ ) за формулою (2.7). Коефіцієнти  $k_{ij}$ ,  $\alpha_{ij}$  обчислюються відповідно до методики, викладеної у п. 3.2.

**Крок 1.3.** Об'єкти  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, I$ ) ранжуються за спаданням величини  $\lambda_i \Lambda_i$ .

Отриманий на кроці 1.3 ряд представляє собою послідовність зміни параметрів розміщення об'єктів.

3.3.2 Формування області  $W_k^p$  допустимих параметрів розміщення рухомого об'єкта  $S_k$  на  $p$ -ой ітерації (крок 2)

Як вказувалося в п. 2.2.2 розділу 2 на параметри розміщення об'єктів  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, I$ ) накладається система геометричних і технологічних обмежень (2.30) - (2.33), (2.37) - (2.39), що формує область  $W$  допустимих рішень оптимізаційної задачі (2.42).

На кроці 2 з неї виділяються обмеження, що накладаються на



параметри розміщення рухомого об'єкта  $S_k$ . В цьому випадку система обмежень включає в себе наступні умови:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{Sij} (x_k, y_k, x_j, y_j) > 0, \\ \Phi_{Zin} (x_k, y_k, x_n, y_n) > 0, \\ \Phi_{i0} (x_k, y_k, m_0) = 0, \\ (x_k - x_j)^2 + (y_k - y_j)^2 = r_{kj}, \\ (x_k - x_j)^2 + (y_k - y_j)^2 \leq r_{kj}, \\ l_{kj}^t \leq L_{kj}^t, \\ d_k^q \leq D_k^q, \\ j = \overline{1, I-1}, j \neq k, t = \overline{1, T}, q = \overline{1, Q}, n = \overline{1, N}. \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (3.14) \\ (3.15) \\ (3.16) \\ (3.17) \\ (3.18) \\ (3.19) \\ (3.20) \end{array}$$

Зазначена система на  $p$ -ой ітерації формує в околиці полюса рухомого об'єкта  $S_k$  область допустимих параметрів розміщення  $W_k^p$ .

### 3.3.3 Визначення нових параметрів розміщення $S_k$ (Крок 3–6)

Як вказувалося в п. 2.2.3, задача (2.42) є багатовимірною багатоекстремальною задачею безперервного нелінійного математичного програмування спеціального вигляду. Для її вирішення використовуються чисельні методи безперервної локальної оптимізації, детальний опис яких наведено [122, 125].

Методи локальної оптимізації є ітераційний процес виду

$$z_k^{p+1} = z_k^p + \delta_k^p g_k^p = z_k^p + \Delta_k^p, \quad (3.21)$$

або в проекціях на координатні осі

$$x_k^{p+1} = x_k^p + \delta_k^p g_{kx}^p = x_k^p + \Delta_{kx}^p, \quad (3.22)$$

$$y_k^{p+1} = y_k^p + \delta_k^p g_{ky}^p = y_k^p + \Delta_{ky}^p, \quad (3.23)$$

де  $z_k^{p+1}$ ,  $z_k^p$  – параметри розміщення (координати полюса) рухомого об'єкта  $S_k$  на  $(p+1)$  і  $p$ -ой ітерації відповідно;  $g_k^p$  – вектор зсуву об'єкта  $S_k$  на  $p$ -ой ітерації;  $\delta_k^p$  – крок зсуву об'єкта  $S_k$  на  $p$ -ой ітерації;  $g_{ix}^p$  и  $g_{iy}^p$  – проекції вектора зсуву  $g_k^p$  на координатні осі.

Як зазначалося вище, конкретні алгоритми, що реалізують наведену загальну схему, можуть відрізнятися правилом визначення напрямку зсуву  $g_k^p$  і величини кроку зсуву  $\delta_k^p$ .

У науковій літературі [122, 125, 134, 135] пропонується кілька методів для визначення напрямку зсуву, що використовують інформацію цільової функції або її похідних (наприклад, градієнтні методи і т.п.). Однак, як показав аналіз особливостей цільової функції і системи обмежень оптимізаційної задачі (2.42), використання традиційних методів є складним. Це пояснюється, в першу чергу, складністю і громіздкістю обчислень при визначенні цільової функції, пов'язаних з необхідністю чисельного розрахунку параметрів вибуху хмари ГПС і ступеня впливу небезпечних чинників вибуху на об'єкти технологічного блоку.

Зменшення величини цільової функції можливо за рахунок збільшення відстані між епіцентром вибуху хмари ГПС, яке утворилося при НС на об'єкті  $S_k$ , і сусідніми об'єктами. Тому в дисертаційній роботі пропонується в якості напрямку зсуву об'єкта  $S_k$  вибрати вектор, спрямований з точки енергетичного центру вибухонебезпечності технологічного блоку до центру (полюса) об'єкта  $S_k$ .

Величина кроку  $\delta_k^p$  може визначатися різними способами [122, 125]. наприклад, з умови мінімуму цільової функції задачі (2.42) в напрямку руху об'єкта  $S_k$ . Тоді знайти  $\delta_k^p$  можна, наприклад, методом "золотого перетину" [125]. Однак слід зауважити, що для зручності комп'ютерної реалізації

запропонованого алгоритму в даному дисертаційному дослідженні величину  $\delta_k^p$  вибиратимемо постійною і рівною

$$\delta_k^p = \varepsilon d_k^p, \quad (2.24)$$

де  $d_k^p$  – довжина вектора, що з'єднує точки ЕЦ технологічного блоку і центру (полюса) рухомого об'єкта  $S_k$ ;  $\varepsilon$  – деяка константа,  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ , вибір якої обумовлений особливостями конкретної задачі.

В цьому випадку процес визначення параметрів зсуву об'єкта  $S_k$  складається з наступної послідовності кроків.

**Крок 3.1.** Для поточного розміщення об'єктів визначаються координати  $(x_{\text{ЕЦ}}^p, y_{\text{ЕЦ}}^p)$  точки енергетичного центру вибухонебезпеки технологічного блоку за формулою (2.18).

**Крок 3.2.** Знаходиться рівняння вектора  $g_k^p$ , що проходить через точку ЕЦ  $(x_{\text{ЕЦ}}^p, y_{\text{ЕЦ}}^p)$  і точку  $(x_k^p, y_k^p)$  полюса об'єкта  $S_k$  (напрямок зсуву).

Рівняння вектора  $g_k^p$  має вигляд  $y = kx + b$ , де

$$k = \frac{y_k^p - y_{\text{ЕЦ}}^p}{x_k^p - x_{\text{ЕЦ}}^p}, \quad b = y_{\text{ЕЦ}}^p - \frac{x_{\text{ЕЦ}}^p (y_k^p - y_{\text{ЕЦ}}^p)}{x_k^p - x_{\text{ЕЦ}}^p}. \quad (3.25)$$

**Крок 3.3.** Обчислюється довжина  $\delta_k^p$  кроку зсуву об'єкта  $S_k$ :

$$\delta_k^p = \varepsilon d_k^p = \varepsilon \left[ (x_k^p - x_{\text{ЕЦ}}^p)^2 + (y_k^p - y_{\text{ЕЦ}}^p)^2 \right]^{1/2}. \quad (3.26)$$

**Крок 3.4.** Визначаються нові параметри розміщення  $z_k^{p+1} = (x_k^{p+1}, y_k^{p+1})$  рухомого об'єкта  $S_k$ .

Координати нового положення об'єкта  $S_k$  знаходяться за формулами

(3.22), (3.23) і мають вигляд:

$$x_k^{p+1} = x_k^p + \delta_k^p g_{kx}^p = x_k^p + \varepsilon(x_k^p - x_{EЦ}^p), \quad (3.27)$$

$$y_k^{p+1} = y_k^p + \delta_k^p g_{ky}^p = y_k^p + \varepsilon(y_k^p - y_{EЦ}^p). \quad (3.28)$$

Графічна інтерпретація визначення параметрів зсуву об'єкта  $S_k$  приведена на рис. 3.2.

**Крок 3.5.** Після визначення нових параметрів розміщення  $(x_k^{p+1}, y_k^{p+1})$  рухомого об'єкта  $S_k$  здійснюється перевірка виконання системи обмежень (3.14)–(3.20) і умови  $\Lambda^p < \Lambda^{p-1}$ . У випадку їх порушення величина  $\delta_k^p$  кроку зсуву зменшується вдвічі і відбувається повернення до **Кроку 3.3**. В іншому випадку об'єкт  $S_k$  поміщається в точку з координатами  $(x_k^{p+1}, y_k^{p+1})$ .

**Крок 3.6.** Номер  $K$  збільшується на 1. Якщо  $K \leq I$  здійснюється перехід до **Кроку 3.1**.

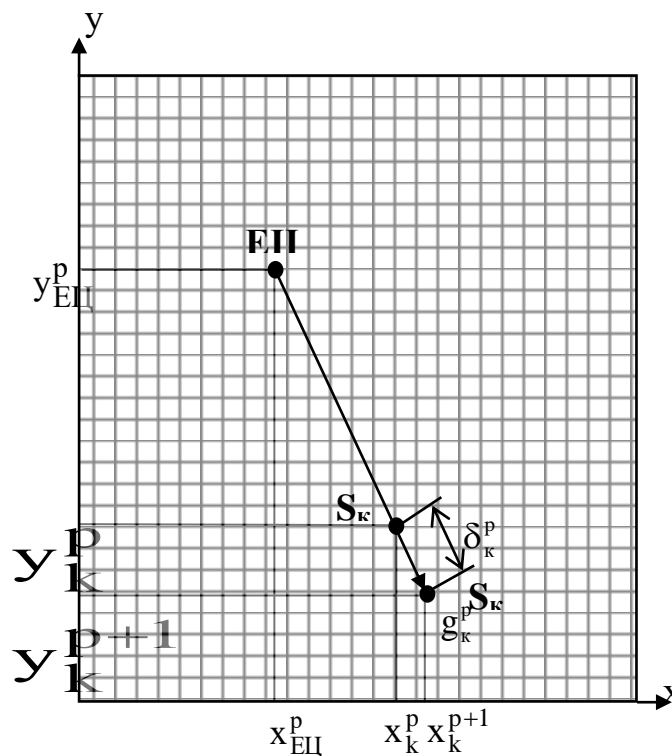


Рисунок 3.2 – Визначення параметрів зсуву рухомого об'єкта  $S_k$ .

**Крок 3.7.** Для розташування об'єктів, для відповідного вектора  $z^{p+1}$ , визначаються координати  $(x_{\text{ЕЦ}}^{p+1}, y_{\text{ЕЦ}}^{p+1})$  точки енергетичного центру вибухонебезпеки технологічного блоку за формулою (2.18).

**Крок 3.8.** Знаходяться рівняння векторів  $\vec{a}_m$ , з'єднуючих ЕЦ з центрами об'єктів  $S_m$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ) технологічного блоку, які мають прямокутну форму, а також векторів  $\vec{b}_m$ , які проходять через центр об'єктів  $S_m$  паралельно їх довгих стін.

Вектора  $\vec{a}_m$  і  $\vec{b}_m$  знаходяться за формулами, аналогічним (3.25) і мають вигляд (Рис. 3.3):

$$\vec{a}: y = \frac{y_m^p - y_{\text{ЕЦ}}^p}{x_m^p - x_{\text{ЕЦ}}^p} x + y_{\text{ЕЦ}}^p - \frac{x_{\text{ЕЦ}}^p (y_k^p - y_{\text{ЕЦ}}^p)}{x_k^p - x_{\text{ЕЦ}}^p}, \quad (3.29)$$

$$\vec{b}: y = \frac{y_B^p - y_A^p}{x_B^p - x_A^p} x + y_A^p - \frac{x_A^p (y_B^p - y_A^p)}{x_B^p - x_A^p}. \quad (3.30)$$

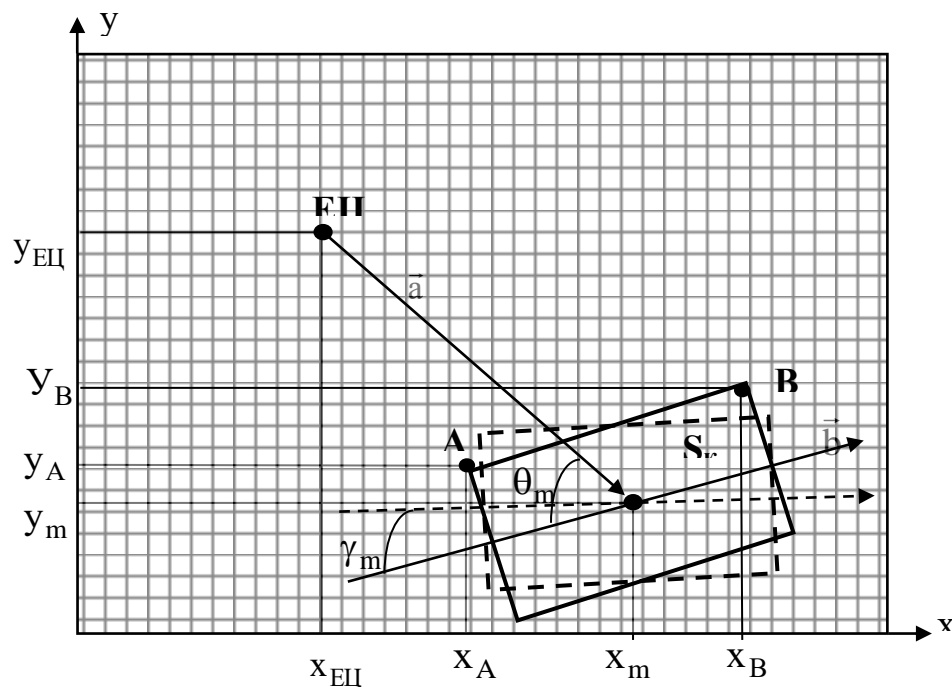


Рисунок 3.3 – Визначення параметрів повороту об'єкта  $S_m$ .

**Крок 3.9.** Визначаються кути  $\theta_m^p$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ) між векторами  $\vec{a}_m$  і  $\vec{b}_m$  для всіх об'єктів  $S_m$  на  $p$ -ой ітерації.

Згідно [33], на підставі нерівності Коші-Буняковського величину кута  $\theta_m^p$  між векторами можна визначити, виходячи зі співвідношення:

$$\cos \theta_m^p = \frac{(\vec{a}_m, \vec{b}_m)}{|\vec{a}_m| |\vec{b}_m|}, \quad (3.31)$$

де  $(\vec{a}_m, \vec{b}_m)$  – скалярний добуток векторів;  $|\vec{a}_m|, |\vec{b}_m|$  – модулі векторів:

$$(\vec{a}_m, \vec{b}_m) = (x_m - x_{\text{ЕЦ}})(x_B - x_A) + (y_m - y_{\text{ЕЦ}})(y_B - y_A), \quad (3.32)$$

$$|\vec{a}_m| = \sqrt{(x_m - x_{\text{ЕЦ}})^2 + (y_m - y_{\text{ЕЦ}})^2}, \quad (3.33)$$

$$|\vec{b}_m| = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}. \quad (3.34)$$

Таким чином,

$$\theta_m^p = \arccos \theta_m^p = \frac{(\vec{a}_m, \vec{b}_m)}{|\vec{a}_m| |\vec{b}_m|}. \quad (3.35)$$

При цьому  $\theta_m^p$  відповідає умові  $0 \leq \theta_m^p \leq \pi$ .

Якщо  $\theta_m \neq \pi/4$ , об'єкт  $S_m$  розгортається навколо точки центру на кут

$$\gamma_m = \pi/4 - \arccos \theta_m^p = \frac{(\vec{a}_m, \vec{b}_m)}{|\vec{a}_m| |\vec{b}_m|}. \quad (3.36)$$

Після повороту всіх об'єктів  $p$ -ая ітерація закінчується.

Величина цільової функції  $\Lambda^s$ , отримана на  $s$ -ой (останньої) ітерації, досить добре наближається до величини  $\min_W \Lambda$ .

При цьому зазначений алгоритм дозволяє отримати раціональне розміщення об'єктів. Це пояснюється тим, що об'єкти розміщуються послідовно. Однак вибір такого методу розв'язання, що є модифікацією методу Гаусса-Зейделя [122, 125], обумовлений особливостями даної задачі і дозволяє отримати досить хороше наближення до локального мінімуму. Мінімізація в просторі розмірності  $2I$  замінюється  $I$ -кратною мінімізацією в двовірних просторах параметрів розміщення об'єктів  $S_k$  ( $k=1, 2, \dots, I$ ). Це дозволило скоротити кількість громіздких обчислень, пов'язаних з необхідністю перевірки виконання системи обмежень, що включає в себе кількісний розрахунок величин небезпечних факторів вибуху хмари ГПС, а також за рахунок зниження розмірності і зменшення числа обмежувальних умов на кожному кроці оптимізації.

Зазначені особливості вигідно відрізняють запропонований метод розв'язання задачі від традиційних методів [122, 125, 134-136]. Схема алгоритму розв'язання задачі пошуку локального мінімуму цільової функції (4.22) наведено на рис. 3.4.

### 3.4 Перебір локальних мінімумів (Етап 5)

Як вказувалося вище, локальний мінімум оптимізаційної задачі (2.42), отриманий на **Етапі 4**, знаходиться, виходячи з допущення, що вітер в області  $\Omega$  відповідає найбільш ймовірному у цій місцевості за напрямком та швидкістю. Зміна орієнтації блоку відносно сторін світу (тобто відносно напрямку найбільш ймовірного вітру) дозволяє отримати інші локальні мінімуми оптимізаційної задачі та організувати їх перебір з визначенням найкращого з них:

$$\Lambda^{\min} = \Lambda(Z^{\min}) = \min \{ \Lambda^{f-\min} \}, f = 1, 2, \dots, F.$$

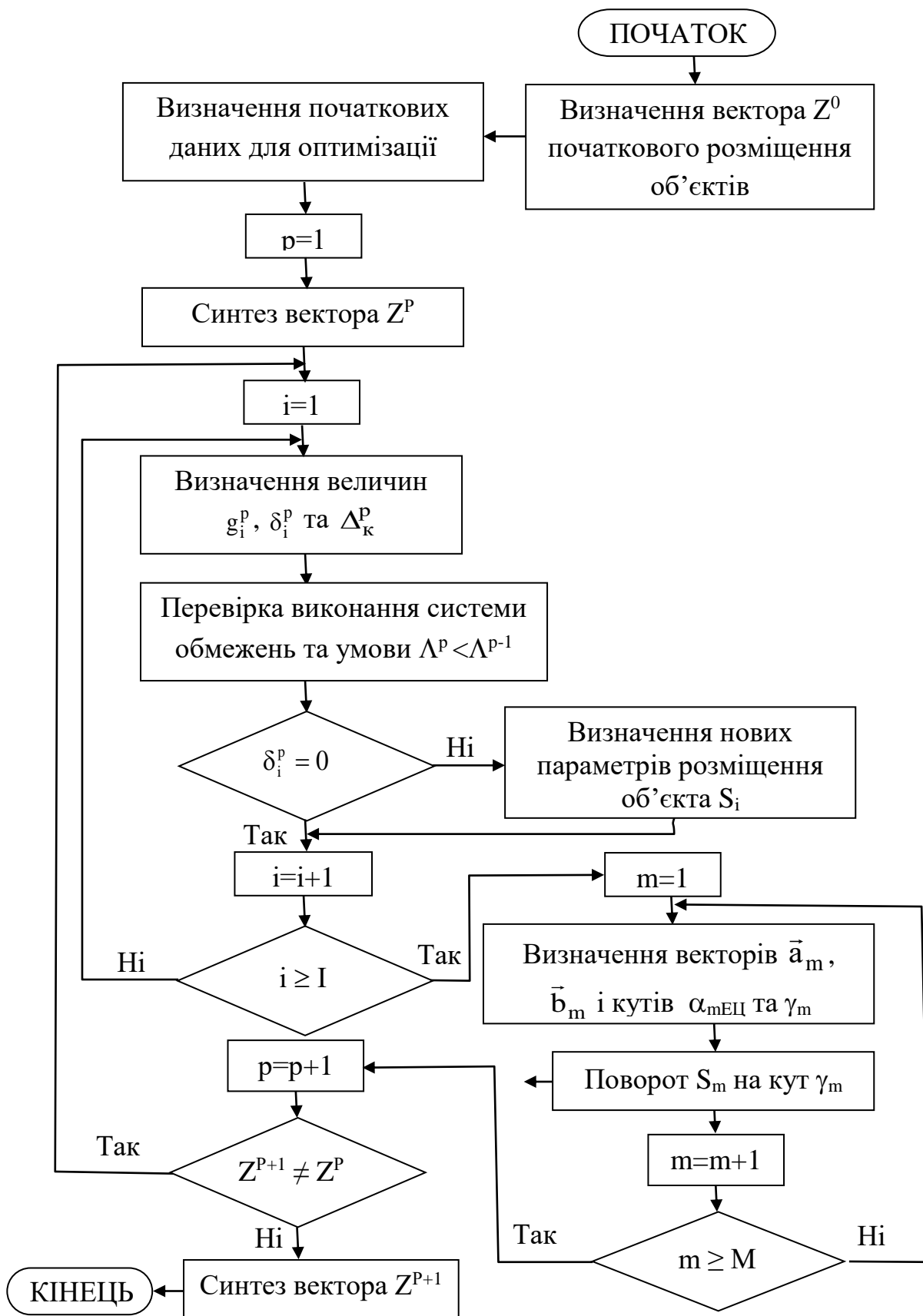


Рисунок 3.4 – Схема алгоритму методу пошуку локального мінімуму оптимізаційної задачі (2.42)



Кількість локальних мінімумів, що перебираються, може визначатися різними шляхами, наприклад, особою, яка приймає рішення, виходячи з умов конкретного завдання, виконання певних вимог і т.п.

В даному дисертаційному дослідженні розглядається вісім варіантів орієнтації технологічного блоку - північ, північний схід, схід і т.д.

Для кожного з цих напрямків визначається розміщення об'єктів в межах технологічного блоку, яке відповідає мінімальному значенню функції мети задачі, та знаходиться варіант, найкращий з восьми.

### **ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 3**

В даному розділі:

1. Показано, що задача мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку може бути зведена до задачі оптимізації розміщення обладнання в межах блоку при заданій орієнтації блоку відносно напрямку найбільш ймовірного приземного вітру.

2. Розроблено чисельний метод розв'язання оптимізаційної задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП в умовах НС з вибухом хмари ГПС, яка виникла в наслідок руйнування обладнання блоку. Метод дозволяє знайти локальний мінімум функції мети оптимізаційної задачі при заданій орієнтації блоку відносно напрямку найбільш ймовірного приземного вітру та організувати їх перебір з визначенням варіанту, якій відповідає найменшому значенню функції мети оптимізаційної задачі.

## РОЗДІЛ 4

### РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ МІНІМІЗАЦІЇ РІВНЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕКИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО БЛОКУ

В даному розділі виконано чисельну реалізацію методу мінімізації вибухонебезпеки технологічного блоку в умовах вибуху хмари ГПС за рахунок оптимального розміщення обладнання.

Реалізацію методу проведено для модельного прикладу технологічного блоку у складі чотирьох об'єктів та технологічного блоку газопереробного підприємства – типової абсорбційно-газофракціонуючої установки.

Матеріали розділу опубліковані у роботах автора [2, 3, 9, 13-15].

#### 4.1. Характеристика технологічного блоку та постановка оптимізаційної задачі

Для отримання кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП в умовах НС з вибухом хмари ГПС проведемо розрахунки згідно запропонованої методики. Розглянемо наступний приклад.

Нехай технологічний блок має у своєму складі 4 об'єкти –  $S_1, S_2, S_3, S_4$ :

- об'єкт  $S_1$  – технологічна ємність сферичної форми з газоподібним пропаном;
- технологічні апарати  $S_2, S_3$  блоку – ємності з н-бутаном, які мають форму прямого кругового циліндру;
- об'єкт  $S_4$  – будівля операторної, має форму прямокутного паралелепіпеду.

Характеристики об'єктів блоку надані в табл. 4.1. Відносний енергетичний потенціал  $E_B^i$  об'єктів  $S_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ), визначався за формулою (2.4) з урахуванням (2.5), а для обчислення величин часткових критеріїв  $\Lambda_i$  використовувалася формула (2.6).

Таблиця 4.1 – Характеристики об'єктів технологічного блоку

Об'єкти	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>
Розміри, м	d=11м	d=6м, h=8м	d=6м, h=8м	15м×7м
Тип обладнання, n	Ємнісне n = 2	Ємнісне n = 2	Ємнісне n = 2	Операторна
Q <sub>B</sub> <sup>in</sup>	0,265	0,265	0,265	–
q <sub>i2</sub>	0,9362	0,9362	0,9362	–
Q <sub>НС</sub> <sup>in</sup>	1,1·10 <sup>-4</sup>	1,3·10 <sup>-4</sup>	1,3·10 <sup>-4</sup>	–
Розміщення (x <sub>i</sub> , y <sub>i</sub> ), м	(71; 150)	(50,5; 62)	(83,5; 43)	(161; 102)
Вибухонебезпечна речовина	пропан	н-бутан	н-бутан	–
Кількість речовини, кг	8000	3000	3000	–
Агрегатний стан речовини	газ	газ	газ	–
Тиск в обладнанні, МПа	2,0	0,6	0,6	–
Температура речовини в обладнанні, °С	80	20	20	–
Відносний енергетичний потенціал, E <sub>B</sub> <sup>i</sup> , МДж	37,7	21,9	21,9	–
Часткові критерії, Λ <sub>i</sub>	0,001029	0,000598	0,000598	–

Матриця відстаней I<sub>ij</sub>, (м) між об'єктами технологічного блоку наведена на рис. 4.1.

Об'єкти	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>
S <sub>1</sub>		90	107	102
S <sub>2</sub>	90		38	118
S <sub>3</sub>	107	38		97
S <sub>4</sub>	102	118	97	

Рисунок 4.1 – Матриця відстаней між об'єктами технологічного блоку

На об'єктах  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  блоку може статися НС з повною розгерметизацією технологічного обладнання, яка супроводжується викидом газоподібних вибухонебезпечних речовин та утворенням хмар ГПС.

Для оцінки максимально можливих негативних наслідків НС приймаємо, що в хмарі переходять всі кількості викинутих вибухонебезпечних речовин.

План розміщення об'єктів у межах технологічного блоку представлено на рис. 4.2.

Об'єкти  $S_2$ ,  $S_3$  зв'язані один з одним та іншим технологічним обладнанням продуктопроводом  $\Pi_1$ , об'єкти  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  зв'язані з іншим технологічним обладнанням продуктопроводами  $\Pi_2$ – $\Pi_5$ .

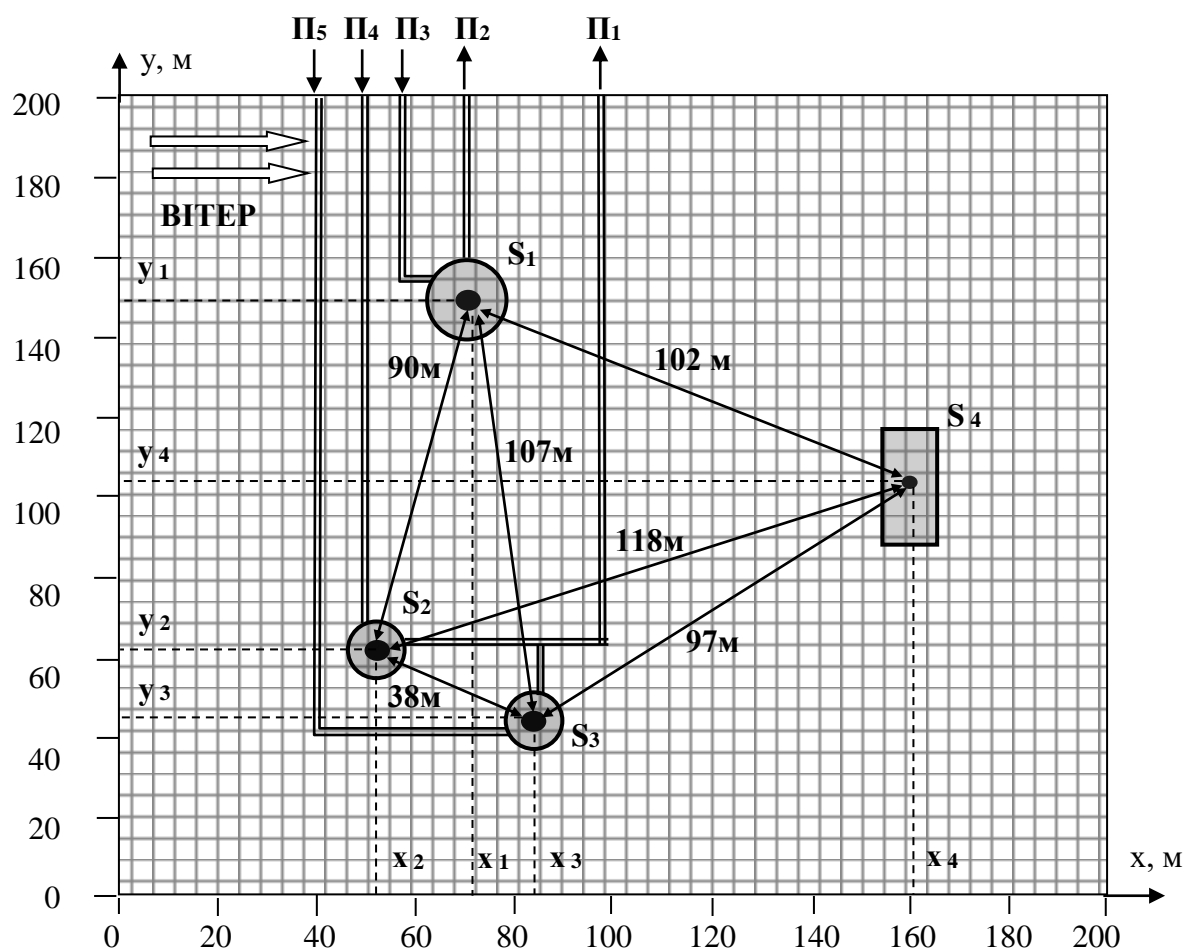


Рисунок 4.2 – Розміщення об'єктів у межах технологічного блоку

Характеристики вибухонебезпечних речовин, які обертаються на об'єктах, наведені в табл. 4.2

Таблиця 4.2 – Характеристики вибухонебезпечних речовин, що утворюють хмари ГПС на об'єктах  $S_i$  ( $i=1, 2, 3$ )

Вибухонебезпечна речовина	Пропан	Н-бутан
Молекулярна маса	44,097	58,124
Щільність газової фази при $P_0 = 101 \text{ кПа}$ , $\text{кг/м}^3$ при $0^\circ\text{C}$ при $20^\circ\text{C}$	2,004 1,872	2,702 2,519
Стехіометрична концентрація об. % $\text{кг/м}^3$	4,03	3,13
Показник адіабати	1,138	1,095
Питома теплота згорання, МДж/кг	46,4	43,5
Концентраційні межі поширення полум'я об. % $\text{кг/м}^3$	2,1 – 9,5 0,039 – 0,256	1,8 – 8,5 0,0374 – 0,2048

Надзвичайні ситуації з викидом вибухонебезпечних речовин, виникненням хмари ГПС та наступним вибухом відбуваються влітку, в денний час, в ясну погоду, температура повітря складає  $20^\circ\text{C}$ , швидкість найбільш ймовірного приземного вітру визначається за розою вітрів для даної місцевості (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Характеристика географічного приземного вітру для місцевості, де відбувається НС

Напрямок вітру	Північний	Північно-східний	Східний	Південно-східний	Південний	Південно-західний	Західний	Північно-західний
Повторення напрямків вітру, %	10	12	13	11	12	13	19	10
Середня швидкість вітру $u_{10}$ , м/с	3,9	4,2	4,0	4,2	3,3	3,3	4,0	3,9

Як свідчать дані табл. 4.3, найбільш ймовірним вітром протягом року є західний вітер зі середньою швидкістю 4,0 м/с. Напрямок вітру показаний на рис. 4.2 стрілками. Вважаємо, що на території блоку вітер не змінює своєї швидкості та напрямку. Характеристика кліматичних умов у місці НС наведена у табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Характеристика кліматичних умов у місці НС

Шорсткість поверхні $Z_{\text{пов}}$ , м	Щільність повітря $\rho_{\text{п}}$ , кг/м <sup>3</sup>	Клас стійкості атмосфери	Показник ступеня залежності швидкості вітру від висоти, $\alpha_{\text{в}}$	Швидкість вітру на висоті 10 м $u_{10}$ , м/с	Температура поверхні $t_{\text{пов}}$ , °С
1,0	1,204	конвекція	0,15	4,0	20

Оптимізаційна задача формулюється наступним чином [3, 14]:

знайти такий варіант розміщення об'єктів  $S_1, S_2, S_3, S_4$  в межах технологічного блоку, щоб величина інтегрального критерію

вибухонебезпеки  $\Lambda$  вигляду (2.2) з урахуванням заданої системи обмежень була мінімальною

$$\min_W \Lambda = \min_W \left( \sum_{i=1}^I \lambda_i \Lambda_i \right),$$

де область  $W$  допустимих розв'язків оптимізаційної задачі задається системою обмежень вигляду (2.30)–(2.33), (2.37)–(2.39).

#### 4.2. Визначення початкових даних оптимізаційної задачі

Згідно схемі запропонованого методу, для розв'язання оптимізаційної задачі необхідно задати початковий варіант  $S^0(x_1^0, y_1^0, \dots, x_N^0, y_N^0)$  розміщення об'єктів у межах технологічного блоку та для нього визначити параметри НС з вибухом хмари ГПС для кожного з множини об'єктів розміщення та характеристики впливу вибуху хмари ГПС на  $i$ -му об'єкті на інші об'єкти блоку [2, 13].

##### 4.2.1. Визначення початкового розміщення об'єктів (етап 1)

Визначаємо початковий варіант  $S^0(x_1^0, y_1^0, \dots, x_4^0, y_4^0)$  розміщення об'єктів у межах технологічного блоку – початкову точку оптимізації (етап 1). В якості такого варіанту використовуємо розміщення об'єктів, яке наведено на рис. 4.2.

Таким чином, вектор початкових параметрів розміщення об'єктів має вигляд  $S^0(x_1^0, y_1^0, \dots, x_4^0, y_4^0) = (71; 150), (50,5; 62), (83,5; 43)$ .

##### 4.2.2. Розрахунок початкових характеристик хмар ГПС (етап 2)

Для вказаного варіанта розміщення визначаємо початкові характеристики хмар ГПС:

- маси  $M_{xi}$  вибухонебезпечних речовин, які виходить з пошкодженого обладнання при НС на об'єктах  $S_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) та утворюють хмари ГПС (формули 3.1, 3.2);
- щільність  $\rho_i^0$  ( $i=1, 2, 3$ ) вибухонебезпечних речовин в хмарах ГПС в початковий момент часу (формула 3.3);
- розміри  $R_i^0$  та об'єм  $V_i^0$  хмар ГПС в початковий момент часу (формула 3.4).

Результати розрахунків наведені в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Початкові характеристики хмар ГПС, які утворилися в результаті НС на об'єктах  $S_i$  ( $i=1, 2, 3$ )

Номер об'єкту, $i$	$M_{xi}$ , кг	$\rho_i^0$ , кг/м <sup>3</sup>	$R_i^0$ , м	$V_i^0$ , м <sup>3</sup>
1	8000	0,146	23,9	54609
2	3000	0,497	11,3	6036
3	3000	0,497	11,3	6036

На основі визначених даних розраховуємо концентраційне поле дрейфуючих хмар ГПС.

4.2.3. Розрахунок концентраційного поля вибухонебезпечної речовини в хмарах ГПС для початкового варіанту розміщення об'єктів (етап 2)

Концентраційне поле  $c(x, y, z, t)$  вибухонебезпечної речовини у хмарі ГПС (первинної) обчислюється за формулою (3.5) з урахуванням формул (3.6) – (3.8).

Максимальна концентрація при проходженні первинної хмари спостерігається на осі  $OX$  ( $y = 0, z = 0$ ) в центрі хмари і обчислюється за



формулою (3.9) при цьому час  $t$  дорівнює  $t = x / u_{10}$ .

Розрахуємо розподіли концентрації пропану та н-бутану у хмарах ГПС, які утворилися при НС з руйнуванням обладнання на об'єктах  $S_i$  ( $i=1, 2, 3$ ). Початкові характеристики хмар наведені у табл. 4.5.

#### 4.2.3.1 Надзвичайна ситуація на об'єкті $S_1$

Визначимо концентраційне поле у хмарі газоповітряної суміші пропану с повітрям, що виникла при НС на об'єкті  $S_1$ , у моменти часу  $t_1 = 5$  секунд та  $t_2 = 10$  секунд при швидкості приземного вітру 4 м/с. Маса пропану, що перейшла до хмари, складає 8000 кг [15].

На рис. 4.3 наведений графік розподілу концентрації пропану  $c_{1\_проп}(x, y, z, t)$ , [кг/м<sup>3</sup>], у дрейфуючій хмарі на висоті  $z = 1$  м у момент часу  $t_1 = 5$  секунд після НС з руйнуванням обладнання на об'єкті  $S_1$ .

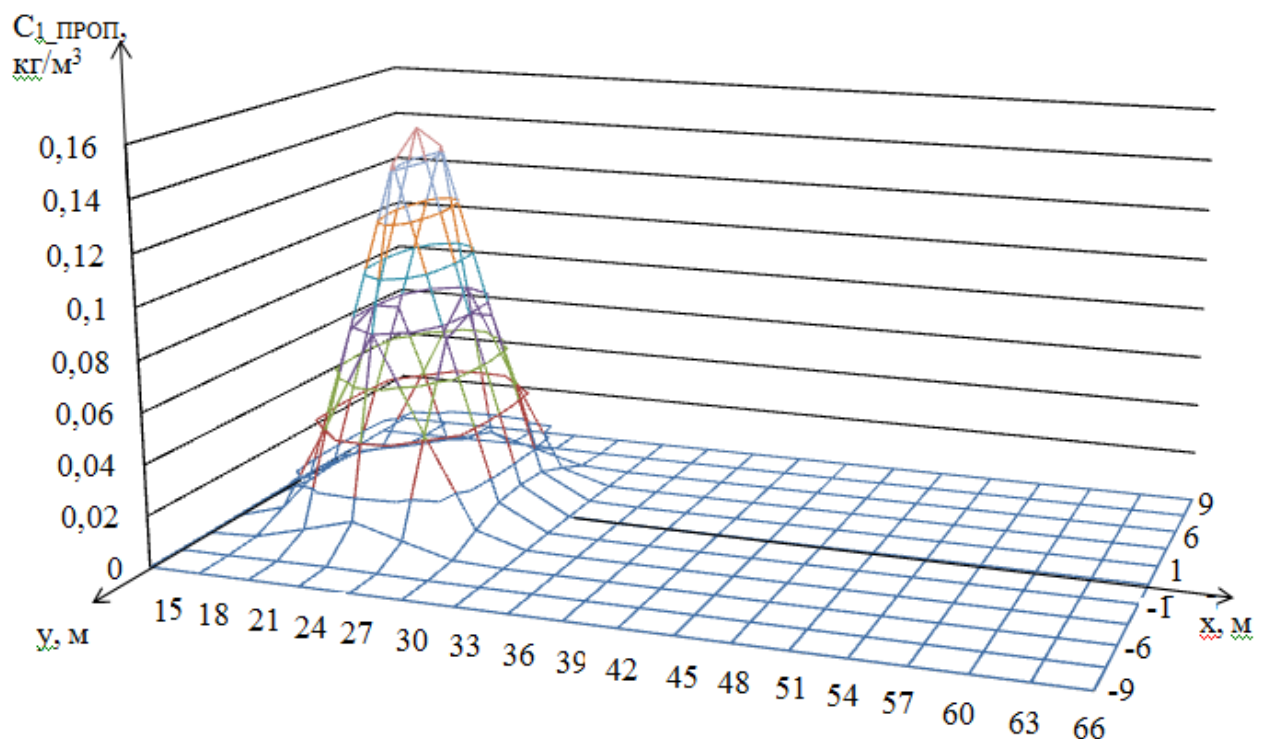


Рисунок 4.3 – Розподіл концентрації пропану  $c_{1\_проп}(x, y, z, t)$  у дрейфуючій хмарі на висоті  $z = 1$  м у момент часу  $t_1 = 5$  секунд після НС.

На рис. 4.4 наведений графік розподілу концентрації пропану  $c_{2\_проп}(x, y, z, t)$ , [кг/м<sup>3</sup>], у дрейфуючій хмарі на висоті  $z = 1$  м у момент  $t_1 = 10$  секунд після НС з руйнуванням обладнання на об'єкті  $S_1$ .

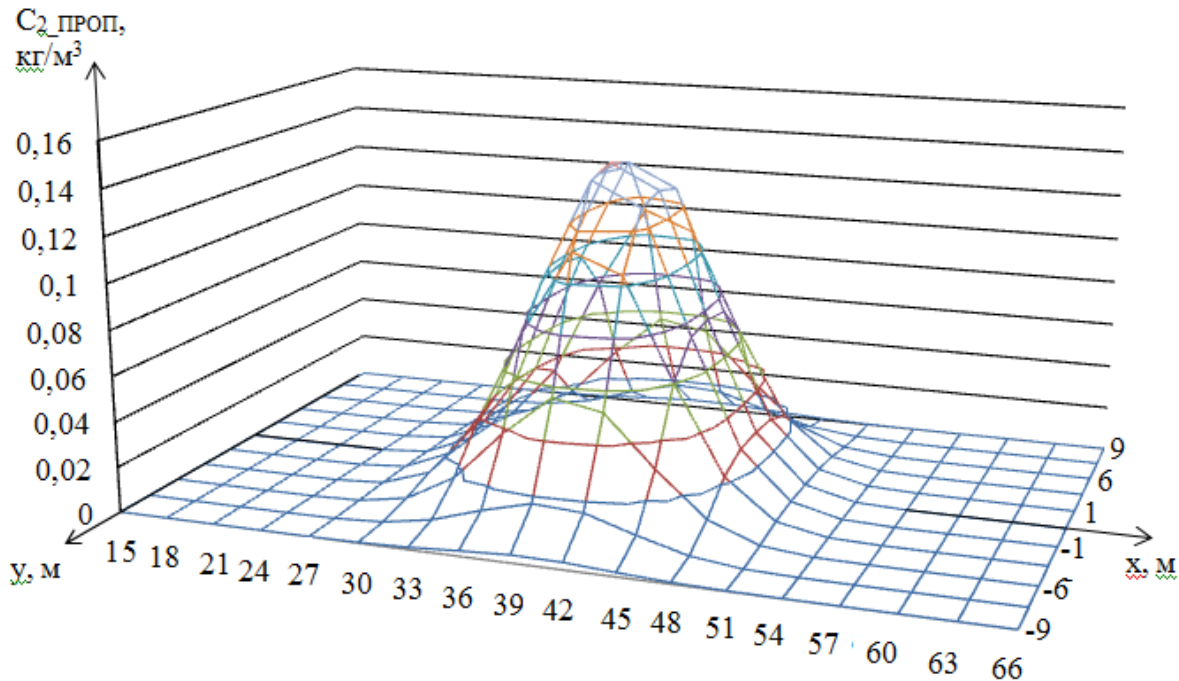


Рисунок 4.4 – Розподіл концентрації пропану  $c_{2\_проп}(x, y, z, t)$  у дрейфуючій хмарі на висоті  $z = 1$  м у момент  $t_1 = 10$  секунд після НС

#### 4.2.3.2 Надзвичайна ситуація на об'єктах $S_2$ та $S_3$

Надзвичайна ситуація з руйнуванням обладнання на об'єктах  $S_2$  та  $S_3$  технологічного блоку призводить до викиду у повітря 3000 кг газоподібного н-бутану з утворенням хмар газоповітряної суміші н-бутану с повітрям та їх подальшими вибухами. Визначимо концентраційне поле у хмарі газоповітряної суміші н-бутану с повітрям у моменти часу  $t_1 = 5$  секунд та  $t_2 = 10$  секунд.

На рис. 4.5 наведений графік розподілу концентрації н-бутану  $c_{1\_бут}(x, y, z, t)$ , [кг/м<sup>3</sup>], у дрейфуючій хмарі на висоті  $z = 1$  м у момент часу  $t_1 = 5$  секунд після НС з руйнуванням обладнання на об'єктах  $S_2$  та  $S_3$ .

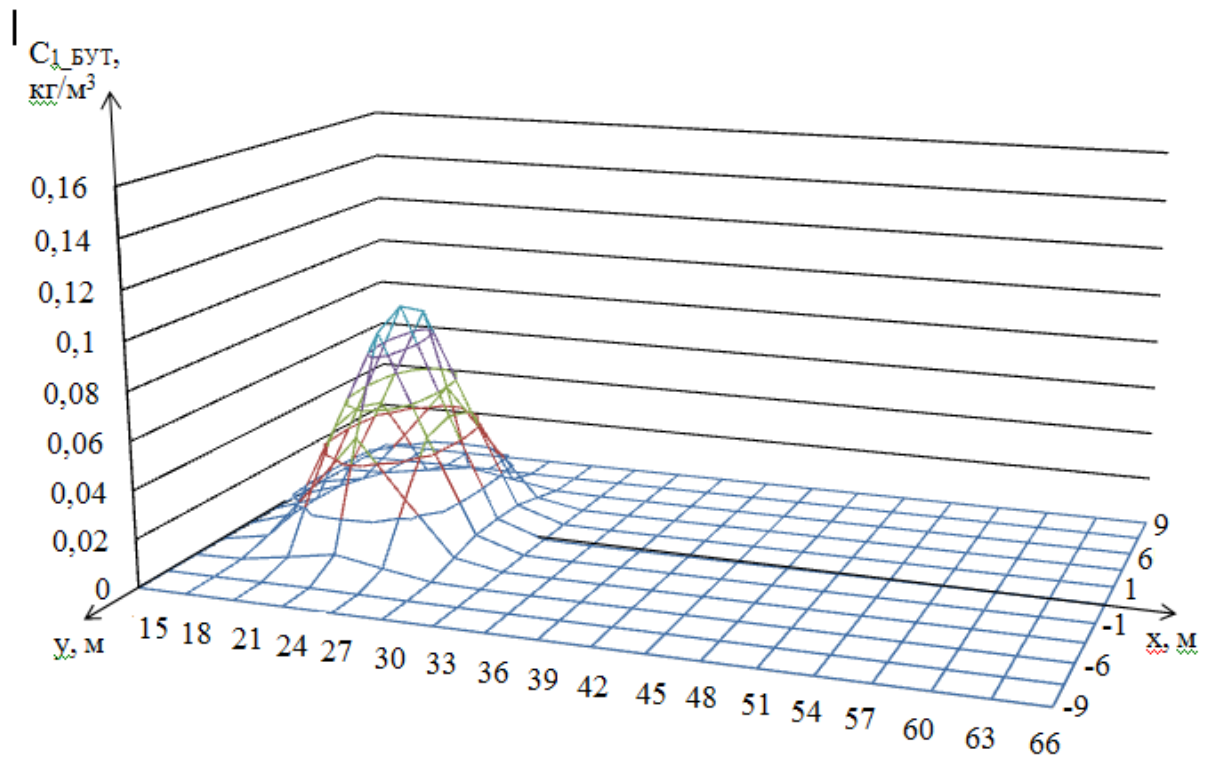


Рисунок 4.5 – розподілу концентрації н-бутану  $c_{1\_БУТ}(x, y, z, t)$ , [кг/м<sup>3</sup>], у дрейфуючій хмарі на висоті  $z = 1$  м у момент часу  $t_1 = 5$  секунд після НС

На рис. 4.6 наведений графік розподілу концентрації н-бутану  $c_{2\_БУТ}(x, y, z, t)$ , [кг/м<sup>3</sup>], у дрейфуючій хмарі на висоті  $z = 1$  м у момент  $t_1 = 10$  секунд після НС з руйнуванням обладнання на об'єктах  $S_2$  та  $S_3$ .

4.2.3.3 Розрахунок маси вибухонебезпечної речовини хмари ГПС, що приймає участь у вибуху

Розрахунок маси вибухонебезпечної речовини хмари ГПС, що приймає участь у вибуху, виконується згідно формули (2.19):

$$M_{Vi} = \frac{4}{3} \int_{x_1}^{x_2} \int_0^{y_2} \int_0^{z_1} c_{Vi}(x, y, z, t) dx dy dz, \quad (4.1)$$

де межі інтегрування знаходяться з рис. 4.7.

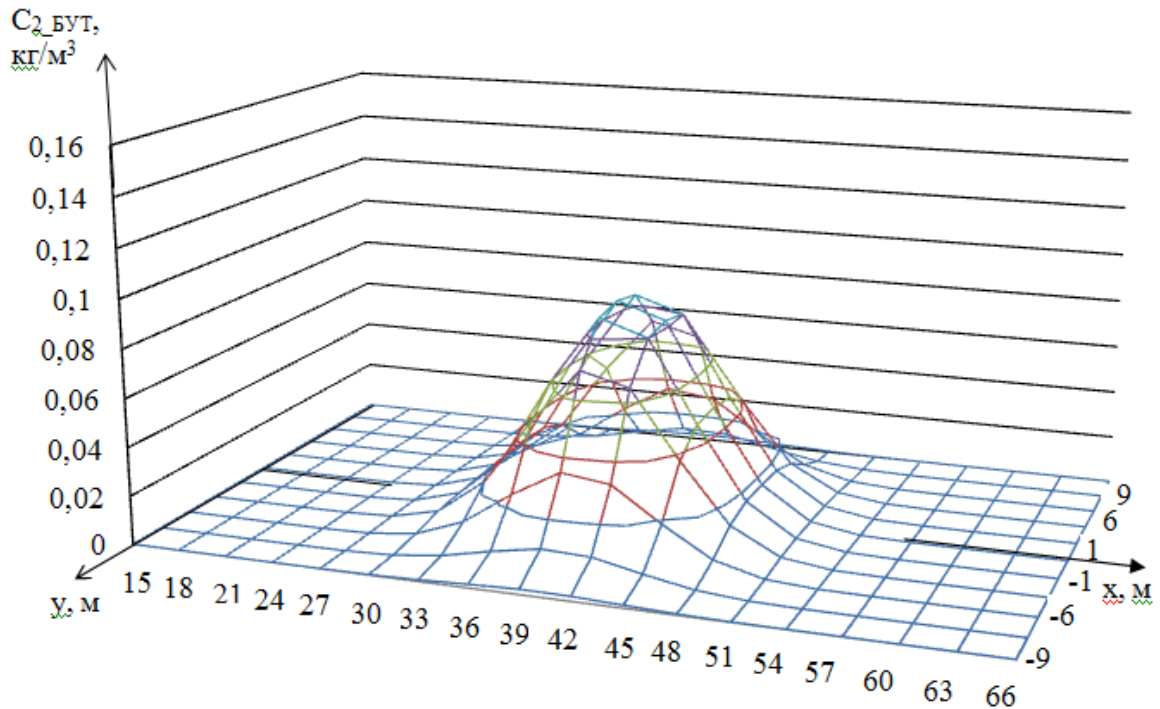


Рисунок 4.6 – Розподіл концентрації н-бутану  $c_{2\_БУТ}(x, y, z, t)$  у дрейфуючій хмарі на висоті  $z = 1$  м у момент  $t_1 = 10$  секунд після НС

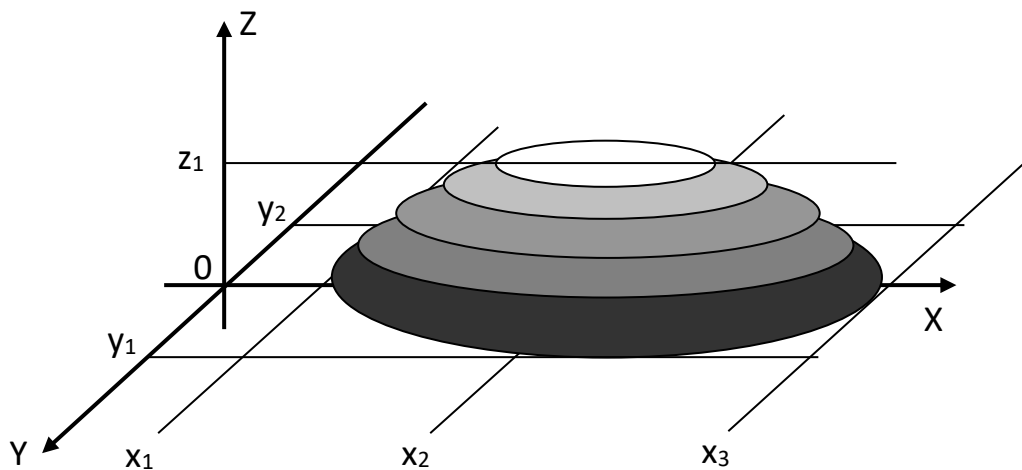


Рисунок 4.7 – Визначення меж інтегрування при розрахунку маси вибухонебезпечної речовини хмари ГПС, що приймає участь у вибуху

На рис. 4.7 схематично зображено частину хмари ГПС, на границі якої досягається концентрація вибухонебезпечної речовини  $c = c_{НКМП}$ . У середині

хмари  $c > c_{\text{НКМПП}}$ , але не перевищує  $c_{\text{ВКМПП}}$ . Для визначення поверхні, на якій  $c = c_{\text{НКМПП}}$ , були побудовані перерізи  $z = \text{const}$ , на межі яких  $c = c_{\text{НКМПП}}$ . Максимальна величина  $z$ , для якої ще існує переріз зі значенням на межі концентрації  $c = c_{\text{НКМПП}}$ , приймається за  $z_2$ .

Величина  $x_2$  відповідає максимуму концентрації вибухонебезпечної речовини у хмарі при заданій величині  $z$ , величини  $x_1$  та  $x_3$  – координати точки на осі викиду, для яких  $c(x_1) = c(x_3) = c_{\text{НКМПП}}$ . Такі ж умови виконуються для точок  $y_1$  та  $y_2$ , точка  $y_2$  з максимальним значенням концентрації лежить на осі ОХ.

Результати розрахунків основних характеристик дрейфуючих хмар ГПС, що виникли при НС на об'єктах  $S_1, S_2, S_3$  технологічного блоку при західному вітрі 4,0 м/с, наведені в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Характеристики дрейфуючих хмар ГПС, що виникли при НС на об'єктах  $S_1, S_2, S_3$  технологічного блоку при західному вітрі 4,0 м/с

Час після вибуху, с	t = 5			t = 10			
	Об'єкти $S_i$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
$x_{i1}, \text{ м}$		83	65	98	102	83	116
$x_{i2}, \text{ м}$		91	70,5	103,5	111	90,5	123,5
$x_{i3}, \text{ м}$		98	80	113	120	98	131
$y_{i1}, \text{ м}$		144	59	40	146	59,5	40,5
$y_{i2}, \text{ м}$		150	62	43	150	62	43
$y_{i3}, \text{ м}$		156	67	46	154	64,5	45,5
$z_{i2}, \text{ м}$		5,2	3,1	3,1	4,3	2,7	2,7
$M_{\text{Bi}}$		1023	403	403	798	284	284

Епіцентри вибухів хмар ГПС (див. рис. 3.2), що виникли при НС на об'єктах  $S_1, S_2, S_3$ , мають координати  $(x_{i2}, y_{i2})$ .

#### 4.2.4. Розрахунок характеристик вибухів хмар ГПС для початкового варіанту розміщення об'єктів (етап 2)

Визначення характеристик вибухів хмар ГПС, що виникли в наслідок НС з викидом газоподібної вибухонебезпечної речовини з пошкодженого технологічного обладнання, проводилося згідно з методикою, викладеною в п. 3.2.1 розділу 3.

Розрахунок ефективного енергетичного запасу  $E_{ix}$  хмар ГПС, що виникли при НС на об'єктах  $S_1, S_2, S_3$ , виконувався за формулою (2.16) з урахуванням даних табл. 4.6.

Дані для проведення розрахунку характеристик вибухів хмар ГПС для випадку західного вітру 4,0 м/с зведені у табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Дані для розрахунку характеристик вибухів хмар ГПС (західний вітер 4,0 м/с)

Номер об'єкту, $i$	$E_{xi}$ , МДж		Координати епіцентру				Клас горючої речовини	Рівень забудови території
	5 сек.	10 сек.	5 секунд		10 секунд			
			$X_{ei}$ , М	$Y_{ei}$ , М	$X_{ei}$ , М	$Y_{ei}$ , М		
1	47467	37027	91	150	111	150	2	4
2	17530	12354	70,5	62	90,5	62	2	4
3	17530	12354	103,5	43	123,5	43	2	4

За даними табл. 4.7 та згідно методики п. 2.2.1.4 були визначені кількісні величини впливу (надлишковий тиск  $\Delta P_{ij}$  та імпульс  $I_{ij}$ ) вибуху хмари ГПС, що стався на об'єкті  $S_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) через 5 та 10 секунд при західному вітрі 4,0 м/с, на суміжні об'єкти технологічного блоку. Результати розрахунків наведені у табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Результати розрахунку параметрів впливу вибуху хмари ГПС, що стався на об'єкті  $S_i$ , на суміжні об'єкти технологічного блоку (західний вітер 4,0 м/с)

Номер об'єкту, i	Параметри впливу вибуху хмари ГПС, що стався на об'єкті $S_i$ , на суміжні об'єкти технологічного блоку							
	$S_1$		$S_2$		$S_3$		$S_4$	
	$\Delta P_{i1}$ , кПа	$I_{i1}$ , Па·с	$\Delta P_{i2}$ , кПа	$I_{i2}$ , Па·с	$\Delta P_{i3}$ , кПа	$I_{i3}$ , Па·с	$\Delta P_{i4}$ , кПа	$I_{i4}$ , Па·с
5 секунд								
1			9,7	8142	8,9	8203	10,8	8087
2	7,8	7125			9,8	8226	5,7	5983
3	7,2	6997	9,8	8226			5,9	6042
10 секунд								
1			8,5	7446	8,3	7393	9,5	7339
2	5,9	5973			8,3	7228	3,6	4298
3	5,3	5698	8,3	7228			3,7	4482

За даними табл. 4.6 та згідно рекомендацій п. 3.2.1 розраховані радіуси зони повних руйнувань  $R_i^{100}$  та безпечної зони  $R_i^0$  при вибуху хмари ГПС, що виникла в наслідку НС на об'єкті  $S_i$ , ймовірності руйнування суміжних об'єктів при вибуху хмари ГПС на об'єкті  $S_i$ , а також величини тротилового еквіваленту кожного з вибухів. Результати розрахунків для вибухів, які сталися через 5 секунд та 10 секунд після викиду при західному вітрі 4.0 м/с, наведені в табл. 4.9. Для порівняння в табл. 4.9 наведені також результати розрахунку параметрів вибуху на об'єкті  $S_1$  технологічного блоку, якщо вважати, що хмара ГПС вибухнула відразу після виникнення.

Таблиця 4.9 – Результати розрахунку характеристик вибухів хмар ГПС (західний вітер 4,0 м/с)

Номер об'єкту, $i$	Радіуси зон руйнування		Ймовірність руйнування суміжних об'єктів при вибуху на об'єкті $S_i$				$W_i$ , кг
	$R_i^{100}$ , м	$R_i^0$ , м	$p_{i1}$	$p_{i2}$	$p_{i3}$	$p_{i4}$	
0 секунд							
1	109,6	1903		1,00	1,00	1,00	58513,8
5 секунд							
1	59,4	656		0,013	0,006	0,017	4667,4
2	35,6	393	0,003		1,00	0,001	1721,8
3	35,6	393	0,0015	0,019		0,009	1721,8
10 секунд							
1	53,2	588		0,002	0,0015	0,016	3640,1
2	28,7	317	0,002		1,00	0,0011	1213,4
3	28,7	317	0,001	0,009		0,01	1213,4

Для поточного положення хмар ГПС знаходимо координати енергетичних центрів за формулою (2.18) з урахуванням формул (2.16), (2.17), визначених координат епіцентрів вибухів та величин  $M_{vi}$ . Дані розрахунків координат ЕЦ для вибухів хмар ГПС, які відбулися через 5 секунд та 10 секунд після виникнення хмар при західному вітрі 4,0 м/с, зводимо в табл. 4,10

Таблиця 4.10 – Координати ЕЦ вибухів хмар ГПС

Час вибухів після виникнення хмар ГПС, секунди	Координати ЕЦ вибухів хмар ГПС	
	$X_{ЕЦ}$ , м	$Y_{ЕЦ}$ , м
5	89,3	108,6
10	109,4	110,9



На рис. 4.8 та 4.9 показані місцеположення ЕЦ та зони повних руйнувань від вибухів хмар ГПС, які виникли в наслідок НС на об'єктах  $S_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) при західному вітрі швидкістю 4 м/с. Рис. 4.8 відповідає випадку, коли вибух стався через 5 секунд після виникнення хмар ГПС, рис. 4.9 – випадку, коли вибух стався через 10 секунд після виникнення хмар ГПС.

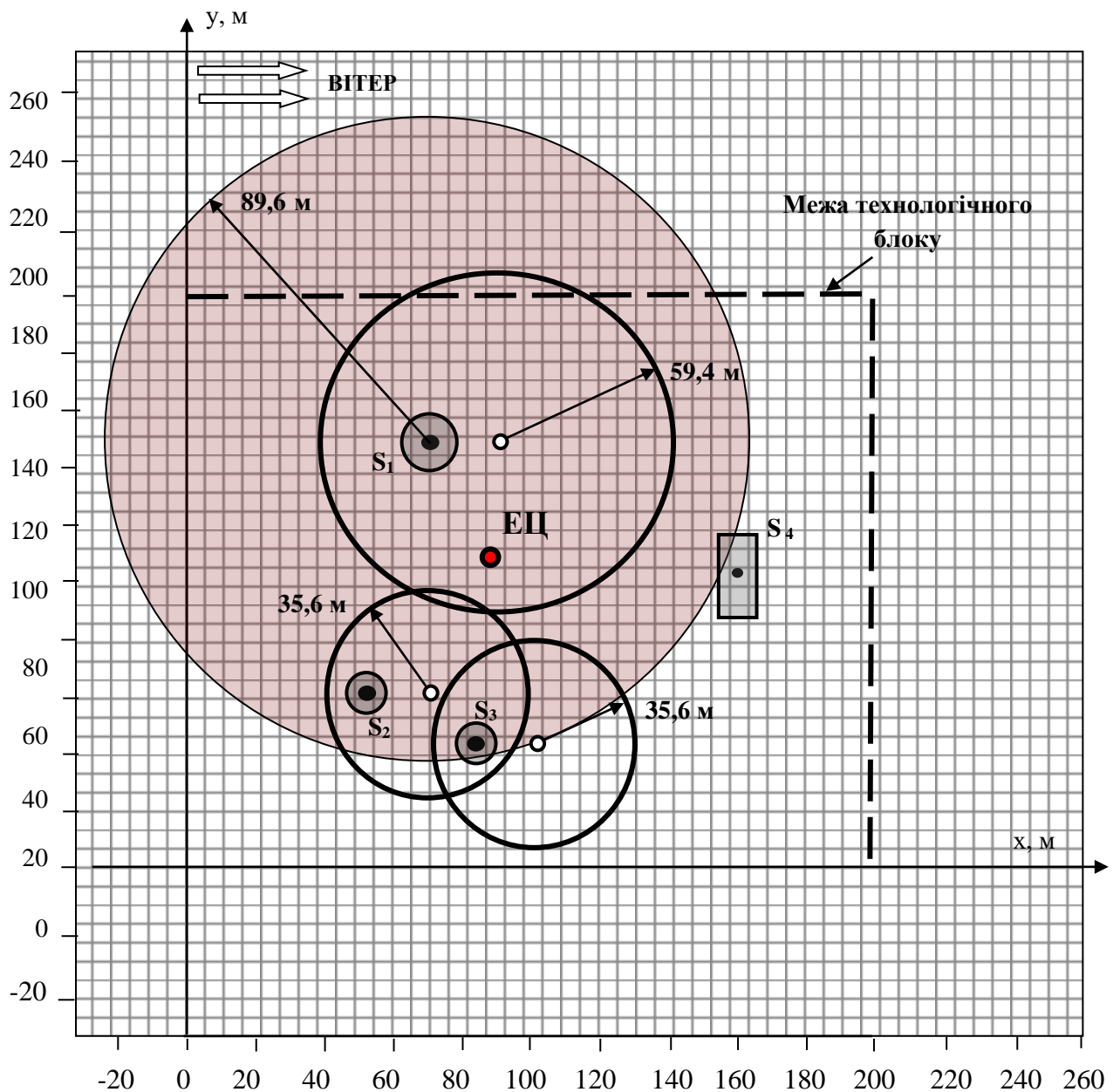


Рисунок 4.8 – Радіуси повних руйнувань від вибухів хмар ГПС для випадку, коли вибухи сталися через 5 секунд після виникнення хмар ГПС (західний вітер 4,0 м/с)

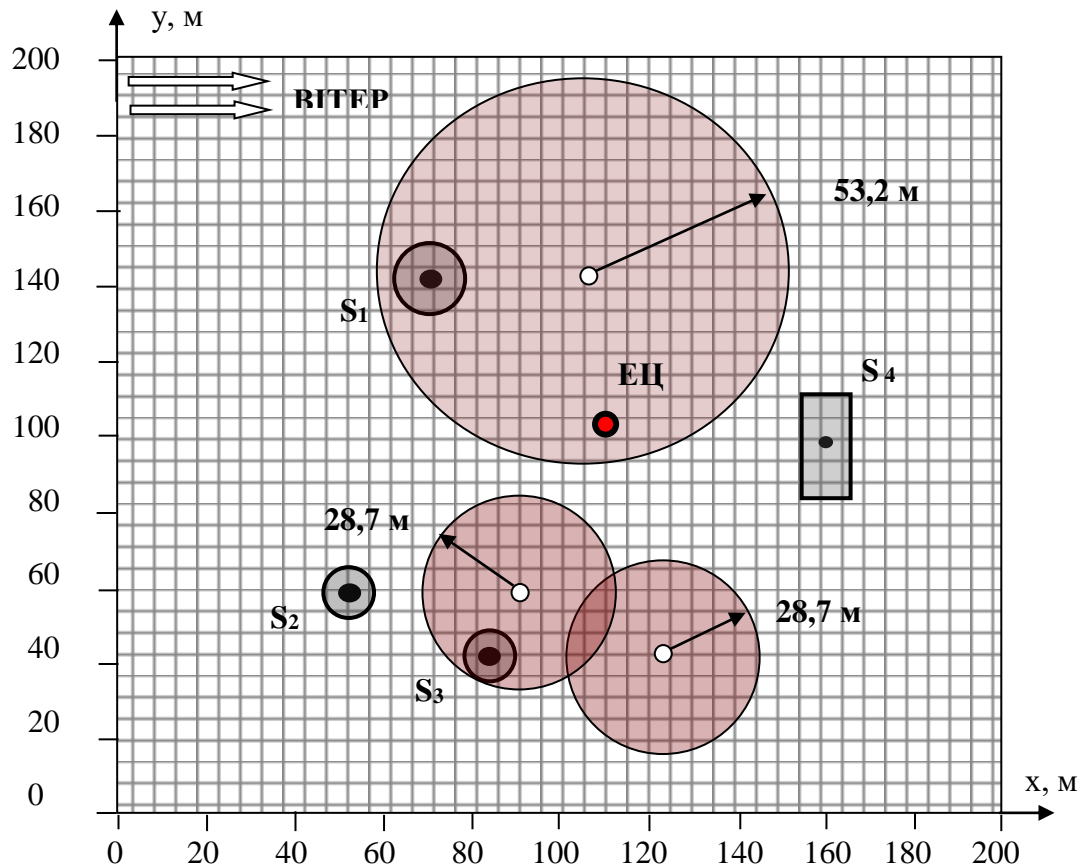


Рисунок 4.9 – Радіуси повних руйнувань від вибухів хмар ГПС для випадку, коли вибухи сталися через 10 секунд після виникнення хмар ГПС (західний вітер 4,0 м/с)

Для порівняння на рис. 4.8 наведена також зона повних руйнувань від вибуху хмари ГПС, що виникла на об'єкті  $S_1$  технологічного блоку, якщо вважати, що вибух стався відразу після її виникнення і ньому приймала участь уся маса вибухонебезпечної речовини, яка утворила хмару ГПС.

Як видно з рис. 4.8, для цього випадку у зоні повних руйнувань від вибуху на об'єкті  $S_1$  опиняються усі інші об'єкти технологічного блоку. Такий результат є малоймовірним, про що свідчать результати статистичних досліджень [134].

Врахування дрейфу хмари ГПС та процесу її розсіювання під дією турбулентної дифузії [129, 130, 135, 136] дозволяє отримати більш точний та більш реальний прогноз розвитку надзвичайної ситуації з точки зору

потужності вибуху та місця знаходження його епіцентру, а також рівня впливу небезпечних факторів вибуху на сусідні об'єкти.

4.2.5 Розрахунок коефіцієнтів  $k_{ij}$ ,  $\alpha_{ij}$  та інтегрального критерію  $\Lambda$  для початкового варіанту  $S^0(x_1^0, y_1^0, \dots, x_4^0, y_4^0)$  розміщення об'єктів (Етап 3)

Розрахунок коефіцієнтів  $k_{ij}$ ,  $\alpha_{ij}$ ,  $\lambda_i$  для початкового варіанту розміщення об'єктів  $S_i$  виконувався згідно методики, яка наведена в п. 3.2, та даних табл. 4.1, табл. 4.6, табл. 4.9 та табл. 4.10.

Результати розрахунків коефіцієнтів  $k_{ij}$ ,  $\alpha_{ij}$ ,  $\lambda_i$  для початкового варіанту розміщення об'єктів  $S_i$  для випадків, коли вибух стався через 5 секунд та 10 секунд після виникнення хмар ГПС наведені в табл. 4.11. Там також наведені значення коефіцієнтів  $k_{ij}$ ,  $\alpha_{ij}$ ,  $\lambda_i$  для випадку, коли вибух стався відразу після виникнення хмари ГПС.

За даними табл. 4.11 та табл. 4.1 розраховуємо, згідно формули (2.2), величину інтегрального критерію  $\Lambda$  для початкового варіанту розміщення об'єктів технологічного блоку та часу вибуху хмари ГПС  $t = 5$  секунд та  $t = 10$  секунд:

$t = 5$  секунд

$$\Lambda = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \Lambda_i = 1,0348 \cdot 0,001029 + 2,0039 \cdot 0,000598 + 1,0287 \cdot 0,000598 =$$

0,0029;

$t = 10$  секунд

$$\Lambda = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \Lambda_i = 1,0179 \cdot 0,001029 + 2,0030 \cdot 0,000598 + 1,0194 \cdot 0,000598 =$$

0,0028.

Таблиця 4.11 – Результати розрахунку коефіцієнтів  $k_{ij}$ ,  $\alpha_{ij}$ ,  $\lambda_i$  для початкового варіанту розміщення об'єктів  $S_i$

Об'єкт, на якому стався вибух, $S_i$	Параметр, що розраховується	Об'єкти $S_j$ технологічного блоку				$\lambda_i$
		$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	
$t = 0$ секунд						
$S_1$	$k_{1j}$		1,0	1,0	1,0	4,1
	$\alpha_{1j}$		1,0	1,0	1,1	
$t = 5$ секунд						
$S_1$	$k_{1j}$		0,013	0,006	0,017	1,0348
	$\alpha_{1j}$		1,0	1,0	0,93	
$S_2$	$k_{2j}$	0,003		1,0	0,001	2,0039
	$\alpha_{2j}$	1,0		1,0	0,92	
$S_3$	$k_{3j}$	0,0015	0,019		0,009	1,0287
	$\alpha_{2j}$	1,0	1,0		0,91	
$t = 10$ секунд						
$S_1$	$k_{1j}$		0,002	0,0015	0,016	1,0179
	$\alpha_{1j}$		1,0	1,0	0,9	
$S_2$	$k_{2j}$	0,002		1,00	0,0011	2,0030
	$\alpha_{2j}$	1,0		1,0	0,93	
$S_3$	$k_{3j}$	0,001	0,009		0,01	1,0194
	$\alpha_{3j}$	1,0	1,0		0,94	

Таким чином, визначено множину початкових даних для розв'язання оптимізаційної задачі 2.3 (етап 1, етап 2 та етап 3) мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку.

4.3 Визначення вектору параметрів розміщення об'єктів, що відповідає локальному мінімуму цільового критерію оптимізаційної задачі при заданій орієнтації блоку відносно сторін світу (етап 4)

Згідно схемі методу розв'язання оптимізаційної задачі 2.42 (п. 3.3), першим кроком є вибір об'єкту  $S_k$ , що першим змінює своє положення.

#### 4.3.1 Вибір об'єкту, що першим змінює своє положення

Як вказувалося у третьому розділі, вибір об'єкта, який першим розпочинає змінювати параметри розміщення, може здійснюватися різними шляхами, виходячи з умов конкретної задачі. У даному дисертаційному дослідженні приймається, що першим змінює своє положення об'єкт, який має найменше значення величини  $\lambda_i \Lambda_{i.}$ ,  $i = 1, 2, 3$ .

*Зауваження 4.1.* При подальших розрахунках вважаємо, що вибух хмари ГПС стався у момент часу  $t = 10$  секунд.

За даними табл. 4.1 і табл. 4.11 проводимо відповідні розрахунки. Результати розрахунків зводимо у табл. 4.12.

Таблиця 4.12 – Результати визначення послідовності зміни положення об'єктів

Об'єкти	$\Lambda_{i.}$	$\lambda_i$	$\lambda_i \Lambda_{i.}$	Номер об'єкту у послідовності зміни положення
$S_1$	0,001029	1,0179	0,00104742	2
$S_2$	0,000598	2,0030	0,00119779	1
$S_3$	0,000598	1,0194	0,00060960	3

Таким чином, першим змінює своє положення об'єкт  $S_2$ , другим – об'єкт  $S_1$ , останнім – об'єкт  $S_3$ .

Наступним кроком розв'язання оптимізаційної задачі 2.42 є визначення обмежень, які формують область допустимих розв'язків на даній ітерації.

#### 4.3.2 Визначення області допустимих розв'язків оптимізаційної задачі (2.42)

Як вказувалося в п. 2.2.2 розділу 2 на параметри розміщення об'єктів  $S_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) накладається система геометричних і технологічних обмежень (2.30) - (2.33), (2.37) - (2.39), що формує область  $W$  допустимих розв'язків оптимізаційної задачі (2.42).

На кроці 2 з неї виділяються обмеження, що накладаються на параметри розміщення рухомого об'єкта  $S_k$ . В нашому випадку система обмежень включає в себе наступні умови (п. 2.2.2):

геометричні обмеження

$$\Phi_{S_{ij}}(x_i, y_i, x_j, y_j) > 0, \quad (4.2)$$

$$\Phi_{i0}(x_i, y_i, m_0) = 0, \quad (4.3)$$

технологічні обмеження

$$\left[ (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \right]^{1/2} - r_{ij}^{\min} \geq 0, \quad (4.4)$$

$$\left[ (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \right]^{1/2} - r_{ij}^{\max} \leq 0. \quad (4.5)$$

Виходячи з того, що об'єкти  $S_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) мають сферичну або циліндричну форми (тобто їх проекції – це коло, а параметри розміщення співпадають з його центром), то при  $r_{ij}^{\min} \leq r_i + r_j$  умови (4.2) неперетину об'єктів  $S_i$  та  $S_j$  мають вигляд

$$\left[ (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \right]^{1/2} - r_i - r_j \geq 0, \quad (4.6)$$

де  $r_i$  та  $r_j$  – радіуси проєкцій об'єктів  $S_i$  та  $S_j$  відповідно.

В протилежному випадку умови (4.2) неперетину об'єктів  $S_i$  та  $S_j$  співпадають з технологічними умовами (4.5).

Для технологічному блоку квадратної форми (рис. 4.10) умови (4.6)

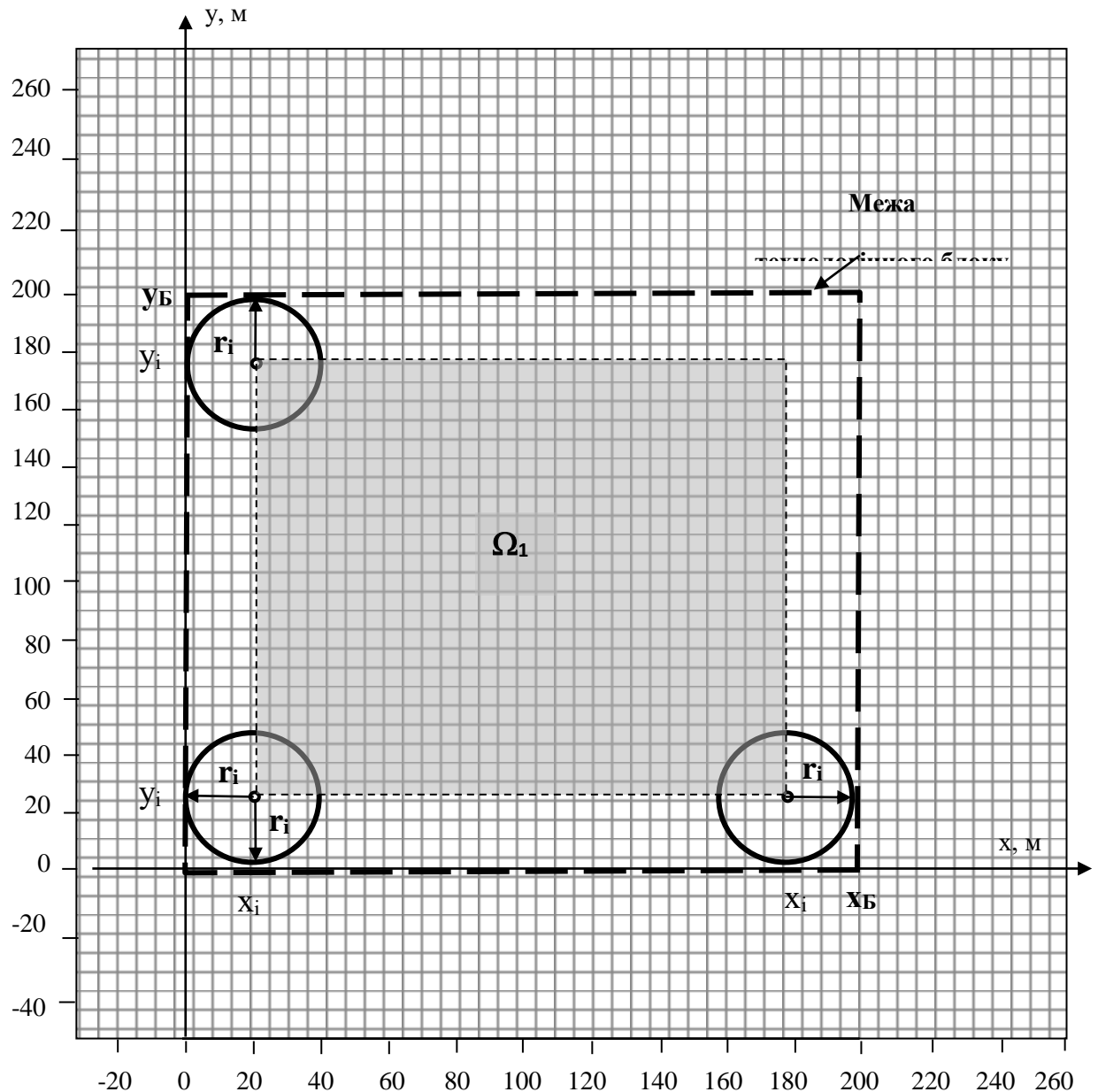


Рисунок 4.10 – Умови приналежності об'єкту  $S_i$  межам технологічному блоку приналежності об'єкту  $S_i$  межам блоку для поставленої задачі мають вигляд

$$\begin{cases} x_i - r_i \geq 0, \\ x_i - x_B + r_i \leq 0, \\ y_i - r_i \geq 0, \\ y_i - y_B + r_i \leq 0, \end{cases} \quad (4.7)$$

де  $x_B, y_B$  – розміри технологічного блоку.

На рис. 4.10 область  $\Omega_1$  є областю допустимих параметрів розміщення об'єкту  $S_i$ .

Таким чином, система обмежень оптимізаційної задачі (2.42) має наступний вигляд:

$$\left[ (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 \right]^{1/2} - r_{12}^{\min} \geq 0, \quad (4.8)$$

$$\left[ (x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2 \right]^{1/2} - r_{13}^{\min} \geq 0, \quad (4.9)$$

$$\left[ (x_1 - x_4)^2 + (y_1 - y_4)^2 \right]^{1/2} - r_{14}^{\min} \geq 0, \quad (4.10)$$

$$\left[ (x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2 \right]^{1/2} - r_{23}^{\min} \geq 0, \quad (4.11)$$

$$\left[ (x_2 - x_4)^2 + (y_2 - y_4)^2 \right]^{1/2} - r_{24}^{\min} \geq 0, \quad (4.12)$$

$$\left[ (x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2 \right]^{1/2} - r_{34}^{\min} \geq 0, \quad (4.13)$$

$$\left[ (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 \right]^{1/2} - r_{12}^{\max} \leq 0, \quad (4.14)$$

$$\left[ (x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2 \right]^{1/2} - r_{13}^{\max} \leq 0, \quad (4.15)$$

$$\left[ (x_1 - x_4)^2 + (y_1 - y_4)^2 \right]^{1/2} - r_{14}^{\max} \leq 0, \quad (4.16)$$

$$\left[ (x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2 \right]^{1/2} - r_{23}^{\max} \leq 0, \quad (4.17)$$

$$\left[ (x_2 - x_4)^2 + (y_2 - y_4)^2 \right]^{1/2} - r_{24}^{\max} \leq 0, \quad (4.18)$$

$$\left[ (x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2 \right]^{1/2} - r_{34}^{\max} \leq 0, \quad (4.19)$$



$$\begin{cases} x_1 - r_1 \geq 0, \\ x_1 - x_B + r_1 \leq 0, \\ y_1 - r_1 \geq 0, \\ y_1 - y_B + r_1 \leq 0, \end{cases} \quad (4.20)$$

$$\begin{cases} x_2 - r_2 \geq 0, \\ x_2 - x_B + r_2 \leq 0, \\ y_2 - r_2 \geq 0, \\ y_2 - y_B + r_2 \leq 0, \end{cases} \quad (4.21)$$

$$\begin{cases} x_3 - r_3 \geq 0, \\ x_3 - x_B + r_3 \leq 0, \\ y_3 - r_3 \geq 0, \\ y_3 - y_B + r_3 \leq 0. \end{cases} \quad (4.22)$$

Необхідні дані для побудови геометричних та технологічних обмежень оптимізаційної задачі (2.42) зведені у табл. 4.13.

Таблиця 4.13 – Дані для побудови геометричних та технологічних обмежень

$r_1, \text{ М}$	$r_2, \text{ М}$	$r_3, \text{ М}$	$r_{12}^{\min}, \text{ М}$	$r_{13}^{\min}, \text{ М}$	$r_{14}^{\min}, \text{ М}$	$r_{23}^{\min}, \text{ М}$	$r_{24}^{\min}, \text{ М}$	$r_{34}^{\min}, \text{ М}$
5,5	3,0	3,0	10,0	10,0	50,0	8,0	50,0	50,0

$r_{12}^{\max}, \text{ М}$	$r_{13}^{\max}, \text{ М}$	$r_{14}^{\max}, \text{ М}$	$r_{23}^{\max}, \text{ М}$	$r_{24}^{\max}, \text{ М}$	$r_{34}^{\max}, \text{ М}$	$x_B, \text{ М}$	$y_B, \text{ М}$
150,0	150,0	150,0	80,0	150,0	150,0	200,0	200,0

З урахуванням даних табл. 4.13, система обмежень (4.8)-(4.22), яка формує область допустимих розв'язків оптимізаційної задачі (2.42), приймає вигляд

$$\left[ (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 \right]^{1/2} - 10 \geq 0, \quad (4.23)$$

$$\left[ (x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2 \right]^{1/2} - 10 \geq 0, \quad (4.24)$$

$$\left[ (x_1 - x_4)^2 + (y_1 - y_4)^2 \right]^{1/2} - 50 \geq 0, \quad (4.25)$$

$$\left[ (x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2 \right]^{1/2} - 8 \geq 0, \quad (4.26)$$

$$\left[ (x_2 - x_4)^2 + (y_2 - y_4)^2 \right]^{1/2} - 50 \geq 0, \quad (4.27)$$

$$\left[ (x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2 \right]^{1/2} - 50 \geq 0, \quad (4.28)$$

$$\left[ (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 \right]^{1/2} - 150 \leq 0, \quad (4.29)$$

$$\left[ (x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2 \right]^{1/2} - 150 \leq 0, \quad (4.30)$$

$$\left[ (x_1 - x_4)^2 + (y_1 - y_4)^2 \right]^{1/2} - 150 \leq 0, \quad (4.31)$$

$$\left[ (x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2 \right]^{1/2} - 80 \leq 0, \quad (4.32)$$

$$\left[ (x_2 - x_4)^2 + (y_2 - y_4)^2 \right]^{1/2} - 150 \leq 0, \quad (4.33)$$

$$\left[ (x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2 \right]^{1/2} - 150 \leq 0, \quad (4.34)$$

$$\begin{cases} x_1 - 5,5 \geq 0, \\ x_1 - 194,5 \leq 0, \\ y_1 - 5,5 \geq 0, \\ y_1 - 194,5 \leq 0, \end{cases} \quad (4.35)$$

$$\begin{cases} x_2 - 3 \geq 0, \\ x_2 - 197 \leq 0, \\ y_2 - 3 \geq 0, \\ y_2 - 197 \leq 0, \end{cases} \quad (4.36)$$

$$\begin{cases} x_3 - 3 \geq 0, \\ x_3 - 197 \leq 0, \\ y_3 - 3 \geq 0, \\ y_3 - 197 \leq 0. \end{cases} \quad (4.37)$$

Згідно загальній схемі методу розв'язання задачі (2.42), на кожній ітерації змінює своє положення лише один з об'єктів  $S_i$ . Тому деякі обмеження системи (4.23)-(4.37) на кожній ітерації не є активними. Наприклад, якщо положення змінює об'єкт  $S_1$ , то область допустимих розв'язків оптимізаційної задачі (2.42) на цій ітерації формується обмеженнями (4.23), (4.24), (4.25), (4.29), (4.30), (4.31) та (4.35).

#### 4.3.3 Визначення нових параметрів розміщення об'єкту $S_k$

Нові параметри розміщення рухомого об'єкту  $S_k$  на  $(p+1)$ -ой ітерації знаходяться за формулами (3.27), (3.28)

$$\begin{aligned} x_k^{p+1} &= x_k^p + \delta_k^p g_{kx}^p = x_k^p + \varepsilon(x_k^p - x_{ЕЦ}^p), \\ y_k^{p+1} &= y_k^p + \delta_k^p g_{ky}^p = y_k^p + \varepsilon(y_k^p - y_{ЕЦ}^p). \end{aligned}$$

Величину константи  $\varepsilon$  обираємо  $\varepsilon = 0,05$ . Координати енергетичного центру на  $p$ -ой ітерації знаходимо за формулами (2.18). Початковою точкою ( $p=0$ ) є положення об'єктів, що наведено на рис. 4.2. Значення інтегрального критерію  $\Lambda^1$  вибухонебезпеки технологічного блоку на 1-ій ітерації дорівнює  $\Lambda^1 = 0,00280$ .

Згідно розрахункам п. 4.3.1 першим змінює своє положення об'єкт  $S_2$ , другим – об'єкт  $S_1$ , останнім – об'єкт  $S_3$ .

Визначаємо нові параметри розміщення об'єкту  $S_2$ :

$$x_2^1 = 50,5 + 0,05(50,5 - 109,4) = 47,6,$$

$$y_2^1 = 62 + 0,05(62 - 110,9) = 59,6.$$

Нове положення об'єкту  $S_2$  у межах технологічного блоку наведено на рис. 4.11.

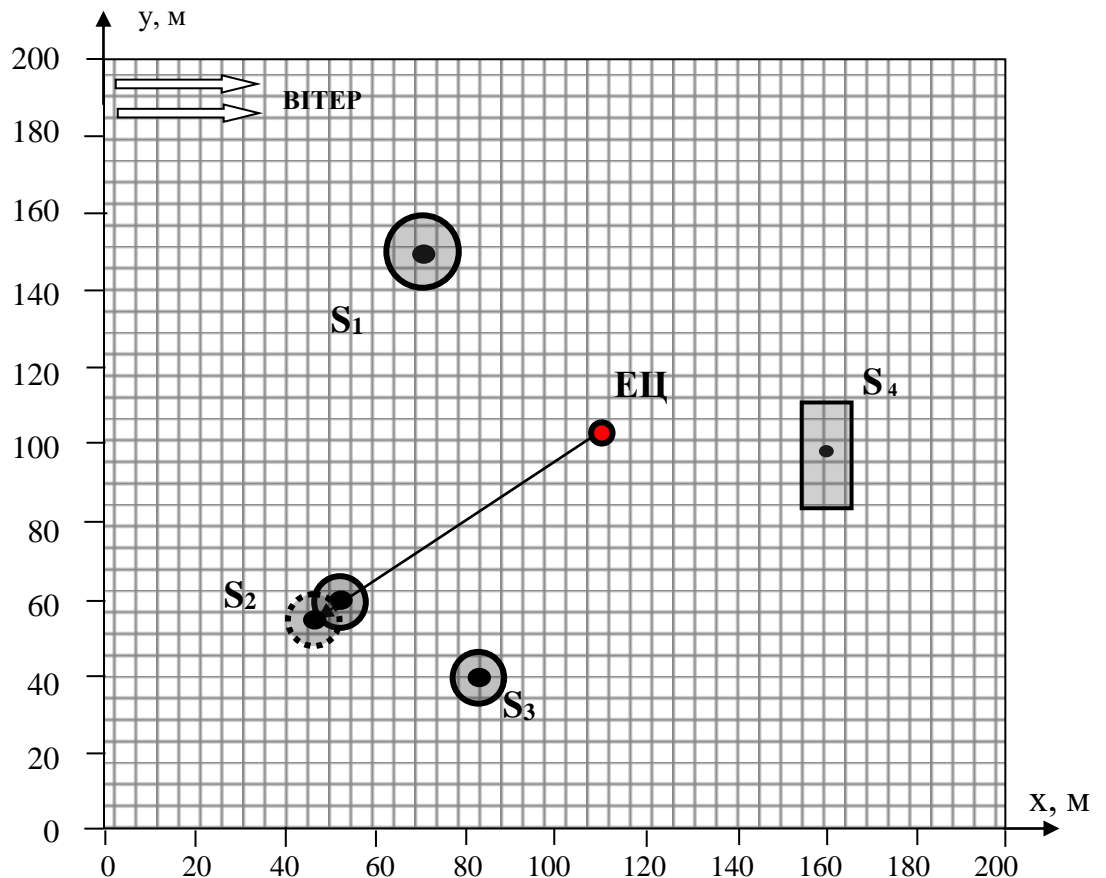


Рисунок 4.11 – Визначення нового положення об'єкту  $S_2$  в межах технологічного блоку

Перевіряємо виконання системи обмежень, що складається з нерівностей (4.23), (4.26), (4.27), (4.29), (4.32), (4.33) та (4.36). Система обмежень виконується.

Розраховуємо значення інтегрального критерію  $\Lambda$  при новому положенні об'єкта  $S_2$ :

$$\Lambda(x_1^0, y_1^0, x_2^1, y_2^1, x_3^0, y_3^0, x_4^0, y_4^0) = 0,00278 < 0,00280.$$

Знаходимо для нового розміщення об'єкта  $S_2$  координати ЕЦ  $(x_{\text{ЕЦ}_2}^1, y_{\text{ЕЦ}_2}^1)$ :

$$x_{\text{ЕЦ}_2}^1 = 108,8 \text{ м},$$

$$y_{\text{ЕЦ}_2}^1 = 110,5 \text{ м}.$$

Визначаємо нові параметри розміщення об'єкта  $S_1$ :

$$x_1^1 = 71 + 0,05(71 - 108,8) = 69,1 \text{ м},$$

$$y_1^1 = 150 + 0,05(150 - 110,5) = 152 \text{ м}.$$

Перевіряємо виконання системи обмежень, що складається з нерівностей (4.23), (4.24), (4.25), (4.29), (4.30), (4.31) та (4.35). Система обмежень виконується.

Розраховуємо значення інтегрального критерію  $\Lambda$  при новому положенні об'єкта  $S_1$ :

$$\Lambda(x_1^1, y_1^1, x_2^1, y_2^1, x_3^0, y_3^0, x_4^0, y_4^0) = 0,00271 < 0,00278.$$

Знаходимо для нового розміщення об'єкта  $S_1$  координати ЕЦ  $(x_{\text{ЕЦ}_1}^1, y_{\text{ЕЦ}_1}^1)$ :

$$x_{\text{ЕЦ}_1}^1 = 108,6 \text{ м},$$

$$y_{\text{ЕЦ}_1}^1 = 111,2 \text{ м}.$$

Визначаємо нові параметри розміщення об'єкта  $S_3$ :

$$x_3^1 = 83.5 + 0.05(83.5 - 108.7) = 82.2 \text{ м},$$

$$y_3^1 = 43 + 0.05(43 - 111.2) = 39.6 \text{ м}.$$

Перевіряємо виконання системи обмежень, що складається з нерівностей (4.24), (4.26), (4.28), (4.30), (4.32), (4.34) та (4.37). Система обмежень виконується.

Розраховуємо значення інтегрального критерію  $\Lambda$  при новому положенні об'єкта  $S_3$ :

$$\Lambda(x_1^1, y_1^1, x_2^1, y_2^1, x_3^1, y_3^1, x_4^0, y_4^0) = 0,00269 < 0,00271.$$

Знаходимо для нового розміщення об'єктів  $S_1, S_2, S_3$  координати ЕЦ  $(x_{\text{ЕЦ}}^1, y_{\text{ЕЦ}}^1)$ :

$$x_{\text{ЕЦ}}^1 = 106,8 \text{ м},$$

$$y_{\text{ЕЦ}}^1 = 109,7 \text{ м}.$$

Визначаємо кут  $\theta_4^1$  між напрямком ударної хвилі і довгою стіною прямокутного об'єкта  $S_4$  та кут  $\gamma_4$  повороту об'єкта  $S_4$  навколо точки його центру за формулами (3.35), (3.36):

$$\theta_4^1 = 98,1^\circ,$$

$$\gamma_4 = 45^\circ - \theta_4^1 = -53,1^\circ.$$

Таким чином, об'єкт  $S_4$  необхідно повернути навколо точки його центру за годинниковою стрілкою на кут  $53,1^\circ$  від начального положення..

Розраховуємо значення інтегрального критерію  $\Lambda$  при новому положенні об'єкта  $S_4$ :

$$\Lambda(x_1^1, y_1^1, x_2^1, y_2^1, x_3^1, y_3^1, x_4^1, y_4^1) = \Lambda^1 = 0,00268 < 0,00269.$$

Після повороту об'єкта  $S_4$  закінчується 1-а ітерація.

Розміщення об'єктів  $S_1, S_2, S_3, S_4$  в межах технологічного блоку після зміни їх положення на першій ітерації показано на рис. 4.12, результати

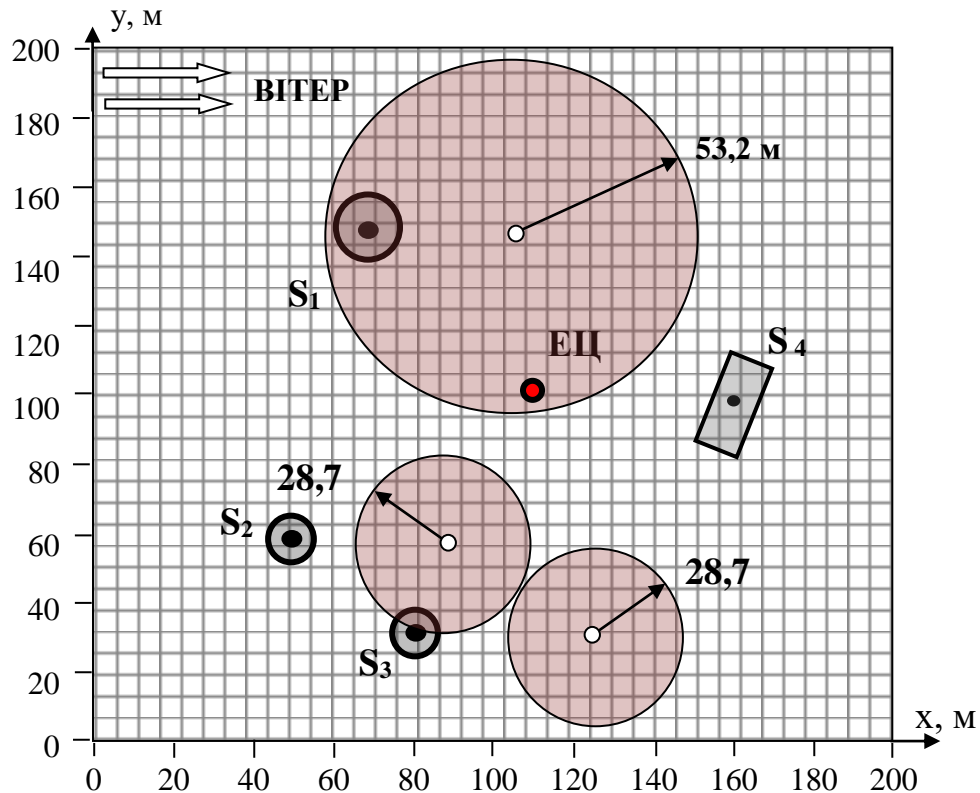


Рисунок 4.12 – Розміщення об'єктів  $S_1, S_2, S_3, S_4$  після 1-ї ітерації

Розміщення об'єктів та ЕЦ на рис. 4.12, є початковою точкою для другої ітерації ( $p = 2$ ). Подальші розрахунки проводилися аналогічно.

Розміщення об'єктів  $S_1, S_2, S_3, S_4$  в межах технологічного блоку, яке відповідає локальному мінімуму функції мети оптимізаційної задачі (2.42), наведено на рис. 4.13, результати розрахунків зведено у табл.4.15.

Зменшення величини інтегрального критерію  $\Lambda$  вибухонебезпеки технологічного блоку для варіанта розміщення об'єктів  $S_1, S_2, S_3, S_4$ , яке відповідає локальному мінімуму функції мети оптимізаційної задачі (2.42), у порівнянні з початковим значенням складає  $\Delta = 12\%$ :

Таблиця 4.14 – Результати розрахунків на першій ітерації розв’язку

Об’єкти $S_i$	Параметри розміщення об’єктів		Координати епіцентрів вибухів хмар ГПС		Координати енергетичного центру		$\Lambda^1$
	$X_i, \text{ м}$	$Y_i, \text{ м}$	$X_{ei}, \text{ м}$	$Y_{ei}, \text{ м}$	$X_{ЕЦ}, \text{ м}$	$Y_{ЕЦ}, \text{ м}$	
$S_1$	69,1	152	109,1	152	106,8	109,7	0,00268
$S_2$	47,6	59,6	87,6	59,6			
$S_3$	82,2	39,6	122,2	39,6			
$S_4$	$\gamma_4 = -53,1^0$		–	–			

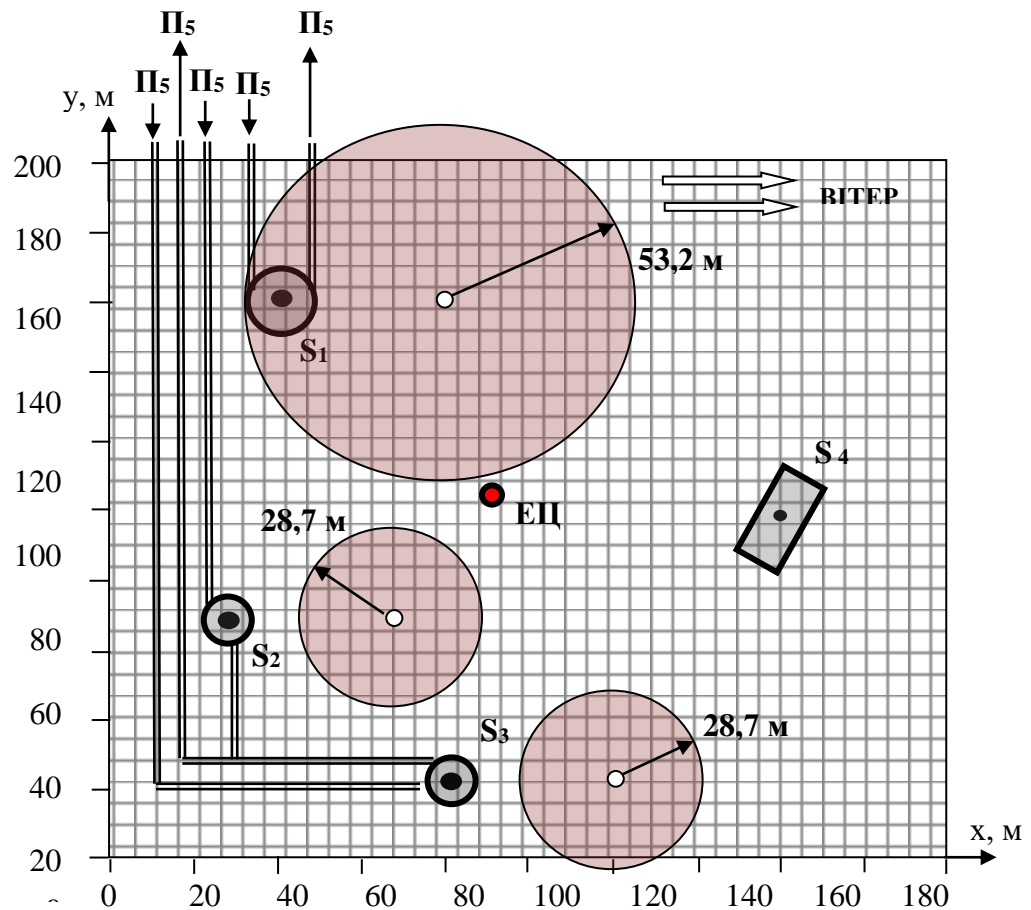


Рисунок 4.13 – Розміщення об’єктів  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$  в межах технологічного блоку, яке відповідає локальному мінімуму функції мети оптимізаційної задачі (2.42)



Таблиця 4.15 – Результати розрахунків на останній ітерації розв’язку оптимізаційної задачі (2.42)

Об’єкти $S_i$	Параметри розміщення об’єктів		Координати епіцентрів вибухів хмар ГПС		Координати енергетичного центру		$\Lambda$
	$x_i, \text{ м}$	$y_i, \text{ м}$	$x_{ei}, \text{ м}$	$y_{ei}, \text{ м}$	$x_{ЕЦ}, \text{ м}$	$y_{ЕЦ}, \text{ м}$	
$S_1$	40	160,2	80	160,2	86,2	114,4	0,00246
$S_2$	28,6	66,8	68,6	66,8			
$S_3$	82,2	24,6	122,2	24,6			
$S_4$	$\gamma_4 = -50,2^0$		–	–			

Таким чином, варіант розміщення обладнання, отриманий в результаті розв’язання оптимізаційної задачі (2.42), відповідає мінімуму рівня вибухонебезпеки технологічного блоку при заданій його орієнтації відносно сторін світу.

#### 4.4. Перебір локальних мінімумів (Етап 5)

Як вказувалося вище, локальний мінімум оптимізаційної задачі (2.42), отриманий на **Етапі 4**, знаходиться виходячи з допущення, що вітер в області  $\Omega$  розміщення об’єктів  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, I$ ) відповідає найбільш ймовірному у цій місцевості за напрямком та швидкістю. Зміна орієнтації блоку відносно сторін світу (тобто відносно напрямку найбільш ймовірного вітру) дозволяє отримати інші локальні мінімуми оптимізаційної задачі та організувати їх перебір з визначенням найкращого з них.

Кількість локальних мінімумів, що перебираються, може визначатися різними шляхами, наприклад, особою, яка приймає рішення, виходячи з умов конкретного завдання, виконання певних вимог і т.п. В даному дисертаційному дослідженні розглядається вісім варіантів орієнтації технологічного блоку відносно сторін світу. Для кожного з варіантів розв’язуємо оптимізаційну задачу (2.42) аналогічно тому, як це виконувалося

в пп. 4.2 – 4.3. Результати розрахунків наведено в таблиці 4.16.

Таблиця 4.16 – Результати розв’язання оптимізаційної задачі (2.42) для різних варіантів орієнтації технологічного блоку відносно сторін світу

№ варіанту	Напрямок вітру відносно блоку	Об’єкти $S_i$	Параметри розміщення об’єктів		Координати епіцентрів вибухів хмар ГПС		Координати ЕЦ блоку		$\Lambda^{OPT}$
			$X_i, M$	$Y_i, M$	$X_{ei}, M$	$Y_{ei}, M$	$X_{ei}, M$	$Y_{ei}, M$	
1	Західний	$S_1$	40	160,2	80	160,2	6,2	114,4	0,00246
		$S_2$	28,6	66,8	68,6	66,8			
		$S_3$	82,2	24,6	122,2	24,6			
		$S_4$	$\gamma_4 = -50,2^0$		–	–			
2	Північно-західний	$S_1$	29,7	180	58,1	151,6	71,1	88	0,00231
		$S_2$	21	20,5	48,4	-7,9			
		$S_3$	104,1	21,4	132,3	-7			
		$S_4$	$\gamma_2 = -41,4^0$		–	–			
3	Північний	$S_1$	40	180	40	140	45	76	0,00201
		$S_2$	20	20	20	-20			
		$S_3$	85	20	85	-20			
		$S_4$	$\gamma_3 = -40,8^0$		–	–			
4	Північно-східний	$S_1$	40	177	11,7	148,7	15,9	95,8	0,00198
		$S_2$	20	69,8	-8,3	41,5			
		$S_3$	81	20	52,7	-8,3			
		$S_4$	$\gamma_6 = -42,2^0$		–	–			
5	Східний	$S_1$	40	164	0	164	63,4	108	0,00199
		$S_2$	38	29	-2	29			
		$S_3$	119	20	159	20			
		$S_4$	$\gamma_5 = 37,1^0$		–	–			
6	Південно-східний	$S_1$	40	160	11,7	188,3	19,3	143,7	0,00202
		$S_2$	20	76	-8,3	104,3			
		$S_3$	98	21	69,7	49,3			
		$S_4$	$\gamma_5 = 8,3^0$		–	–			
7	Південний	$S_1$	44	178	44	218,3	46,4	155	0,00206
		$S_2$	20	20	20	60			
		$S_3$	80	20	80	60			
		$S_4$	$\gamma_5 = 13^0$		–	–			

Продовження таблиці 4.16

8	Південно-західний	$S_1$	40	160	68,3	188,3	4,2	42,3	0,00233
		$S_2$	20	70	48,3	98,3			
		$S_3$	39,6	20	67,9	48,3			
		$S_4$	$\gamma_5 = 21,3^\circ$		—	—			

Як показує аналіз даних таблиці 4.16, найменші значення інтегрального критерію  $\Lambda$  вибухонебезпеки технологічного блоку спостерігаються для варіанту 4. Цей варіант реалізується для випадку такої орієнтації технологічного блоку, коли для нього найбільш ймовірний вітер швидкістю 4,0 м/сек є північно-східним. Розміщення епіцентрів вибухів хмар ГПС для початкового та кінцевого розміщення об'єктів в межах технологічного блоку наведено на рис. 4.14 і 4.15 відповідно.

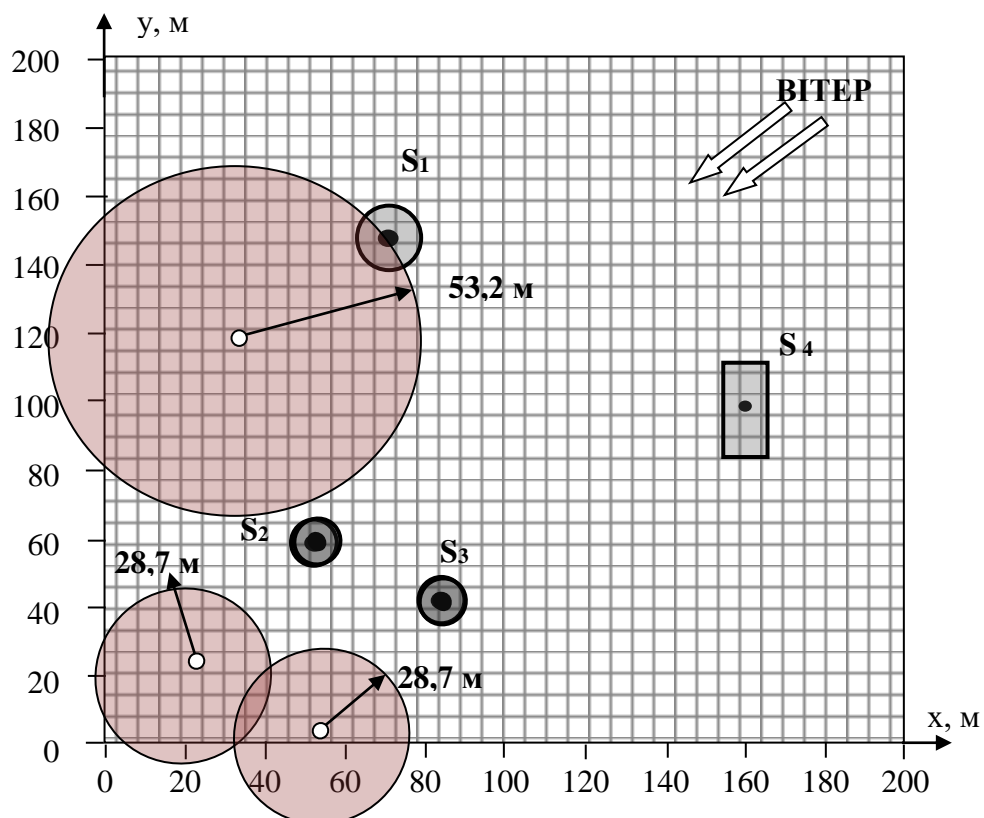


Рисунок 4.14 – Початкове розміщення об'єктів в межах технологічного блоку (північно-східний вітер швидкістю 4,0 м/с).

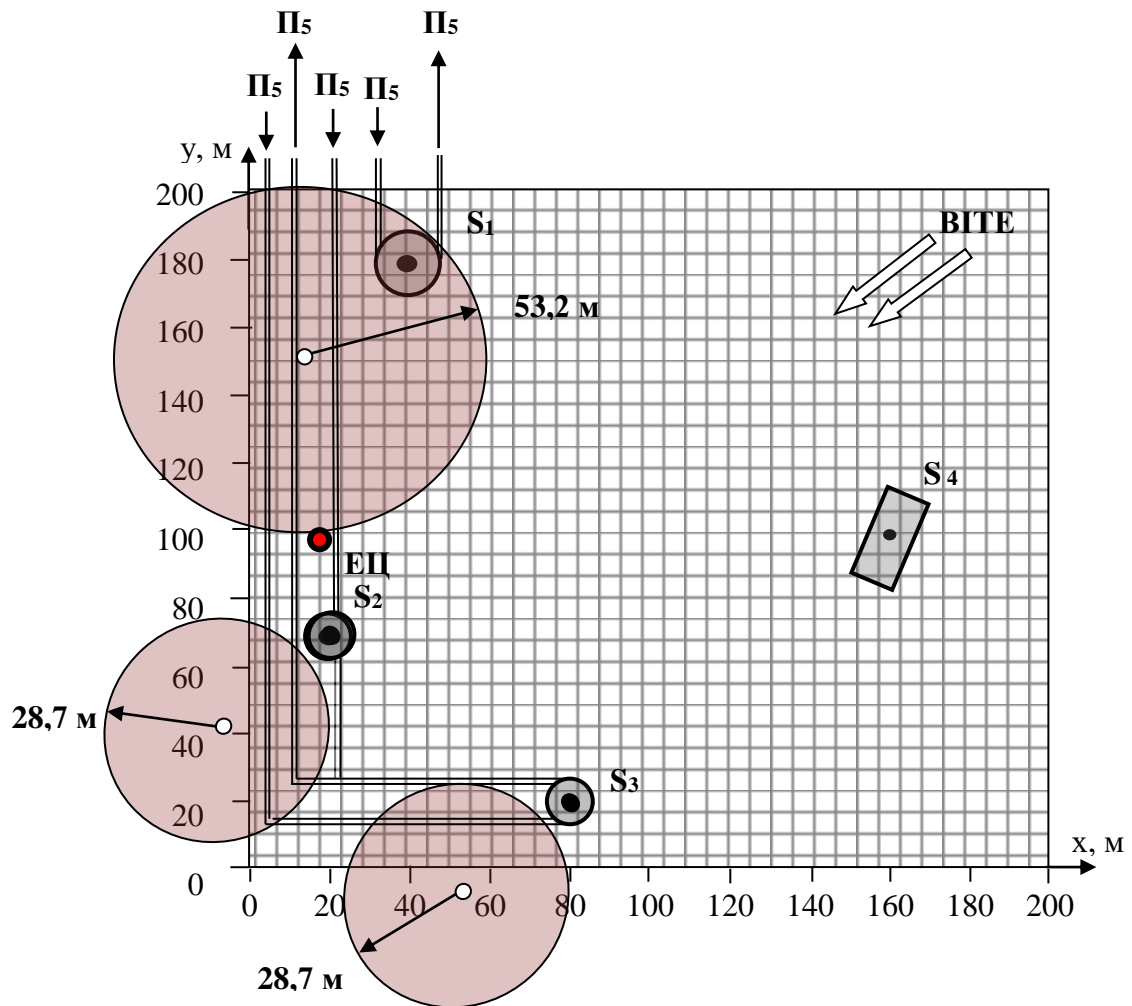


Рисунок 4.15 – Оптимальне розміщення об'єктів в межах технологічного блоку (північно-східний вітер швидкістю 4,0 м/с).

Величина інтегрального критерію  $\Lambda$  вибухонебезпеки технологічного блоку для начального варіанта розміщення об'єктів  $S_1, S_2, S_3, S_4$ , (рис. 4.2) складає  $\Lambda_{\text{нач}} = 0,00280$ , а для варіанта, який відповідає локальному мінімуму функції мети оптимізаційної задачі (2.42) (рис. 4.15), він дорівнює  $\Lambda_{\text{опт}} = 0,00198$ .

Порівняння цих величин дозволяє зробити висновок, що застосування розробленого методу мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку шляхом оптимального розміщення обладнання дозволило знизити цей рівень на 29 % для умов розглянутого варіанту начального компонування технологічного блоку.

#### 4.5 Зниження рівня вибухонебезпеки абсорбційно-газофракціонуючої установки газонафтопереробного підприємства

Абсорбційно-газофракціонуюча установка (АГФУ) являє собою зовнішню відкриту технологічну установку (технологічний блок). АГФУ – це один з основних технологічних блоків нафтогазопереробних підприємств. Установка призначена для розділу сумішей вуглеводних газів абсорбційним методом, тобто на основі виборчого поглинання окремих компонентів сировини рідким поглиначем (абсорбентом).

Основними технологічними апаратами АГФУ, в яких відбувається фракціонування сировини, є абсорбційні колони. Суміш вуглеводних газів, що розділяється, проходить послідовно чотири абсорбційної колони, кожна з яких має об'язку із теплообмінної та ємнісної апаратури:

- абсорбційна колона К-1, у якій з широкої фракції легких вуглеводнів (ШФЛУ), або іншими словами газового конденсату, що розділяється, відділяється метан та етан (відбензинений газ);
- абсорбційна колона К-4, де відбувається ректифікація ШВЛУ, яка насичена компонентами  $C_{3+}$  (вуглеводні пропанової групи), на легку фракцію та газ – пропан-бутан;
- пропанова колона К-6, де відділяється технічний пропан;
- бутанова колона К-7, де відділяється технічний н-бутан.

На рис. 4.16 та рис. 4.17 зображені відповідно план-схема [69] та схема розміщення технологічного обладнання АГФУ.

Аналогічні НС з розгерметизацією та викидом значних об'ємів горючих газів можливі і для інших абсорбційних колон. Тому при розв'язанні оптимізаційної задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки АГФУ ми будемо розглядати випадок НС з повним руйнуванням абсорбційних колон К-1, К-4, К-6, К-7, викидом усієї кількості вибухонебезпечних речовин з утворенням хмар ГПС та їх вибухом.

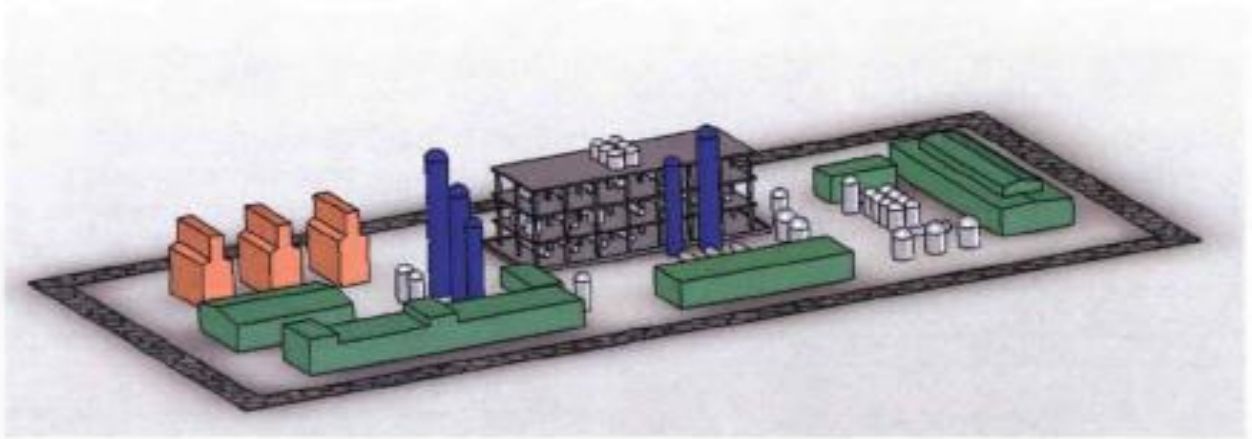


Рисунок 4.16 – Схема розміщення технологічного обладнання АГФУ

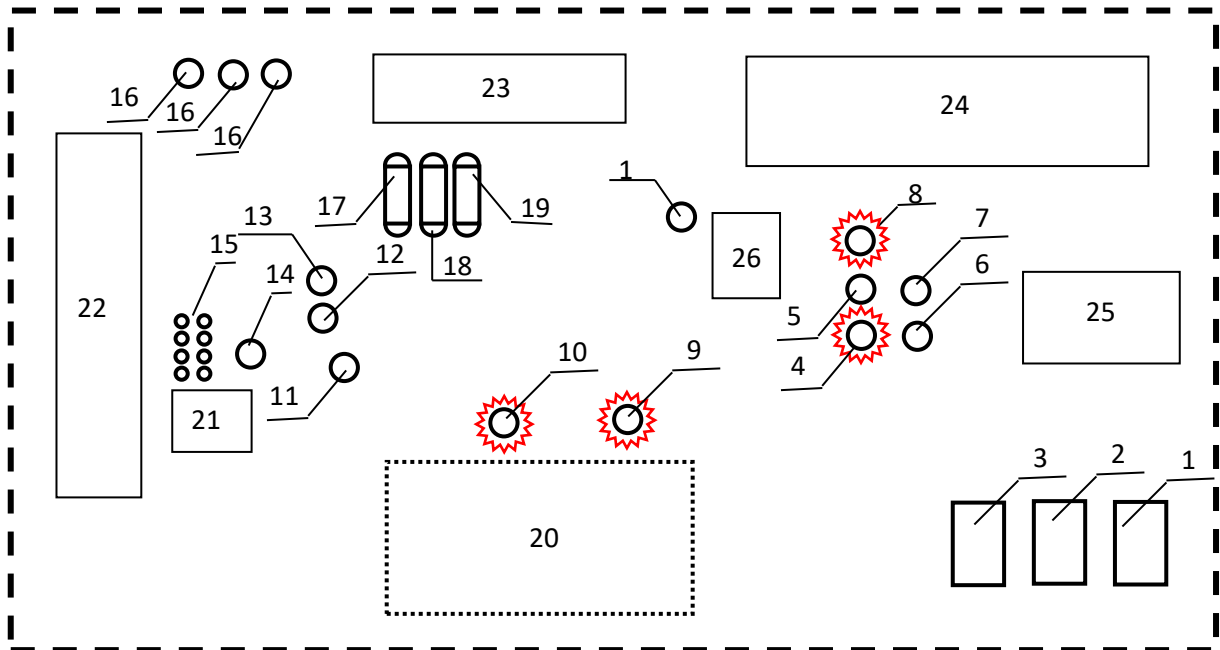


Рисунок 4.17 – Схема розміщення технологічного обладнання АГФУ

1, 2, 3 – піч П-1-1,2,3; 4 – колона К-4; 5 – теплообмінник Т-13; 6 – ємність Е-4; 7 – ємність Е-8; 8 – колона К-1; 9 – колона К-6; 10 – колона К-7; 11 – теплообмінник Т-4; 12, 13 – теплообмінник Т-8; 14 – теплообмінник Т-10; 15 – холодильник; 16 – теплообмінник Т-12-1,2,3; 17 – теплообмінник Т-20; 18 – теплообмінник Т-21; 19 – теплообмінник Т-22; 20 – етажерка; 21 – насосна; 22 – компресорна; 23 – насосна; 24 – операторна; 25 – насосна; 26 – операторна.

Абсорбційні колони К-1, К-4, К-6, К-7 є найбільш вибухонебезпечними технологічними апаратами АГФУ. Вони мають у своєму складі значну кількість вибухонебезпечних речовин (горючих газів та ЛЗР), які знаходяться у перегрітому стані та при високому тиску. Умови розгерметизації обумовлені зростанням тиску в апаратах до значень, при яких збереження щільності й міцності системи при даній температурі стає неможливим. Збільшення тиску є особливо небезпечним для колони К-1, робочий тиск якої близький до розрахункового тиску апарата. В цьому випадку можливе руйнування колони внутрішнім надлишковим тиском з формуванням хмари суміші етану з повітрям.

Характеристики колонного обладнання АГФУ наведені у табл. 4.17.

Таблиця 4.17 – Характеристики колонного обладнання АГФУ

Індекс апарату	Найменування обладнання	Технологічна характеристика				
		Тиск, МПа	Температура, °С	Висота, м	Діаметр, м	Вибухонебезпечна речовина
К-1	абсорбційна колона	3,04	н. -4 в.+100	9,87	2,0	етан, 6000 кг
К-4	абсорбційна колона	4,0	300	29,91	1,8	пропан-бутан, 3200 кг
К-6	пропанова колона	5,6	100	13,98	1,8	пропан, 8000 кг
К-7	бутанова колона	3,04	н.-5 в.+100	29,91	1,8	н-бутан, 3000 кг

Начальним варіантом розміщення технологічного обладнання в межах блока АГФУ приймаємо розміщення, яке наведено на рис. 4.10. Цей варіант відповідає типовій компоновці блока.

Таблиця 4.18 містить інформацію щодо параметрів розміщення та енергетичних характеристик технологічного обладнання установки АГФУ, у таблиці 4.19 наведені розміри та параметри розміщення будівель та споруд в межах установки АГФУ.

Таблиця 4.18 – Розміщення технологічного обладнання у межах установки АГФУ

Об'єкт	Індекс апарату	Найменування обладнання	Часткові критерії, $\Lambda_i$	Розміри, м	Параметри розміщення	
					$x_i$ , м	$y_i$ , м
S <sub>1</sub>	К-1	абсорбційна колона	0,002964	h=9,87 d=2,0	140	77
S <sub>2</sub>	К-4	абсорбційна колона	0,001242	h=29,91 d=1,8	140	59
S <sub>3</sub>	К-6	пропанова колона	0,003029	h=13,98 d=1,8	103	42
S <sub>4</sub>	К-7	бутанова колона	0,001598	h=29,91 d=1,8	79	42
S <sub>5</sub>	Т-1-1	холодильник	0,000114	h=2,3 d=0,9	30	55
S <sub>6</sub>	Т-1-2	холодильник	0,000114	h=2,3 d=0,9		
S <sub>6</sub>	Т-1-3	холодильник	0,000114	h=2,3 d=0,9		
S <sub>7</sub>	Т-1-4	холодильник	0,000114	h=2,3 d=0,9		
S <sub>8</sub>	Т-1-5	холодильник	0,000114	h=2,3 d=0,9		
S <sub>99</sub>	Т-1-6	холодильник	0,000114	h=2,3 d=0,9		
S <sub>10</sub>	Т-4	теплообмінник	0,000794	h=2,9 d=1,2	55	52
S <sub>11</sub>	Т-8	теплообмінник	0,000711	h=3,6 d=1,3	50,5	70



Продовження таблиці 4.18

S <sub>12</sub>	T-10	теплообмінник	0,001133	h=2,6 d=1,2	40	55
S <sub>13</sub>	T-13	теплообмінник	0,000812	h=2,2 d=1,0	140	68
S <sub>14</sub>	T-20	теплообмінник	0,002105	L=3,6 d=1,1	64	85
S <sub>15</sub>	T-21	теплообмінник	0,001155	L=3,6 d=1,1	70	85
S <sub>16</sub>	T-22	теплообмінник	0,002105	L=3,6 d=1,1	76	85
S <sub>17</sub>	E-4	ємність адсорбенту	0,001242	h=3,2 d=1,2	150	59
S <sub>18</sub>	E-8	приймач рефлюкса	0,000799	h=3,2 d=1,2	150	68
S <sub>19</sub>	П-1-1	трубчата піч	0,001458	12 x 8	184,5	20
S <sub>20</sub>	П-1-2	трубчата піч	0,001458	12 x 8	173	20
S <sub>21</sub>	П-1-3	трубчата піч	0,001458	12 x 8	160,5	20

Таблиця 4.19 – Параметри розміщення будівель та споруд АГФУ

Об'єкт	Споруда	Розміри, м	Параметри розміщення	
			X <sub>i</sub> , м	Y <sub>i</sub> , м
S <sub>22</sub>	Етажерка	51 x 29	88,4	20,2
S <sub>23</sub>	Насосна	11 x 11	37,2	41,7
S <sub>4</sub>	Компресорна	10 x 68	17,5	60,9
S <sub>25</sub>	Насосна	40 x 10	80,5	108,3
S <sub>26</sub>	Операторна	68 x 20	157,2	100,3
S <sub>27</sub>	Гаряча насосна	26 x 18	180,3	61,2
S <sub>28</sub>	Операторна	11 x 18	121,9	74,1

#### 4.5.1 Постановка оптимізаційної задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки АГФУ

Оптимізаційна задача мінімізації рівня вибухонебезпеки блока АГФУ формулюється у вигляді:

знайти

$$\min_W \Lambda = \min_W \left( \sum_{i=1}^I \Lambda_i \sum_{j=1}^J \alpha_{ij} k_{ij} \right), \quad (4.38)$$

де  $I$  – кількість одиниць технологічного обладнання (об'єктів  $S_i$ ), на якому може статися НС з утворенням хмари ГПС та її подальшим вибухом,  $I = 4$ ;  $J$  – кількість одиниць технологічного обладнання (об'єктів  $S_j$ ), яке було повністю зруйновано або пошкоджено в результаті вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на  $i$ -му обладнанні (об'єктів  $S_i$ );  $k_{ij}$  – коефіцієнт, який залежить від ступеню пошкодження  $j$ -го технологічного обладнання від вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на  $i$ -му обладнанні;  $\alpha_{ij}$  – коефіцієнт, що враховує ступінь впливу ударної хвилі від вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на  $i$ -му обладнанні, на інші технологічні апарати.

Область допустимих рішень  $W$  містить геометричні та технологічні обмеження, які аналогічні обмеженням (4.8) – (4.22):

$$\left[ (x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 \right]^{1/2} - r_{ik}^{\min} \geq 0, \quad (4.39)$$

$$\left[ (x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 \right]^{1/2} - r_{ik}^{\max} \leq 0, \quad (4.40)$$

$$\begin{cases} x_i - r_i \geq 0, \\ x_i - x_B + r_i \leq 0, \\ y_i - r_i \geq 0, \\ y_i - y_B + r_i \leq 0, \end{cases} \quad (4.41)$$

де  $i = \overline{1,4}$ ,  $k = \overline{1,N}$   $i \neq k$ ;  $N$  – сумарна кількість технологічного обладнання (табл. 4.18), будівель та споруд (табл. 4.19) у складі АГФУ,  $N=28$ ;  $x_B, y_B$  – розміри технологічного блоку АГФУ,  $x_B = 200$  м,  $y_B = 120$  м.

4.5.2 Визначення початкових даних для розв’язання оптимізаційної задачі (4.38) для АГФУ

За формулою (3.5) з урахуванням формул (3.6) – (3.8) було визначено концентраційне поле  $c(x, y, z, t)$  вибухонебезпечних речовин у хмарах ГПС, які виникли при руйнуванні абсорбційних колон. На базі виконаних розрахунків обчислені параметри хмар ГПС.

Згідно з методикою, викладеною в п. 3.2.1 розділу 3, були визначені характеристики вибухів хмар ГПС, що виникли в наслідок НС з викидом газоподібних вибухонебезпечних речовин з пошкодженого технологічного обладнання АГФУ. Результати розрахунків наведені у таблиці 4.20.

Таблиця 4.20 – Характеристики вибухів хмар ГПС, що виникли при НС з руйнуванням колонного обладнання АГФУ

Об’єкт	Індекс апарату	Радіуси зон руйнування		Ефективний енергетичний запас хмари ГПС
		$R_i^{100}$ , м	$R_i^0$ , м	$E_{ix}$ , МДж
$S_1$	К-1	34,6	386	15072
$S_2$	К-4	27,9	302	12011
$S_3$	К-6	53,2	588	36405
$S_4$	К-7	28,7	317	12134

Результати табл. 4.20 отримані з припущення, що вибухи хмар ГПС відбувалися через 10 секунд після їх виникнення у результаті НС з руйнуванням колонного обладнання АГФУ.

Подальші розрахунки виконувалися для восьми варіантів орієнтації АГФУ відносно найбільш ймовірного приземного вітру (швидкість 4 м/с), який визначався за розою вітрів даної місцевості (табл. 4.3). Кліматичні характеристики та стан атмосфери в момент виникнення НС приймалися згідно табл. 4.4.

Були проведені розрахунки величин кількісного впливу вибухів хмар ГПС на об'єктах  $S_1 - S_4$  на сусіднє технологічне обладнання та будівлі і споруди АГФУ. Отримані значення ймовірностей руйнування були використані при визначенні коефіцієнтів  $k_{ij}$ ,  $\alpha_{ij}$  і величин  $\lambda_i$  згідно методики, яка наведена в п. 3.2 третього розділу роботи.

На основі знайдених коефіцієнтів  $\lambda_i$  за формулою (2.2) виконані розрахунки величини інтегрального критерію  $\Lambda$  для початкового варіанту розміщення об'єктів технологічного блоку АГФУ при восьми варіантах його орієнтації відносно найбільш ймовірного приземного вітру.

Таким чином, було отримано необхідні початкові дані для розв'язання оптимізаційної задачі (4.38).

#### 4.5.3 Визначення множини локальних мінімумів оптимізаційної задачі та їх перебір

Визначення вектору параметрів розміщення об'єктів, що відповідає локальному мінімуму цільового критерію оптимізаційної задачі при заданій орієнтації блоку відносно сторін світу виконувалось згідно схемі методу розв'язання оптимізаційної задачі (п. 3.3).

Був проведений вибір послідовності зміни положення об'єктів  $S_k$  та визначена система обмежень, яка формує область допустимих параметрів розміщення об'єктів.

Після цього був реалізований ітераційний процес вигляду (3.21)–(3.23), в результаті чого отримано розміщення вибухонебезпечних об'єктів  $S_1 - S_4$  технологічного блоку АГФУ, яке відповідає мінімальному значенню  $\Lambda^{\text{ОПТ}}$  інтегрального критерію вибухонебезпеки для заданого варіанту орієнтації АГФУ відносно сторін світу.

Результати розв'язання оптимізаційної задачі (4.38) – (4.41) для різних варіантів орієнтації технологічного блоку АГФУ відносно сторін світу (вісім варіантів), а також початкові значення  $\Lambda^{\text{НАЧ}}$  наведені в табл. 4.21.

Після отримання восьми варіантів локального мінімуму функції мети задачі (4.38) – (4.41) для різних орієнтацій технологічного блоку АГФУ відносно сторін світу був проведений їх перебір з визначенням мінімального значення функції мети, тобто знайдено номер варіанту  $i$ , для якого значення  $\Lambda^i_{\text{ОПТ}} = \min \{ \Lambda^i_{\text{ОПТ}} \}$ ,  $i = \overline{1,8}$ .

Як показує аналіз даних таблиці 4.21, найменші значення інтегрального критерію  $\Lambda^i_{\text{ОПТ}}$  вибухонебезпеки технологічного блоку спостерігаються для варіанту 3 ( $i = 3$ ). Цей варіант реалізується для випадку такої орієнтації технологічного блоку АГФУ, коли для нього найбільш ймовірний вітер (західний приземний географічний вітер швидкістю 4,0 м/с) є північним.

Таблиця 4.21 – Результати розв'язання оптимізаційної задачі (4.38) – (4.41) для різних варіантів орієнтації блоку АГФУ відносно сторін світу

№ варіанту	Напрямок вітру відносно блоку	Об'єкти $S_i$	Параметри розміщення об'єктів		Координати епіцентрів вибухів хмар		$\Lambda^{\text{НАЧ}}$	$\Lambda^i_{\text{ОПТ}}$
			$x_i, \text{ м}$	$y_i, \text{ м}$	$x_{ei}, \text{ м}$	$y_{ei}, \text{ м}$		
1	Західний	$S_1$	105,1	91	145,1	91	0,034631	0,027932
		$S_2$	165,2	82,6	205,2	82,6		
		$S_3$	104,9	60,7	144,9	60,7		
		$S_4$	61	40,3	101	40,3		

Продовження таблиці 4.21

2	Північно-західний	S <sub>1</sub>	108	70,2	136,4	41,8	0,026912	0,013114
		S <sub>2</sub>	52	80	80,4	57,6		
		S <sub>3</sub>	120	11,3	148,4	-17,1		
		S <sub>4</sub>	50,8	20	79,2	-8,4		
3	Північний	S <sub>1</sub>	103	95	103	55	0,014291	0,012350
		S <sub>2</sub>	135	84	135	44		
		S <sub>3</sub>	120	20	120	-20		
		S <sub>4</sub>	55	20	55	-20		
4	Північно-східний	S <sub>1</sub>	131,7	79,3	103,3	50,9	0,026793	0,012961
		S <sub>2</sub>	160	62	131,6	33,6		
		S <sub>3</sub>	120	16	97,6	-22,4		
		S <sub>4</sub>	64,6	49	36,2	20,6		
5	Східний	S <sub>1</sub>	131	69	91	69	0,035614	0,014752
		S <sub>2</sub>	131,8	84,6	91,8	84,6		
		S <sub>3</sub>	166	35,6	126	35,6		
		S <sub>4</sub>	31	15	-9	15		
6	Південно-східний	S <sub>1</sub>	128	57,2	99,6	85,2	0,047285	0,014802
		S <sub>2</sub>	139	83,8	110,6	107,2		
		S <sub>3</sub>	124	14,7	75,6	68,1		
		S <sub>4</sub>	62	49,4	33,6	77,8		
7	Південний	S <sub>1</sub>	192	88	192	128	0,034286	0,026837
		S <sub>2</sub>	104	90	104	130		
		S <sub>3</sub>	139,6	11	139,6	51		
		S <sub>4</sub>	49	45	49	85		
8	Південно-західний	S <sub>1</sub>	111	110	138,4	138,4	0,048117	0,026591
		S <sub>2</sub>	177,2	81	205,6	109,4		
		S <sub>3</sub>	119	10,8	147,4	139,2		
		S <sub>4</sub>	49	23,5	77,4	51,9		

Розміщення епіцентрів вибухів хмар ГПС для початкового та оптимального варіантів розміщення об'єктів в межах технологічного блоку АГФУ наведено на рис. 4.18 та 4.19 відповідно.

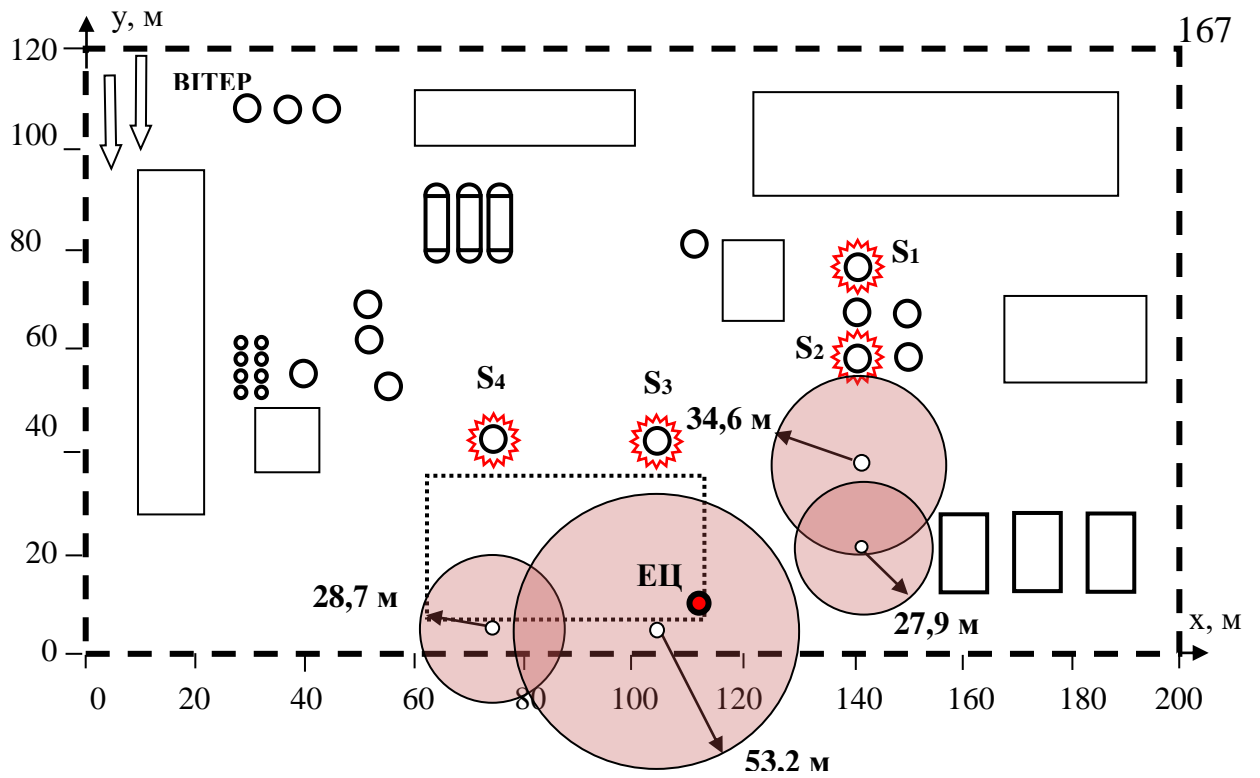


Рисунок 4.18 – Розміщення епіцентрів вибухів хмар ГПС для початкового розміщення об'єктів в межах технологічного блоку АГФУ

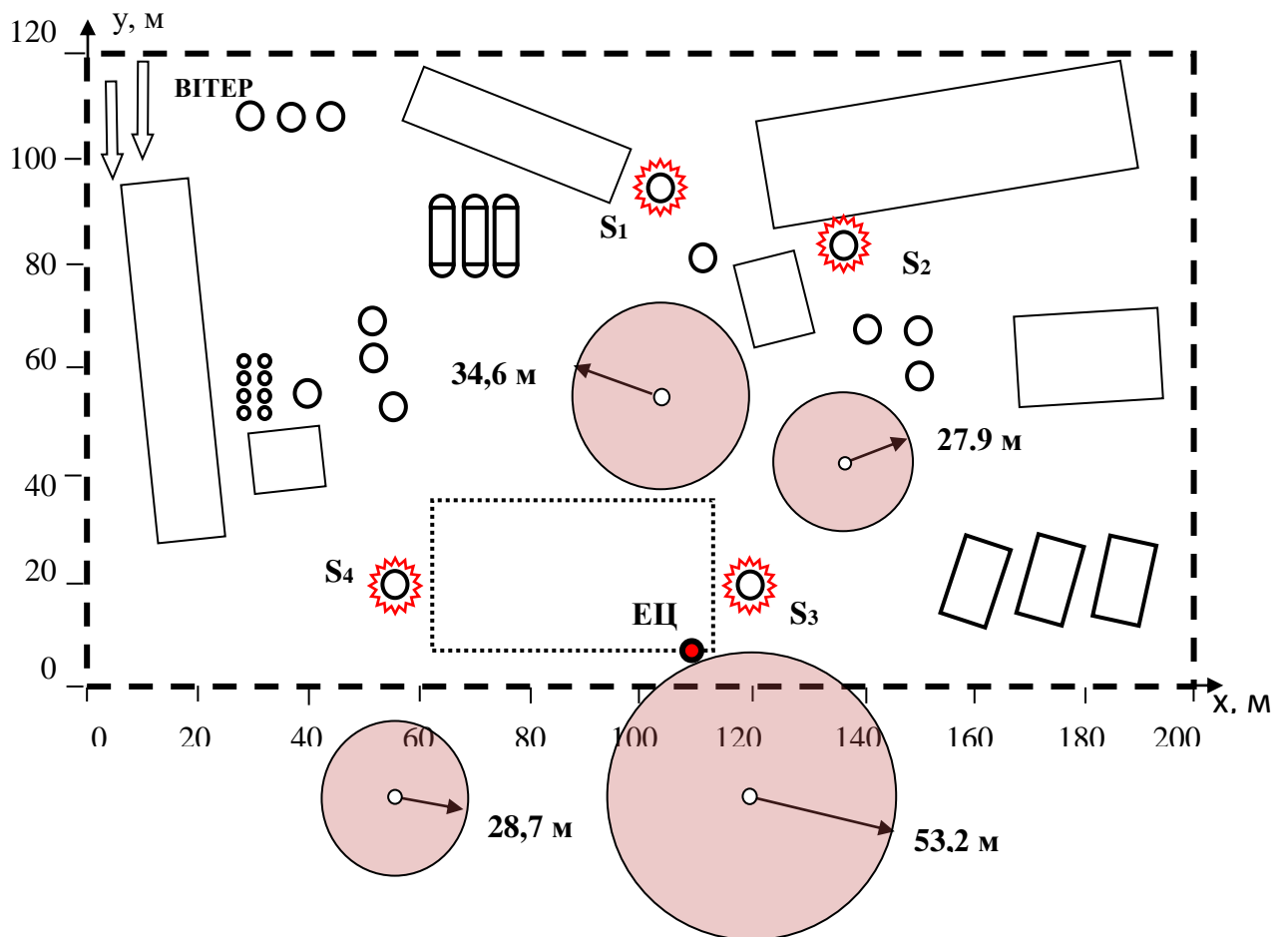


Рисунок 4.19 – Розміщення епіцентрів вибухів хмар ГПС для кінцевого розміщення об'єктів в межах технологічного блоку АГФУ

Слід зауважити, що нові розміщення технологічних об'єктів АГФУ, які отримані в наслідок реалізації методу мінімізації рівня вибухонебезпеки блоку, цілком відповідають особливостям технологічного процесу та не потребують його корекції.

Як свідчить аналіз даних табл. 4.20, величина інтегрального критерію  $\Lambda$  вибухонебезпеки технологічного блоку для начального варіанта розміщення об'єктів  $S_1, S_2, S_3, S_4$ , (рис. 4.17, західний вітер 4 м/с) складає  $\Lambda_{\text{НАЧ}} = 0,034631$ , а для варіанта, який відповідає локальному мінімуму функції мети оптимізаційної задачі (4.38) (рис. 4.19), він дорівнює  $\Lambda_{\text{ОПТ}} = 0,01235$ . Порівняння цих величин дозволяє зробити висновок, що застосування розробленого методу мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку АГФУ шляхом оптимального розміщення обладнання дозволило знизити цей рівень на 64,3 % для умов розглянутого варіанту начального компоновання технологічного блоку АГФУ:

$$\Delta = (\Lambda^{\text{НАЧ}} - \Lambda^{\text{ОПТ}}) / \Lambda^{\text{НАЧ}} = (0,034631 - 0,01235) / 0,034631 = 64,3 \%$$

Таким чином, застосування методу оптимального розміщення технологічного обладнання, що пропонується, дає змогу зменшити рівень вибухонебезпеки АГФУ без суттєвої зміни параметрів технологічного процесу та схеми компоновки блоку.

## ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 4

За матеріалами розділу можливо зробити наступні висновки:

1. Виконано чисельну реалізацію методу мінімізації вибухонебезпеки технологічного блоку в умовах вибуху хмари ГПС за рахунок оптимального розміщення обладнання.

2. Реалізація методу проведена для модельного прикладу



технологічного блоку у складі чотирьох об'єктів та реального технологічного блоку газопереробного підприємства – типової абсорбційно-газофракціонуючої установки.

3. Застосування розробленого в роботі методу мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку шляхом оптимального розміщення обладнання дозволило знизити цей рівень для модельного прикладу на 29 %, а для типової абсорбційно-газофракціонуючої установки – на 64,3 % для умов розглянутого варіанту начального компонування технологічного блоку.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-практичну задачу у галузі цивільного захисту – розробку кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП в умовах НС з вибухом хмари ГПС та методу мінімізації цього рівня шляхом оптимального розміщення вибухонебезпечного обладнання.

За підсумками виконаної наукової роботи зроблено наступні висновки.

1. На основі вивчення літературних джерел проведено аналітичний огляд сучасного стану проблеми кількісної оцінки та мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП (на етапі проектування) в умовах НС з вибухом хмари ГПС. Аналіз даних показав, що:

- виникнення НС найчастіше відбувається в результаті розгерметизації технологічних установок з викидом вибухонебезпечної речовини в газоподібній фазі і утворенням хмари ГПС;
- методики, які викладені в нормативних документах, не дозволяють реально оцінювати рівень вибухонебезпеки газонафтопереробного об'єкта і можуть бути використані тільки для орієнтовної оцінки верхньої межі можливого рівня вибухонебезпеки;
- найбільш перспективним методом мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічних блоків ГНПП (на етапі проектування) в умовах НС з вибухами хмар ГПС є оптимізація розміщення вибухонебезпечних апаратів блоку.

2. Розроблено інтегральний та часткові критерії оцінки вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП в умовах НС з утворенням і вибухом хмари ГПС з врахуванням режиму вибуху, характеристик вибухонебезпечних речовин та особливостей забудови території.

3. Здійснена постановка оптимізаційної задачі зниження рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП в умовах НС з утворенням і вибухом хмари ГПС шляхом оптимального розміщення вибухонебезпечного

технологічного обладнання в межах блоку при заданій орієнтації блоку відносно напрямку найбільш ймовірного приземного вітру з урахуванням можливості дрейфу хмари ГПС під дією вітру. Досліджено функцію мети оптимізаційної задачі, в якості якої виступає інтегральний критерій оцінки рівня вибухонебезпеки технологічного блоку, та систему обмежень, яка в загальному випадку включає умови геометричного і технологічного характеру. Проведена формалізація геометричних обмежень оптимізаційної задачі на базі  $\Phi$ -функцій.

4. Доведено еквівалентність моделі оптимізаційної задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП при НС з вибухом хмари ГПС та оптимізаційної задачі мінімізації наслідків НС з вибухом хмари ГПС у межах технологічного блоку ГНПП.

5. Розроблено чисельний метод розв'язання оптимізаційної задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГПП в умовах НС з вибухом хмари ГПС, яка виникла в наслідок руйнування обладнання блоку. Метод дозволяє знайти локальний мінімум функції мети оптимізаційної задачі при заданій орієнтації блоку відносно напрямку найбільш ймовірного приземного вітру та організувати їх перебір з визначенням варіанту, що відповідає найменшому значенню функції мети. При цьому, розроблений метод визначає одночасно і розв'язок задачі мінімізації наслідків НС з вибухом хмари ГПС у межах технологічного блоку ГНПП. Метод оптимального розміщення вибухонебезпечного обладнання технологічного блоку може використовуватися науково-дослідними, проектно-конструкторськими організаціями на етапах побудови генеральних планів підприємств газонафтопереробної галузі України, що дозволить мінімізувати рівень їх вибухонебезпеки та знизити ймовірність руйнування обладнання в умовах надзвичайних ситуацій з вибухами дрейфуючих хмар газоповітряної суміші.

6. Виконано реалізацію методу мінімізації вибухонебезпеки технологічного блоку в умовах вибуху хмари ГПС за рахунок оптимального

розміщення вибухонебезпечного обладнання для модельного прикладу технологічного блоку та типової абсорбційно-газофракціонуючої установки. Застосування розробленого в роботі методу дозволило знизити рівень вибухонебезпеки для модельного прикладу на 29 %, а для АГФУ – на 64,3 % без порушень технологічного процесу.

Основні результати дисертаційного дослідження були впроваджені на Гнідинцівському газопереробному заводі (м. Варва Чернігівської області) при складанні проекту абсорбційно-газофракціонуючої установки, в підрозділах Управління Державної служби України з надзвичайних ситуацій в Чернігівській області при розробці ПЛАС об'єктів газонафтопереробки та в навчальному процесі Національного університету цивільного захисту України.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Чуб І.А., Новожилова М.В., Матухно В.В. Моделювання надзвичайної ситуації з вибухом хмари газоповітряної суміші. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2017. №3 (42). С. 71-77.
2. Чуб І.А., Матухно В.В. Метод мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку шляхом раціонального розміщення обладнання. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2017. Вип. 26. С. 196-202.
3. Чуб І.А., Матухно В.В. Мінімізація рівня вибухонебезпеки технологічного блоку в умовах вибуху хмари газоповітряної суміші. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2018. Вип. 27. С. 160-168.
4. Чуб І.А., Матухно В.В. Прогнозування наслідків надзвичайної ситуації з вибухом хмари газоповітряної суміші. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2016. Вип. 23. С. 186-191.
5. Чуб І.А., Матухно В.В. Модель задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки об'єктів з вибухами хмар газоповітряних сумішей. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2016. Вип. 24. С. 137-142.
6. Чуб І.А., Матухно В.В. Размещения пожароопасных объектов с минимизацией негативного экологического влияния аэрозольных выбросов пожара. *Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів (теорія та практика): зб. матеріалів Всеукр. наук.-тех. конф. Ч. 2*, м. Харків, НУЦЗУ, 12 березня 2014 р. Харків, 2014. С. 193-195.
7. Чуб І.А., Матухно В.В. Розробка критерію кількісної оцінки рівня пожежовибухонебезпеки потенційно небезпечного об'єкту. *Сучасний стан цивільного захисту України: перспективи та шляхи до Європейського простору*: матеріали 17 Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників, м. Київ, ІДУЦЗ, 22-23 вересня 2015 р. Київ, 2015. С. 430-433.
8. Матухно В.В. Підвищення пожежовибухонебезпеки нафтопереробного комплексу за рахунок оптимального розміщення установок з можливими вибухами газоповітряних сумішей. *Проблеми цивільного захисту: управління*,

*попередження, аварійно-рятувальні та спеціальні роботи*: зб. матеріалів III Всеукр. наук.-практ. конф., м. Харків, НУЦЗУ, 1-2 жовтня 2015 р. Харків, 2015. С. 151-153.

9. Чуб І.А., Матухно В.В. Підвищення пожежовибухобезпеки об'єктів нафтопереробного комплексу за рахунок оптимального розміщення установок з можливими вибухами газоповітряних сумішей. *Забезпечення пожежної та техногенної безпеки*: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., м. Харків, НУЦЗУ, 29-30 жовтня 2015 р. Харків, 2015. С. 166-167.

10. Чуб І.А., Матухно В.В. Оценка уровня техногенной опасности потенциально опасного промышленного объекта. *Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы*: сб. материалов X Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых: курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов): В 2-х ч. Ч.1. г. Минск, КИИ МЧС РБ, 7-8 апреля 2016 г. Минск, 2016. С. 68-69.

11. Чуб І.А., Матухно В.В. Оцінка рівня пожежовибухонебезпеки потенційно-небезпечного об'єкту. *Забезпечення промислової та цивільної безпеки в Україні та світі*: матеріали I Міжнар. наук.-практ. конф., м. Луцьк, РВВ Луцького НТУ, 19-21 травня 2016 р. Луцьк, 2016. С. 56-58.

12. Чуб І.А., Матухно В.В. Оцінка впливу надзвичайної ситуації з вибухом хмари газоповітряної суміші. *Проблеми пожежної безпеки*: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, НУЦЗУ, 28-29 жовтня 2016 р. Харків, 2016. С. 146-148.

13. Чуб І.А., Матухно В.В. Метод мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку газопереробного підприємства. *Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку*: матеріали 19 Всеукр. наук.-практ. конф., м. Київ, ІДУЦЗ, 10-11 жовтня 2017 р. Київ, 2017. С. 466-469.

14. Матухно В.В. Мінімізація рівня вибухонебезпеки технологічного блоку за рахунок оптимального розміщення обладнання. *Пожежна безпека: проблеми та перспективи*: зб. тез доповідей Всеукр. наук.-практ. конф.,

м. Харків, НУЦЗУ, 1-2 березня 2018 р. Харків, 2018. С. 182-184.

15. Матухно В.В. Визначення характеристик хмари газоповітряної суміші при надзвичайній ситуації з викидом газоподібної вибухонебезпечної речовини. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених*, м. Харків НУЦЗУ, 29 березня 2018 р. Харків, 2018р. С. 280.

16. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2016 році, Київ, ДСНС України, 2017. 305 с.

17. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2017, Київ, ДСНС України, 2018. 295 с.

18. Манайчева В.А. Хуснияров М.Х. Влияния группировки буродования технологического блока установки НПП на относительный энергетический потенциал взрывоопасности. *Нефтегазовое дело*. 2006. Вып 6. С. 45-51.

19. Долوماتов М.Ю., Теляшев Э.Г. Экология переработки углеводородных систем: монография. Москва, Химия. 2002. 608 с.

20. Солодовников А.В., Тляшева Р.Р. Основные опасности предприятий нефтепереработки. *Проблемы строительного комплекса России*. Материалы IX международной научно-технической конференции. Уфа, 2005. С. 114.

21. Исследование аварий в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности США. URL: <https://www.facebook.com/WestExplosion>.

22. Краснов А. В., Садыкова З.Х., Пережогин Д.Ю., Мухин И.А. Статистика чрезвычайных происшествий на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности за 2007-2016 гг. *Нефтегазовое дело*. Уфа, 2017. Вып. 6. С. 179-191.

23. Маршалл В. Основные опасности химических производств: монография. Москва, Мир. 1989. 672 с.

24. Бесчастнов М.В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение: монография. Москва, Химия. 1991, 123 с.

25. Сафонов В.С. Теория и практика анализа риска в газовой промышленности: монография. Москва, Техиздат. 1998, 208 с.
26. Емельянов В.М. Защита населения и территории в чрезвычайных ситуациях: учебное пособие. Москва, Трикста. 2004. 480 с.
27. Котляревский В.А. Энциклопедия безопасности: «строительство, промышленность, экология»: монография. Москва, Наука. 2005. 688 с.
28. Bjerketvedt, D., Bakke, J.R. and Van Wingerden, K. (1997). Gas explosion handbook, 1(52), pp. 1-150.
29. ГОСТ 12.3.047-98. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. [Действующий с 01-01-2001]. Изд. офиц. Москва, 2001. 92 с.
30. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. [Действующий с 01-10-2001]. Москва, 2001. 25 с.
31. Чиркова А.Г. Иерархическая система оценки безопасной эксплуатации оборудования для переработки нефти: дис. ... докт. техн. наук: 05.26.03. Уфа, 2005. 248 с.
32. Чернай А.В., Налисько М.М. Математичне моделювання вимушеного запалювання газоповітряної суміші при розрахунку вражаючих факторів аварійних вибухів. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. Дніпро, 2016, Вып 5. С. 82-94.
33. Van den Berg A.C., Van Wingerden C.J.M. (1994). Vapor cloud explosion blast modeling. *ICHEME Symposium Series*, issue 124. pp. 393-409.
34. Солодовников А.В., Тляшева Р.Р. Моделирование формирования и распространения взрывного газового облака с применением CFD-технологий. *Интенсификации тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология: Материалы Всероссийской студ. науч.-техн. конф.* г. Казань, КНИТУ, 16-18 декабря 2005 г. г. Казань, 2005. С. 260.
35. Коротченко К.В., Дубинин Д.П. Исследование ширины противопожарного барьера, создаваемого взрывом топливовоздушных



зарядов. *Международный научно-практический журнал «Чрезвычайные ситуации: образование и наука»*. Гомель, ГИИ МЧС республики Беларусь 2014. №1 (Т 9). С. 21–25.

36. *Methods for the Calculation of the Physical Effects. – Gevaarlijke Stoffen*, 1996. – 870 p.

37. Brossard J., Bailly P., Desbordes D. (1989). Overpressure imposed by blast wave. *Progress in Astronautics and Aeronautics*, Oslo, issue 4, p. 410 [In Norway].

38. Giesbrecht H., Hemmer G., Hess K. (1984). Analysis of explosion hazards on spontaneous release of inflammable cases. *Ger. Chem. Eng.*, issue 4. pp. 315-325.

39. Lee J.H., Guirao C.V., Bach G.G. (1989). Blast effects from vapor cloud explosion. *Loss prevention.*, issue 1(11). pp. 59-70.

40. Адушкин В.В., Когарко С.М., Лямин Л.Д. Расчеты безопасных расстояний при газовом взрыве в атмосфере. *Взрывное дело*. Москва, 1975. №32. С. 82-94.

41. Оценка опасности взрывов больших газовых облаков в открытом пространстве: НИИТЭХИМ. Москва. 1989. 18 с.

42. Троицкий А. П. Аварии, связанные с объемными взрывами. *Каучук и резина*. Москва, 1984. № 2. С. 36-39; № 3. С. 35-36; № 4. С. 39-40.

43. Беликов А.С., Налисько Н.Н., Барташевская Л.И., Рагимов С.Ю. Модификация метода крупных частиц в задаче расчета аварийных взрывов газовой среды. *Строительство, материаловедение, машиностроения*. Днепр, 2017. Вып. 101. С. 34-42.

44. Беликов А.С., Налисько Н.Н. «Параметры макрокинетики горения углеводородов в численном расчете аварийных взрывов» *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: матеріали VII Всеукр. наук.-практ. конф., Черкаси, ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 18-19 травня 2017*. С. 54 – 56.

45. Беликов А.С., Налисько Н.Н., Улитина М.Ю., Шаломова

В.А. Оценка безопасных условий эксплуатации промышленных объектов при наличии взрыва с применением прогноза математической модели ударной трубы. *Строительство, материаловедение, машиностроения*. Днепр, 2017. Вып. 101. С. 34-42.

46. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. [Чинний від 01-01-2017] Вид офіц. Київ: Мінрегіон України, 2016. 31 с.

47. РД 03-409-01. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей [Действующий с 26-06-215]. Москва, 2014. 38 с.

48. Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах. Москва, ЗАО НТЦ ПБ. 2010. 208 с.

49. Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. Взрывные явления. Оценка и последствия: монография. Москва, Мир. 1986. 319 с.

50. Солодовников А.В., Тляшева Р.Р. Анализ методов определения последствий аварийных ситуаций, связанных с образованием пожаровзрывоопасных облаков парогазовоздушных смесей на предприятиях нефтепереработки. *Мировое сообщество: проблемы и пути решения*. Уфа, 2005. Вып 218. С. 70-73.

51. Попов В.М., Чуб И.А., Новожилова М.В., Моделирование характеристик потока отказов основных производственных фондов объектов повышенной опасности. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харьков, НУЦЗУ. 2015. Вып. 21. С. 64-70.

52. Баратов А.Н., Иванов Е.И., Корольченко А.Я. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность: справ. изд. Москва, Химия. 1987. 272 с.

53. Белов С.В., Девисилов В.А., Козьяков А.Ф. Безопасность жизнедеятельности: учебник для студентов. Москва, Высшая школа. 2000. 343 с.

54. Мартынюк В.Ф. Защита среды в чрезвычайных ситуациях. Москва, ФГУП. 2003. 336 с.

55. Бесчастнов М.В., Соколов В.М., Кац М.И. Аварии в химических

производствах и меры их предупреждения: монография. Москва, Химия. 1976. 368 с.

56. Вогман Л.П. Зуйков В.А. Основные подходы к оценке уровня пожарной опасности производственных объектов. *Пожаровзрывобезопасность*. Москва. 2002. Вып. 4. С. 23-30.

57. Sevezo Directive 85/50//EU, 96/82/EU, 2012/18/EU of the European Parliament on the control of major-accident hazards involving dangerous substances.

58. Конвенция о трансграничном воздействии промышленных аварий. Европейская экономическая комиссия; Организация Объединенных Наций. Нью-Йорк; Женева, 1994. С. 47-77.

59. Лисанов М.В. Нормативно-правовое обеспечение декларирования промышленной безопасности опасных производственных объектов. *Безопасность труда в промышленности*. Москва. 2000. Вып. №1. С. 8-12.

60. Конвенція №174 «Про попередження крупних промислових аварій». Міжнародна організація праці. Женева, 22 липня 1993 року.

61. Кловач Е.В., Сидоров В.И. Информирование общественности об опасностях промышленного объекта. *Безопасность труда в промышленности*. 1995. Вып. 10. С. 38-39.

62. Міжнародний стандарт ІЕС 60079-10-1:2006. Explosive atmospheres – Part 1-1: Classification of areas. Explosive gas atmospheres (Вибухонебезпечні середовища. Частина 10-1. Вибухонебезпечні газові середовища).

63. ISO/TS 16901:2015(en) Guidance on performing risk assessment in the design of onshore LNG installations including the ship/shore interface.

64. ISO 17776:2016 (en) Petroleum and natural gas industries – Offshore production installations – Major accident hazard management during the design of new installations.

65. NFPA 101A, Alternative Approaches to Life Safety. (2001). – Quincy, MA: National Fire Protection Association.

66. NFPA 101, Life Safety Code. (2001). – Quincy, MA: National Fire

Protection Association.

67. ПБ 09-170-97. Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств. Утверждены Постановлением Госгортехнадзора России. [Действующий от 22-12-1997]. Выд. оф. Москва. С. 52.

68. Методика оценки последствий химических аварий. Москва, ЗАО НТЦ ПБ. 2005. 57 с.

69. Солодовников А.В. Моделирование развития аварийных ситуаций на объектах нефтеперерабатывающей промышленности, вызванных образованием облаков топливовоздушных смесей: дис. ... канд. тех. наук: 05.26.03. Уфа, 2006. 167 с.

70. Солодовников А.В., Тляшева Р.Р. Анализ методов определения последствий аварийных ситуаций, связанных с образованием пожаровзрывоопасных облаков парогазовоздушных смесей на предприятиях нефтепереработки. *Мировое сообщество: проблемы и пути решения*: сб. науч. ст. Уфа, УГНТУ. 2005. С. 70-73.

71. Ковалев Е.М., Чиркова А.Г., Вахапова Г.М. Оценка потенциальной опасности технологических установок для переработки углеводородного сырья при прогнозировании возможных аварий. *Нефтегазовое дело*. 2003. Вып. 1. С. 317-325.

72. Лисанов М.В. Оценка опасности установки первичной переработки нефти при декларировании промышленной безопасности. *Безопасность труда в промышленности*. 1999. Вып. 8. С. 23-26.

73. Бейкер У. Взрывные явления. Оценка и последствия: монография. Под ред./ П. Кокс, Я.Б. Зельдовича, Б.Е. Гельфанда. Москва, Мир. 1986. С. 198.

74. Methods for the determination of possible damage. Green book. CPR 16E, 1989.

75. Хуснияров М.Х., Попков В.Ф., Руднев Н.А. Взрывоопасность

установок нефтепереработки: монография. Уфа, УГНТУ. 2002. 124 с.

76. Порядок класифікації надзвичайних ситуацій за їх рівнями: Постанова Кабінету Міністрів України від 24.03.2004 р. №368. *Офіційний вісник України*. №4. 2004. 10 с.

77. Національний класифікатор України. Класифікатор надзвичайних ситуацій ДК 019:2010. Київ, Держспоживстандарт. 2010. С. 1011.

78. Про затвердження Класифікаційних ознак надзвичайних ситуацій: Наказ МНС України від 12.12.2012 №1400. *Офіційний вісник України*. №12. 2012. С. 136-141.

79. Про затвердження Методики ідентифікації потенційно небезпечних об'єктів: Наказ Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків чорнобильської катастрофи від 23.02.2006 № 98. *Офіційний вісник України*. №6. 2006. С. 127-133.

80. Про затвердження Положення про моніторинг потенційно небезпечних об'єктів: Наказ Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків чорнобильської катастрофи від 06.11.2003 №425. *Офіційний вісник України*. №3. 2003. С. 78-79.

81. Белов П.Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере. Москва, Академия. 2003. 512 с.

82. Гаврилей В.М. Методы количественной оценки уровня пожаровзрывобезопасности объектов. *Обзорная информация*. Москва, ВНИИПО. 1987. Вып. 2/87. С. 14 – 21.

83. Дутчак М.И., Сучков В.П. Проблемы нормативных методов оценки пожаровзрывоопасности объектов трубопроводного транспорта и хранения нефтепродуктов. *Пожаровзрывобезопасность*. 2003. Вып. 5. С. 55 – 60.

84. Монахов В.Т. Методы исследования пожарной опасности веществ. Москва, Химия. 1979. 424 с.

85. Таубкин С.И. Пожаро- и взрывоопасность пылевидных материалов и технологических процессов их переработки. Москва, Химия. 1976. 264 с.

86. Расбаш Д.Дж. Аналитический подход к пожарной безопасности. Москва, Мир. 1981. 369 с.
87. Клузель Д., Саррат П. Расчетный метод оценки уровня пожарной безопасности. Москва, Мир. 1981. 248 с.
88. Панова Р.Г. Использование регрессионных моделей для количественной оценки пожарной опасности объектов. *Пожарная профилактика*. Москва, ВНИИПО. 1980. Вып. 16. С. 15 –19.
89. Nune V.J. Ja evalnacion del riesgo de incendio en la industria // *A. S. E. J. F*, 1976. P. 105 – 109.
90. Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: *Сб. нормат. документов*. Москва, Госгортехнадзор. 2001. Серия 27. Вып. 2. 220 с.
91. Рекомендации по определению энергетических потенциалов объектов и разработке мероприятий по повышению эффективности их противоаварийной защиты. Москва, 1986. 30 с.
92. Ковалев Е.М., Чиркова А.Г., Вахапова Г.М. Оценка потенциальной опасности технологических установок для переработки углеводородного сырья при прогнозировании возможных аварий. *Нефтегазовое дело*. Москва 2003. Вып №1. С. 317-325.
93. Буркина Е.Н. Давыдова Е.В., Кузеев И.Р. Оценка поражающих факторов аварий на промышленных установках. *Промышленная безопасность на взрывопожароопасных и химически опасных производственных объектах*: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, УГНТУ. 2008. С. 329-336.
94. Буркина Е.Н. Оценка потенциальной опасности технологического оборудования на основе интегрального параметра. *Мировое сообщество: проблемы и пути решения*: сб. науч. ст. Уфа, УГНТУ. 2008. Вып. 23. С. 21-35.
95. Буркина Е.Н. Совершенствование метода расчета параметров опасности нефтехимического-го оборудования. *Нефтегазовое дело: научно-*

*технически журнал*. Уфа. 2009. Т.7, Вып. 1. С. 121-124.

96. Козлитин А.М., Яковлев Б.Н. Чрезвычайные ситуации техногенного характера. Прогнозирование и оценка. Детерминированные методы количественной оценки опасностей техносферы: Учебное пособие / Под ред. А.И.Попова. Саратов, СГУ. 2000. 124 с.

97. Хуснияров М.Х., Попков В.Ф., Руднев Н.А. Взрывоопасность установок нефтепереработки. Уфа, УГНТУ. 2002. 124 с.

98. Шебеко Ю.Н., Шевчук А.П., Колосов В.А. Оценка индивидуального и социального риска аварий с пожарами и взрывами для наружных технологических установок. *Пожаровзрывобезопасность*. Уфа. № 1. С. 21 – 29.

99. Шевчук А.П., Иванов В.А., Косачев А.А. Проблемы количественной оценки пожарного риска. *Пожаровзрывобезопасность*. Уфа. 1994. Т. 3. № 1. С. 42 – 48.

100. All B.J.M. (1991). Risk Analysis and Risk Policy in the Netherlands and the EEC. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. V. 4. №1. pp. 58 – 64.

101. Гарсиа М. Проектирование и оценка систем физической защиты. Москва, Мир. 2003. 369 с.

102. Богданов В.С., Буренин В.А., Токарев Д.В., Фахрисламов Р.Г. Применение метода «деревьев событий» при составлении деклараций промышленной безопасности для нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий. *Нефтегазовое дело*. Уфа. 2003. №.1. С. 326-332.

103. Стандарт МЭК Анализ дерева отказов, 1990. СИФ НТЦ ПБ-707. (ГОСТ Р 51901.13-2005 (МЭК 61025:1990). Менеджмент риска. Анализ дерева отказов).

104. Новикова Т.Б. Опыт моделирования диаграммы «дерево отказов». *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. №12-7. С. 1296-1300.

105. Солодовник А.В. Моделирование развития аварийных ситуаций на объектах нефтеперерабатывающей промышленности, вызванных образованием облаков топливовоздушных смесей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03. Уфа. 2006. 28 с.

106. Солодовников А.В., Тляшева Р.Р. Прогнозирование вероятных зон застоя на наружной установке нефтеперерабатывающего предприятия. *Нефтегазовое дело*. Уфа. 2006. №3. С. 5-20.

107. Ковалев Е.М. Оптимизация безопасного расположения оборудования установок нефтеперерабатывающих предприятий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03. Уфа. 2006. 29 с.

108. Ковалев Е.М. Оптимизация расположения оборудования опасных производственных объектов нефтеперерабатывающей промышленности. *Мировое сообщество: проблемы и пути решения*. Уфа. 2005. №18. С.176-180.

109. Ковалев Е.М., Чиркова А.Г., Тляшева Р.Р. Оптимальное расположение оборудования как способ снижения опасности ОПО. *Остаточный ресурс нефтегазового оборудования*. Уфа. 2006. №1. 87 с.

110. Стряпков А.В., Паршина И.Н., Коваленко Д.В. Варианты снижения пожаровзрывоопасности нефтехимических объектов. *Вестник ОГУ*. Оренбург. 2004. №12. С. 124-128.

111. Чуб И.А., Морщ Е.В. Моделирование размещения пожароопасных объектов с учетом опасных факторов возможного пожара. *Проблемы пожарной безопасности: сборник научных трудов АГЗ Украины*. Харьков, Фолио. 2004. Вып. 15. С. 224-227.

112. Морщ Е.В. Оптимизация размещения пожароопасных объектов на территории промышленного предприятия. *Проблемы пожарной безопасности сборник научных трудов АГЗ Украины*. Харьков, Фолио. 2005. Вып. 17. С. 125-129.

113. Морщ Е.В., Чуб И.А. Снижение уровня негативного воздействия выбросов возможного пожара за счет оптимального размещения объектов. *Наглядно-профілактична діяльність в МНС України: тези доповідей наук.-*



техн. конф. Харків, АЦЗУ. 26 березня 2004. С. 56-57.

114. Морщ Е.В. Моделирование размещения объектов техногенной опасности с учетом опасных факторов возможной чрезвычайной ситуации. *Проблемы информатики и моделирования: Материалы четвертой Международной научно-технической конференции*. Харьков, НТУ «ХПИ», 25-27 ноября 2004. С. 37.

115. Чуб И.А., Морщ Е.В., Труш А.О., Ковальский С.В. Размещение объектов техногенной опасности с минимизацией уровня воздействия возможной чрезвычайной ситуации. *Проблемы пожарной безопасности*. 2004. Вып. 16. С. 248–251.

116. Стоян Ю.Г., Яковлев С.В. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования: монография. Киев, Наук. думка. 1986. 267 с.

117. Гиль Н.И., Новожилова М.В. Элементы теории геометрического проектирования: монография. Киев, Наук. думка. 1995. 316 с.

118. Стоян Ю.Г., Пуятин В.П. Размещение источников физических полей: монография. Киев, Наукова думка. 1981. 182 с.

119. Чуб И.А. Формализация системы ограничений задачи размещения пожароопасных объектов с учетом рельефа местности. *Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил*. 2010. Вип. 3(25). С. 190-193.

120. Новожилова М.В. Моделювання основних обмежень в нелінійних задачах оптимізаційного геометричного проектування. *Прикладна геометрія і інженерна графіка*. Київ, КДТУБА. 1999. № 65. С.62–68.

121. Стоян Ю. Г. Размещение геометрических объектов: монография. Киев, Наук. думка. 1975. 240 с.

122. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование: монография. Москва, Мир. 1975. 536 с.

123. Петров Е.Г., Новожилова М.В., Гребенік І.В. Методи прийняття рішень в соціально-економічних і технічних системах: монографія. Київ,

Техніка. 2004. 340 с.

124. Чуб И.А. Построение системы геометрических ограничений в задачах оптимизации размещения пожаровзрывоопасных объектов. *Геометричне та комп'ютерне моделювання*. Харьков. 2007. Вип 16. С. 125–132.

125. Бейко И.В., Бублик Б.Н., Зинько П.Н. Методы и алгоритмы решения задач оптимизации: учебник. Киев, Вища школа. 1983. 512 с.

126. Стоян Ю.Г., Пономаренко Л.Д., Винарский В.Я. Основные свойства и методы построения Ф–функций. Харьков. 1984. 28с. (Препринт / АН УССР. Ин–т пробл. машиностроения; № 193).

127. Новожилова М.В. Використання поняття Ф–функції в 2D задачах геометричного проектування. *Вісник ЖІТІ Фундаментальні науки*. Житомир. 1998. №8. С. 328–331.

128. Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ. Москва, ЗАО НТЦ ПБ. 2012. 46 с.

129. Розпорядженні КМУ від 22 січня 2014 року № 37-р «Про схвалення Концепції управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру». Київ, 2014.

130. Хохлов Н.В. Управление риском: учебное пособие для вузов. Москва, ЮНИТИ ДАНА, 2003. 239 с.

131. Андронов В.А, Рогозін А.С., Соболев О.М., Тютюник В.В., Шевченко. Р.І. *Природні та техногенні загрози, оцінювання небезпек*: навч. посіб. Харків, НУЦЗУ. 2011. 264 с.

132. Pasquill F. (1962). Atmospheric diffusion. London, TPE, p 298.

133. Pasquill F. (1976). Atmospheric Dispersion Parameters in Gaussian Plume Modeling. *Triangle Park: U.S. Environmental Protection Agency*. p. 225.

134. Базара М., Щетти К.. Нелинейное программирование. Теория и алгоритмы: монография. Москва, Мир. 1988. 583 с.

135. Пшеничный Б.Н., Данилин Ю.М. Численные методы в экстремальных задачах: монография. Москва, Физматгиз. 1975. 319 с.

136. Ляшенко И.Н., Карагодова Е.А., Шор Н.З. Линейное и нелинейное программирование: учебник. Киев, Вища школа. 1975. 372с.

137. Тляшева Р.Р, Солодовников А.В. Исследование формирования взрывоопасных облаков на опасных производственных объектах с использованием программного комплекса FlowVision. *Мировое сообщество: проблемы и пути решения: Сборник научных статей.* Уфа, УГИТУ. 2006. №2. С. 72-77.

138. Берлянд М.Е. Атмосферная диффузия и загрязнение воздуха: монография. Ленинград, Гидрометеиздат. 1987. 361 с.

139. Берлянд М.Е. Современные проблемы диффузии и загрязнения атмосферы: монография. Ленинград, Гидрометеиздат. 1975. 543 с.

## **ДОДАТОК А**

### **Список публікацій за темою дисертації**

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

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

1. Чуб І.А., Новожилова М.В., **Матухно В.В.** Моделювання надзвичайної ситуації з вибухом хмари газоповітряної суміші. *Радіoeлектроніка, інформатика, управління*. 2017. №3 (42). С. 71-77. (Стаття у міжнародній наукометричній базі Web of Science).

*Здобувачу особисто належить аналіз останніх публікацій, проведення розрахунків та аналіз отриманих результатів.*

2. Чуб І.А., **Матухно В.В.** Метод мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку шляхом раціонального розміщення обладнання. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2017. Вип. 26. С. 196-202. (Стаття у міжнародній наукометричній базі Index Copernicus та Ulrich's Periodicals).

*Здобувачу особисто належить математична модель оптимізаційної задачі розміщення та загальна схема методу.*

3. Чуб І.А., **Матухно В.В.** Мінімізація рівня вибухонебезпеки технологічного блоку в умовах вибуху хмари газоповітряної суміші. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2018. Вип. 27. С. 160-168. (Стаття у міжнародній наукометричній базі Index Copernicus та Ulrich's Periodicals).

*Здобувачу особисто належить загальна схема та алгоритмічна реалізація методу розв'язання задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку.*

**Статті у наукових фахових виданнях України:**

4. Чуб І.А., **Матухно В.В.** Прогнозування наслідків надзвичайної ситуації з вибухом хмари газоповітряної суміші. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2016. Вип. 23. С. 186-191. (Стаття у науковому фаховому виданні України).

*Здобувачу особисто належить методика прогнозування наслідків надзвичайної ситуації з вибухом газоповітряної хмари та розрахунок*

*параметрів вибуху.*

5. Чуб І.А., Матухно В.В. Модель задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки об'єктів з вибухами хмар газоповітряних сумішей. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків, 2016. Вип. 24. С. 137-142. (Стаття у науковому фаховому виданні України).

*Здобувачу особисто належить математична модель задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки об'єкту нафтопереробного підприємства, на якому можливо виникнення надзвичайної ситуації з вибухом хмари газоповітряної суміші.*

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

6. Чуб І.А., Матухно В.В. Размещения пожароопасных объектов с минимизацией негативного экологического влияния аэрозольных выбросов пожара. *Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів (теорія та практика): зб. матеріалів Всеукр. наук.-тех. конф. Ч. 2*, м. Харків, НУЦЗУ, 12 березня 2014 р. Харків, 2014. С. 193-195. (Форма участі - очна).

*Здобувачу особисто належить математична модель оптимізаційної задачі розміщення та загальна схема методу.*

7. Чуб І.А., Матухно В.В. Розробка критерію кількісної оцінки рівня пожежовибухонебезпеки потенційно небезпечного об'єкту. *Сучасний стан цивільного захисту України: перспективи та шляхи до Європейського простору: матеріали 17 Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників, м. Київ, ІДУЦЗ, 22-23 вересня 2015 р. Київ, 2015. С. 430-433. (Форма участі - заочна).*

*Здобувачу особисто належить розробка структури інтегрального критерію кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки об'єкту та проведення розрахунків.*

8. Матухно В.В. Підвищення пожежовибухобезпеки нафтопереробного комплексу за рахунок оптимального розміщення установок з можливими вибухами газоповітряних сумішей. *Проблеми цивільного захисту: управління,*

*попередження, аварійно-рятувальні та спеціальні роботи: зб. матеріалів III Всеукр. наук.-практ. конф., м. Харків, НУЦЗУ, 1-2 жовтня 2015 р. Харків, 2015. С. 151-153. (Форма участі - очна).*

9. Чуб І.А., **Матухно В.В.** Підвищення пожежовибухобезпеки об'єктів нафтопереробного комплексу за рахунок оптимального розміщення установок з можливими вибухами газоповітряних сумішей. *Забезпечення пожежної та техногенної безпеки: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., м. Харків, НУЦЗУ, 29-30 жовтня 2015 р. Харків, 2015. С. 166-167. (Форма участі - очна).*

*Здобувачу особисто належить математична модель задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки об'єкту нафтопереробного підприємства, на якому можливо виникнення надзвичайної ситуації з вибухом хмари газоповітряної суміші.*

10. Чуб І.А., **Матухно В.В.** Оценка уровня техногенной опасности потенциально опасного промышленного объекта. *Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сб. материалов X Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых: курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов): В 2-х ч. Ч.1. г. Минск, КИИ МЧС РБ, 7-8 апреля 2016 г. Минск, 2016. С. 68-69. (Форма участі - заочна).*

*Здобувачу особисто належить розробка структури інтегрального критерію кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки об'єкту та проведення розрахунків.*

11. Чуб І.А., **Матухно В.В.** Оцінка рівня пожежовибухонебезпеки потенційно-небезпечного об'єкту. *Забезпечення промислової та цивільної безпеки в Україні та світі: матеріали I Міжнар. наук.-практ. конф., м. Луцьк, РВВ Луцького НТУ, 19-21 травня 2016 р. Луцьк, 2016. С. 56-58. (Форма участі - заочна).*

*Здобувачу особисто належить розробка структури інтегрального критерію кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки об'єкту та проведення розрахунків.*

12. Чуб І.А., Матухно В.В. Оцінка впливу надзвичайної ситуації з вибухом хмари газоповітряної суміші. *Проблеми пожежної безпеки: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, НУЦЗУ, 28-29 жовтня 2016 р. Харків, 2016. С. 146-148. (Форма участі - очна).*

*Здобувачу особисто належить методика прогнозування наслідків надзвичайної ситуації з вибухом газоповітряної хмари та розрахунок параметрів вибуху.*

13. Чуб І.А., Матухно В.В. Метод мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку газопереробного підприємства. *Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку: матеріали 19 Всеукр. наук.-практ. конф., м. Київ, ІДУЦЗ, 10-11 жовтня 2017 р. Київ, 2017. С. 466-469. (Форма участі - заочна).*

*Здобувачу особисто належить загальна схема та алгоритмічна реалізація методу розв'язання задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку.*

14. Матухно В.В. Мінімізація рівня вибухонебезпеки технологічного блоку за рахунок оптимального розміщення обладнання. *Пожежна безпека: проблеми та перспективи: зб. тез доповідей Всеукр. наук.-практ. конф., м. Харків, НУЦЗУ, 1-2 березня 2018 р. Харків, 2018. С. 182-184. (Форма участі - очна).*

15. Матухно В.В. Визначення характеристик хмари газоповітряної суміші при надзвичайній ситуації з викидом газоподібної вибухонебезпечної речовини. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених, м. Харків НУЦЗУ, 29 березня 2018 р. Харків, 2018р. С. 280. (Форма участі - очна).*



**ДОДАТОК Б****Акти впровадження результатів дослідження**