

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
«ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ  
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ»



**КАЛАШНІКОВ ІВАН ВОЛОДИМИРОВИЧ**

УДК 66.013.8:[504.5:623 459](043.5)

**НАУКОВО-МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ІНСТРУМЕНТАРІЙ ОЦІНКИ  
ТЕРИТОРІАЛЬНОГО РИЗИКУ НА ХІМІЧНО НЕБЕЗПЕЧНИХ  
ОБ'ЄКТАХ**

05.26.01 – охорона праці

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Дніпро – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Дніпровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**Біляєв Микола Миколайович,**  
Дніпровський національний університет залізничного  
транспорту імені академіка В. Лазаряна,  
завідувач кафедри гідравліки та водопостачання.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор **Глива Валентин Анатолійович,**  
Національний авіаційний університет, професор кафедри цивільної та  
промислової безпеки;

доктор технічних наук, доцент **Сукач Сергій Володимирович,** Кременчуцький  
національний університет імені Михайла Остроградського, професор кафедри  
охорони праці, цивільної та промислової безпеки;

доктор технічних наук, доцент **Болібрux Борис Васильович,** Національний  
університет «Львівська політехніка», професор кафедри цивільної безпеки.

Захист відбудеться 27 квітня 2021 р. о 11<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д 08.085.01 при Державному вищому навчальному закладі  
«Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» за адресою:  
49600, м. Дніпро, вул. Чернишевського, 24а, ауд. 202.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного вищого  
навчального закладу «Придніпровська державна академія будівництва та  
архітектури» (49600, м. Дніпро, вул. Чернишевського, 24а) та на сайті:  
<https://pgasa.dp.ua/dissertation/>.

Автореферат розісланий «\_\_» березня 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



С.В. Шатов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Сутність **науково-прикладної проблеми**, що розглядається в роботі, полягає в створенні методології оцінювання потенційного територіального ризику у випадку виникнення екстремальних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах.

**Актуальність теми.** Головним механізмом для ефективного і дієвого заохочення до створення безпечних та здорових умов праці, як на рівні підприємства, так і на рівні робочого місця, є запровадження системи запобігання виробничим ризикам, заснованої на принципах усунення небезпек, оцінюванні, контролі ризиків та управління ними. Слід підкреслити, що це особливо важливо для хімічно небезпечних об'єктів, розташованих у різних містах України. На цих об'єктах зберігаються і використовуються хлор, аміак та інші небезпечні речовини. Виникнення екстремальних ситуацій на таких об'єктах може призвести, насамперед, до токсичного ураження персоналу. При створенні надійної системи захисту персоналу на хімічно небезпечних об'єктах у рамках розроблення плану ліквідації аварійної ситуації (ПЛАС) вкрай важливо адекватно оцінити ризик токсичного ураження працівників у разі виникнення екстремальних ситуацій. Помилкова оцінка величини ризику може призвести до створення нераціональної системи захисту персоналу, яка на практиці може виявитися неефективною та не забезпечити збереження життя працівників при виникненні екстремальної ситуації на хімічно небезпечному об'єкті. Зараз для оцінювання техногенних ризиків на таких об'єктах використовуються методики, які не враховують дуже важливих факторів, зокрема: ймовірності різних метеорологічних умов, наявність будівель на території підприємства, нестаціонарність викиду небезпечних речовин, хімічну трансформацію речовин у повітрі. Тому такі методики не дають можливості адекватно оцінити рівень техногенних ризиків на промислових об'єктах при аварійній емісії хімічно небезпечних речовин. У зв'язку з цим виникає гостра потреба вирішення важливої та вкрай актуальної проблеми, яка полягає в розробленні ефективних методів оцінювання техногенних ризиків при емісії хімічно небезпечних речовин на промислових об'єктах.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконувалась відповідно до розпорядження Кабінету Міністрів України від 12 грудня 2018 р. № 989-р «Про схвалення Концепції реформування системи управління охороною праці в Україні та затвердження плану заходів щодо її реалізації». Наукові дослідження, викладені в дисертації, виконані згідно з напрямом наукової роботи кафедри гідравліки та водопостачання Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, відповідно до програм науково-дослідних робіт: «Розробка методів аналізу та прогнозу якості повітряного середовища в робочих та цивільних приміщеннях» (№ держреєстрації 0115U007224, 2016-2018 рр.), «Захист інфраструктури при терористичних актах» (№ держреєстрації 0115U007228, 2016-2018 рр.), «Захист навколишнього середовища на об'єктах транспортної інфраструктури» (№ держреєстрації 0115U007227, 2016-2018 рр.), «Моделювання процесів забруднення

навколишнього середовища при надзвичайних ситуаціях та організованих викидах забруднюючих речовин» (№ держреєстрації 0115U007226, 2016-2018 рр.), «Моделі та методи оцінки ризику, рівня забруднення навколишнього середовища при надзвичайних ситуаціях» (№ держреєстрації 0120U101078, 2020-2021 рр.). У всіх роботах рівень участі автора – виконавець.

**Мета та завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є створення інформаційної системи оцінювання потенційного територіального ризику на хімічно небезпечних об'єктах для забезпечення безпеки працівників у разі виникнення аварій.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати аналіз стану досліджуваної проблеми;
- розробити методи оцінювання потенційного територіального ризику токсичного ураження працівників при аварійних викидах хімічно небезпечних речовин на промислових об'єктах, що дозволяють враховувати при оцінюванні ризику наявність будівель, хімічну трансформацію небезпечних речовин у повітрі, ймовірність різних погодних умов;
- розробити балансову модель для оцінювання потенційного територіального ризику токсичного ураження людей на хімічно небезпечних об'єктах при аварійних викидах хімічно небезпечних речовин;
- розробити методи оцінювання потенційного територіального ризику термічного ураження працівників при горінні твердого ракетного палива на промислових майданчиках або в цехах, що дозволяють враховувати під час оцінювання ризику наявність перешкод, ймовірність різних погодних умов, ймовірність різних місць загоряння;
- розробити експрес-методи для оперативного наукового обґрунтування вибору місця безпечного розташування сховищ хімічно небезпечних речовин, що забезпечує безпеку людей у сховищі при виникненні екстремальних ситуацій;
- розробити методи для наукового обґрунтування вибору місця безпечного розташування сховищ хімічно небезпечних речовин, які враховують вплив наявності будівель, метеорологічних умов, хімічної трансформації небезпечних речовин, а також дозволяють визначати пояс безпеки для важливих об'єктів при можливих терористичних актах із використанням хімічних агентів;
- розробити метод оцінювання ефективності використання повітряної завіси біля промислових будівель, що застосовується для зниження ризику токсичного ураження працівників на промисловому майданчику;
- розробити метод оцінювання ефективності використання повітряного душу в робочому приміщенні, що застосовується для зниження ризику токсичного ураження працівників при виникненні екстремальної ситуації;
- розробити метод оцінювання ефективності використання екрану на промисловій будівлі, що застосовується для зменшення ризику токсичного ураження працівників на промисловому майданчику;
- розробити метод розрахунку процесу руху небезпечних речовин у дихальних шляхах працівників при вдиханні забрудненого повітря;

– виконати програмну реалізацію розроблених методів та створити на їх базі інформаційну систему для аналізу та оцінювання потенційного територіального ризику при викидах хімічно небезпечних речовин на підприємствах.

**Об'єкт дослідження:** процес розсіювання хімічно небезпечних речовин у повітрі при виникненні екстремальних ситуацій на потенційно небезпечних об'єктах.

**Предмет дослідження:** розроблення моделей для оцінювання потенційного територіального ризику на потенційно небезпечних об'єктах у разі виникнення екстремальних ситуацій, що призводять до емісії хімічно небезпечних речовин.

**Методи дослідження:** системний аналіз літературних джерел; для виконання наукових досліджень використовувались: метод фізичного моделювання та математичне моделювання на базі фундаментальних рівнянь механіки суцільного середовища; для чисельного інтегрування моделюючих рівнянь використовувалися різницеві схеми розщеплення, на базі яких розроблено комп'ютерні програми для аналізу та оцінювання потенційного територіального ризику.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

– вперше розроблено 2D-, 3D-методи просторово-часового оцінювання потенційного територіального ризику токсичного ураження працівників на хімічно небезпечних об'єктах, що дозволяють врахувати вплив наявності будівель, хімічної трансформації небезпечних речовин у повітрі, ймовірності різних погодних умов на формування зон ризику;

– вперше розроблено балансову модель для оцінювання потенційного територіального ризику токсичного ураження людей на хімічно небезпечних об'єктах при аварійних викидах небезпечних речовин, яка дозволяє враховувати ймовірність різних погодних умов, хімічну трансформацію небезпечних речовин у повітрі, їхнє сухе осадження та вимивання опадами, тип викиду хімічно небезпечної речовини;

– вперше розроблено методи просторово-часового оцінювання територіального ризику термічного ураження персоналу при виникненні екстремальних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах, що дозволяють враховувати наявність будівель, ймовірність різних погодних умов, ймовірність місця займання на формування зон ризику;

– дістав подальшого розвитку 2D-метод експрес-оцінювання безпечного місця розташування сховищ із хімічно небезпечними речовинами, який, на відміну від існуючих, враховує нестационарний викид хімічно небезпечних речовин. Цей метод також дозволяє оперативно визначати пояс безпеки для важливих об'єктів при терористичних актах із використанням хімічних агентів;

– дістав подальшого розвитку 3D-метод обґрунтування безпечного місця розташування сховищ із хімічно небезпечними речовинами, який, на відміну від існуючих, враховує вплив наявності будівель, метеорологічних умов, хімічної трансформації небезпечних речовин у повітрі. Цей метод також

дозволяє визначати пояс безпеки для важливих об'єктів при терористичних актах із використанням хімічних агентів;

– удосконалено метод оцінювання ефективності використання повітряної завіси біля промислової будівлі для зниження ризику токсичного ураження персоналу на промисловому майданчику, який, на відміну від існуючих, враховує нестаціонарний просторовий розподіл концентрації хімічно небезпечної речовини біля будівлі;

– науково обґрунтовано ефективність використання екрану на промисловій будівлі для локального зниження ризику токсичного ураження персоналу на промисловому майданчику;

– вдосконалено метод оцінювання ефективності використання повітряного душу в промисловому приміщенні для зниження ризику токсичного ураження персоналу при виникненні екстремальної ситуації, який, на відміну від існуючих, враховує нестаціонарність процесу емісії хімічно небезпечної речовини та наявність перешкод у робочому приміщенні;

– дістав подальшого розвитку метод розрахунку руху небезпечних речовин у дихальних шляхах працівника при вдиханні ним забрудненого повітря, який, на відміну від існуючих, враховує геометричну форму дихальних шляхів та нестаціонарний процес руху хімічно небезпечних речовин у них.

**Практичне значення отриманих результатів.** На базі розроблених методів створено комп'ютерні програми, які є основою побудованої інформаційної системи аналізу та прогнозування потенційного територіального ризику на хімічно небезпечних об'єктах або об'єктах підвищеної безпеки. Використання розробленої інформаційної системи аналізу та прогнозування територіального ризику в разі екстремальних ситуацій на підприємствах дозволяє оцінювати ризик із урахуванням важливих чинників, які раніше не бралися до уваги, зокрема таких, як: наявність будівель на території підприємства, нестаціонарність викиду небезпечних речовин, хімічна трансформація речовин у повітрі. Особливістю побудованої системи є можливість науково обґрунтованого визначення місця безпечного розташування сховищ хімічно небезпечних речовин та поясу безпеки для важливих об'єктів у задачах мінімізації ризиків ураження при терористичних актах із використанням хімічних агентів.

Для практичного застосування побудованої інформаційної системи необхідна стандартна вихідна інформація. Особливістю системи є швидкість отримання прогнозованої інформації. Інформаційна система аналізу та прогнозування територіального ризику в разі екстремальних ситуацій на підприємствах може бути використана при розробленні плану ліквідації аварійної ситуації для промислових об'єктів. Використання розробленої інформаційної системи аналізу та прогнозування територіального ризику в разі екстремальних ситуацій дозволяє оцінювати зони ризику на підприємствах для таких виробничих ситуацій, для яких неможливо виконати експеримент.

Отримані результати, розроблені моделі й пакети програм використовуються Державною службою з надзвичайних ситуацій України

(ДСНС України) та в навчальному процесі Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

**Особистий внесок здобувача** в наукових працях, опублікованих у співавторстві, полягає в:

- розробленні методів оцінювання потенційного територіального ризику ураження людей при екстремальних ситуаціях у випадку емісії хімічно небезпечних речовин та теплової хвилі [1–7, 11–14, 17, 18, 24–29, 31, 32, 34, 43];

- розрахунку процесів тепломасопереносу [23, 29, 36, 38–41, 44, 45];

- розробленні методів для обґрунтування безпечного місця розташування сховищ із хімічно небезпечними речовинами, які враховують вплив будівель, метеорологічних умов, хімічну трансформацію небезпечних речовин у повітрі [15];

- створенні методів зниження ризику токсичного ураження персоналу на промислових об'єктах та побудові моделей для визначення їх ефективності [10, 18, 21, 35];

- розробленні методів визначення безпечного місця розташування сховищ із хімічно небезпечними речовинами та визначення поясу безпеки для важливих об'єктів [8, 9, 15];

- чисельному моделюванні масопереносу речовин у робочих зонах [1, 2, 16, 19, 22, 42];

- розробленні програмного забезпечення для визначення ризику токсичного та термічного ураження персоналу [20, 30, 33, 37].

**Апробація матеріалів дисертації.** Результати дисертаційної роботи доповідались і одержали позитивні оцінки на наукових конференціях і семінарах: 75-77 Міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпро, 2015–2017 рр.); 2-й Міжнародній науково-практичній конференції «Теоретичні та практичні аспекти розвитку науки» (м. Київ, 2016 р.); Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно небезпечних об'єктах» (м. Харків, 2016 р.); 6-й Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств» (м. Дніпро, 2017 р.); 7-й Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю (м. Черкаси, 2017 р.); 11-12 Міжнародних науково-практичних конференціях «Сучасні інформаційні і комунікаційні технології на транспорті, у промисловості та освіті» (м. Дніпро, 2017-2018 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інноваційні та інформаційні технології в перевезенні небезпечних вантажів» (м. Харків, 2017 р.); Міжнародному науковому симпозиумі «Тиждень еколога – 2017» (м. Кам'янське, 2017 р.); 4-й Міжнародній науково-технічній конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (м. Дніпро, 2018 р.); науково-технічній конференції «Інформаційні технології в металургії і машинобудуванні» (м. Дніпро, 2018 р.); 73-й науково-технічній конференції Харківського національного університету будівництва та архітектури (м. Харків, 2018 р.); 8-му Всеукраїнському науковому семінарі (м. Харків,

2018 р.); XII International Scientific and Practical Conference «International Trends in Science and Technology» (Warsaw, Poland, 2019 р.).

**Публікації.** Основні положення, результати та висновки дисертаційної роботи відображено в 45 публікаціях, у тому числі: 1 колективній монографії, 27 статтях (зокрема 23 статті – у наукових фахових виданнях України (з них 9 – у виданнях, включених до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus), 2 статті – у виданнях, включених до міжнародної наукометричної бази Scopus), 17 тезах доповідей.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів, висновків і двох додатків. Повний обсяг роботи – 313 сторінок. Робота містить 121 рисунок, 36 таблиць. Список використаних літературних джерел містить 170 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, її зв'язок з науковими програмами; сформульовано мету та завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів; зазначено особистий внесок автора роботи, наведено відомості про апробацію досліджень та публікації.

В **першому розділі** виконано аналіз наукового доробку з проблеми оцінювання ризику на промислових об'єктах. Відзначається, що у Наказі Міністерства праці і соціальної політики України від 04.12.2002 р. № 637 «Про затвердження Методики визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки» надаються лише загальні рекомендації з визначення ризику та відсутні моделі, розрахункові залежності для оцінювання ризику у випадку конкретних надзвичайних ситуацій (емісія хімічно небезпечних речовин, ризик термічного ураження тощо). Водночас за кордоном активно розробляються системи під назвою «Emergency decision support system for accidental release», які призначені для визначення рівнів безпеки та ризику при екстремальних ситуаціях на різних небезпечних об'єктах. Тому дуже важливо мати сучасні методи оцінювання ризику ураження персоналу при виникненні екстремальних ситуацій на потенційно небезпечних об'єктах із метою розроблення планів щодо надійного захисту персоналу підприємства.

Проаналізовано сучасні методи оцінювання ризику при виникненні екстремальних ситуацій на потенційно небезпечних об'єктах. На підставі системного аналізу наукових публікацій було визначено, що існуючі методи оцінювання ризику при екстремальних ситуаціях на потенційно небезпечних об'єктах мають ряд суттєвих недоліків, наприклад, при оцінюванні ризику при викидах хімічно небезпечних речовин на промислових майданчиках, не враховується вплив перешкод на формування зон ураження, не враховується хімічна трансформація небезпечних речовин у повітрі, які потрапили туди при екстремальній ситуації, тощо. Доведено необхідність створення науково обґрунтованих методів оцінювання ризику, що базуються на сучасних методах розрахунку зон ураження при викидах небезпечних речовин або при появі



високотемпературних теплових хвиль. Виконано обґрунтування обраного наукового напрямку.

В другому розділі розглядається побудова методології аналізу та оцінювання потенційного територіального ризику на промислових об'єктах у разі екстремальної ситуації, що призводить до викиду хімічно небезпечних речовин. При розробленні методології використовувалася концепція відомого вітчизняного фахівця в галузі безпеки на хімічно небезпечних підприємствах В. Ельтермана, а саме: розроблення методів оцінювання ризику токсичного ураження персоналу в робочих зонах повинне базуватися на фундаментальних моделях тепломасопереносу.

Результатом розробленої методології є «мапа», яка являє собою матрицю – набір чисел, що показують точки на території підприємства, де ризик ураження людини очевидний або його немає. Наявність такої «мапи» є основою для розв'язання комплексу важливих задач у галузі охорони праці, а саме: створення науково обґрунтованої системи захисту працівників від ураження при екстремальних ситуаціях на хімічно небезпечних об'єктах.

При розробленні методів оцінювання потенційного територіального ризику враховується, що розподіл уражуючого чинника – концентрації небезпечної речовини на території промислового об'єкта – має суттєво ймовірнісний характер. Для визначення потенційного територіального ризику токсичного ураження необхідно визначити розподіл уражуючого чинника – концентрації небезпечної речовини на території промислового об'єкта для ймовірних ситуацій на об'єкті. Якщо людина на території промислового об'єкта перебуває на відстані  $L$  (рис. 1) від можливого джерела аварійного викиду, то ймовірність її потрапляння в зону хімічного ураження можна визначити таким чином:

$$P(L) = \sum P(W_k) \geq L, \quad (1)$$

де  $P(W_k)$  – ймовірність усіх розглянутих метеорологічних ситуацій, за яких людина перебуває в зоні, де концентрація небезпечної речовини перевищує деяке порогове значення, при якому виникає ураження певної тяжкості.

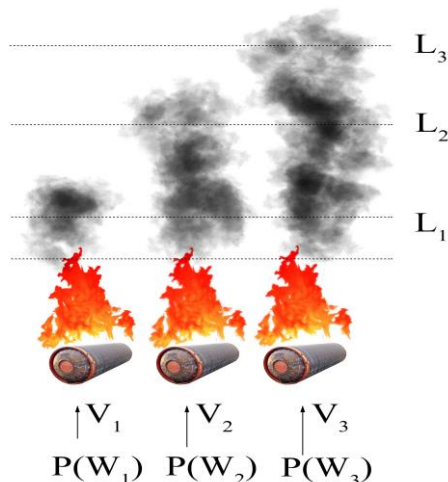


Рисунок 1 – Формування зони ураження при аварійній емісії хімічно небезпечної речовини на промисловому майданчику при різних швидкостях вітру

Таким чином, для оцінювання потенційного ризику на території підприємства у випадку викиду хімічно небезпечної речовини необхідно для кожної точки на території, що розглядається, виконати розрахунки за формулою (1). Але щоб здійснити ці розрахунки, потрібно мати дані прогнозу щодо значення концентрації хімічно небезпечної речовини для цієї (та іншої) точки. Концентрація хімічно небезпечної речовини та її розподіл залежать від ймовірних метеорологічних умов, що потрібно врахувати при визначенні ризику токсичного ураження працівника.

Розрахунки полів концентрації виконуються як для відкритого простору, так і для конкретних робочих приміщень у будівлях, що розташовані на території підприємства. Інтенсивність інфільтрації в приміщеннях, концентрація небезпечної речовини в інфільтраційному повітрі також будуть різні при різних (ймовірних) метеорологічних ситуаціях, що враховується в розробленій методології. Крім цього, на ці величини впливатиме місце повітрязабору (інфільтрації) на будівлі, тому що в різних місцях будівлі швидкість вітрового потоку буде різною. Це також враховується в розробленій методології оцінювання потенційного територіального ризику.

Для оцінювання потенційного територіального ризику токсичного ураження персоналу важливо отримати інформацію щодо розподілу уражуючого чинника – концентрації хімічно небезпечної речовини для ймовірних метеорологічних умов. Розрахунок концентрації хімічно небезпечної речовини для ймовірних метеорологічних умов здійснюється на базі фундаментального рівняння масопереносу:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)C}{\partial z} + \sigma C = \\ = \frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_z \frac{\partial C}{\partial z}) + \\ + \sum_{i=1}^n Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i), \end{aligned} \quad (2)$$

де  $u$ ,  $v$ ,  $w$  – компоненти вектора швидкості вітрового потоку для конкретної ймовірної метеорологічної ситуації;

$C$  – концентрація хімічно небезпечної речовини;

$t$  – час;

$Q_i(t)$  – кількість небезпечної речовини, що викидається за одиницю часу;

$w_s$  – швидкість осідання домішки під дією сили тяжіння (сухе осадження домішки);

$\sigma$  – коефіцієнт, що враховує вимивання домішки опадами;

$x_i, y_i, z_i$  – декартові координати джерела викиду;

$\delta(x - x_i), \delta(y - y_i), \delta(z - z_i)$  – позначка дельта-функції Дірака;

$\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$  – коефіцієнти атмосферної турбулентної дифузії для конкретної ймовірної метеорологічної ситуації.

Для чисельного інтегрування рівняння (2) використовується скінченно-різницевий метод вирішення. Для розрахунку поля швидкості повітря на промисловому майданчику використовується аеродинамічна модель потенційного руху. Базовим рівнянням в цій моделі є рівняння Лапласа для потенціалу швидкості.

При оцінюванні ризику токсичного ураження працівників у випадку екстремальних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах враховується процес хімічних перетворень оксиду азоту та двоокису азоту, які є у викидах, зокрема, при горінні твердого ракетного палива. Для розв'язання цієї задачі чисельно інтегруються рівняння, що описують цю трансформацію.

Оцінювання потенційного територіального ризику токсичного ураження персоналу на промисловому майданчику при ймовірній метеорологічній ситуації  $PW$  здійснюється в такій послідовності:

- на першому етапі розв'язання задачі формується блок даних щодо ініціювання події (можливе місце емісії хімічно небезпечної речовини, інтенсивність емісії, режим емісії, вид хімічного агента, форма будівель, розміщення будівель на промисловому майданчику);
- на другому етапі формується блок даних щодо ймовірних метеорологічних ситуацій  $PW_i$ , характерних для області, де розташоване підприємство;
- на третьому етапі розраховується рівень хімічного зараження для ймовірних метеорологічних ситуацій (на цьому етапі виконується чисельне інтегрування рівнянь для потенціалу швидкості й масопереносу для конкретної метеорологічної ситуації);
- на четвертому етапі визначаються зони, де концентрація перевищує порогове значення (наприклад, смертельна концентрація або ГДК) при конкретній метеорологічній ситуації; ці зони є зонами небезпеки;
- на п'ятому етапі здійснюється побудова поля (матриці) ризику для цього об'єкта.

Для виконання розрахунків із метою визначення величини територіального ризику хімічного ураження персоналу на промисловому майданчику потрібно задати такі параметри: розміри розрахункової області, розміри будівель, геометрична форма будівель, ймовірність реалізації кожної метеорологічної ситуації, параметри ймовірної метеорологічної ситуації, потужність емісії небезпечної речовини, координати джерела емісії. Результатом моделювання є матриця територіального ризику на промисловому майданчику або прилеглий території для конкретного моменту часу після аварії або концентрація хімічно небезпечної речовини та зміна її з часом у цій чи іншій робочій зоні.

Для експрес-оцінювання територіального ризику токсичного ураження людини на промисловому майданчику розроблена box-модель. На рис. 2 показана розрахункова схема для цієї моделі: паралелепіпед (контрольний об'єм) зі сторонами  $dx$ ,  $dy$ ,  $h$ , всередині якого розташовано промисловий майданчик, де має аварійний викид хімічно небезпечної речовини.

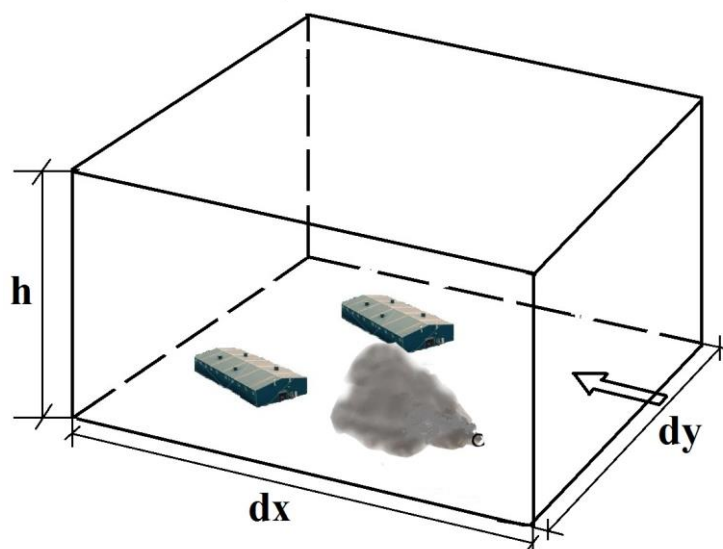


Рисунок 2 – Розрахункова схема (для «box – моделі»)

В рамках цього підходу, рівняння для оцінювання рівня забруднення робочих зон при аварійному викиді хімічно небезпечної речовини має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{dC_b}{dt} = & \frac{C_{in}}{dx} V - \frac{C_b}{dx} V + \frac{Q(t)}{dx dy h} + \\ & + \frac{w_u}{h} C_b - \frac{w_g}{h} C_b - \frac{\sigma}{h} C_b - \frac{R}{h} C_b, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $\sigma$  – коефіцієнт, що враховує процес вимивання домішки опадами;

$R$  – коефіцієнт, що враховує хімічне перетворення домішки;

$w_g$  - швидкість гравітаційного осадження речовини;

$w_u$  - швидкість вертикального руху домішки;

$C_b$  - концентрація домішки на промисловому майданчику;

$C_{in}$  - концентрація домішки, що потрапляє на промисловий майданчик з повітрям.

Моделююче рівняння (3) є базовим рівнянням для експрес-оцінювання територіального ризику токсичного ураження людини на промисловому майданчику у разі аварійного викиду хімічно небезпечної речовини. Для чисельного інтегрування рівняння (3) використовується метод Ейлера.

Розрахунки концентрації токсичної речовини  $C_b$  виконуються для кожної ймовірної метеорологічної ситуації, що розглядається. Ці значення концентрації створюють базу для визначення територіального ризику токсичного ураження людини на конкретному хімічно небезпечному об'єкті.

Розглядається методологія аналізу та оцінювання ризику термічного ураження людей на промисловому об'єкті. Відомо, що при деяких екстремальних ситуаціях на хімічно небезпечних об'єктах, крім викиду токсичних речовин, з'являється інший уражуючий чинник – температура повітря поблизу місця аварії. При контакті людини з нагрітим повітрям спостерігаються опіки шкіри різного ступеня тяжкості, опіки дихальних шляхів,

що може призвести до термічного ураження людини з летальним наслідком. Розглядається методологія розв'язання трьох важливих задач, які пов'язані з визначенням потенційного територіального ризику термічного ураження персоналу: задача № 1 – аналіз та оцінювання ризику термічного ураження персоналу на промисловому майданчику при виникненні на майданчику потужного джерела теплової емісії; задача № 2 – аналіз та оцінювання ризику термічного ураження персоналу всередині промислового приміщення при виникненні в ньому потужного джерела теплової емісії; задача № 3 – аналіз та оцінювання ризику термічного ураження персоналу всередині промислового приміщення при затіканні нагрітого зовнішнього повітря з промислового майданчика, де з'явилося потужне джерело теплової емісії. Для визначення ймовірного розподілу температури в області дослідження, при вирішенні задачі № 1 та задачі № 2 використовується двовимірне рівняння конвективного теплопереносу в наближенні Бусінеска. Для вирішення задачі № 3 та визначення нестационарного процесу зміни температури повітря в робочому приміщенні при затіканні зовнішнього нагрітого повітря використовується побудована box-модель. Для розрахунку поля швидкості повітря на промисловому майданчику або всередині робочого приміщення використовується аеродинамічна модель потенційного руху.

В третьому розділі наведено приклади використання розроблених методів аналізу та оцінювання територіального ризику токсичного та термічного ураження персоналу для декількох хімічно небезпечних об'єктів Дніпропетровської області.

На першому етапі досліджень виконувалась оцінка потенційного територіального ризику токсичного ураження персоналу у випадку екстремальної ситуації, що призвела до горіння твердого палива на території хімічного заводу. На рис. 3 показано зону хімічного забруднення на майданчику при швидкості вітру 7 м/с. На рис. 4-5 зображено матриці потенційного територіального ризику (ймовірність токсичного ураження персоналу в конкретній точці майданчика; ця оцінка виконана за концентрацією хлору, що змінюється з часом) при реалізації ймовірних метеорологічних ситуацій, що характерні для регіону.

Друк величини ризику ураження на рисунках виконано у відомому форматі «ціле число», тобто без дробової частини числа. Число «99» на матриці означає 100 % ураження працівника; виведення на друк числа «99», а не «100» пов'язано з тим, що для зручності подання інформації під усі числа «виділено» по дві позиції.

При проведенні обчислювального експерименту для визначення ризику токсичного ураження персоналу розраховувалося значення токсодози в робочій зоні:

$$T_d = \int_0^t C(x, y, z) dt.$$

Розрахунок токсодози в розробленій комп'ютерній програмі здійснюється на базі прогнозного значення концентрації для конкретного часу після аварії. На друк видається така інформація: «час після аварії – рівень ураження», (табл. 1).

Таблиця 1 – Ступінь ураження персоналу в робочій зоні

Час, с	Ступінь ураження
15	Ураження середньої тяжкості
20	Смертельне ураження
25	Смертельне ураження

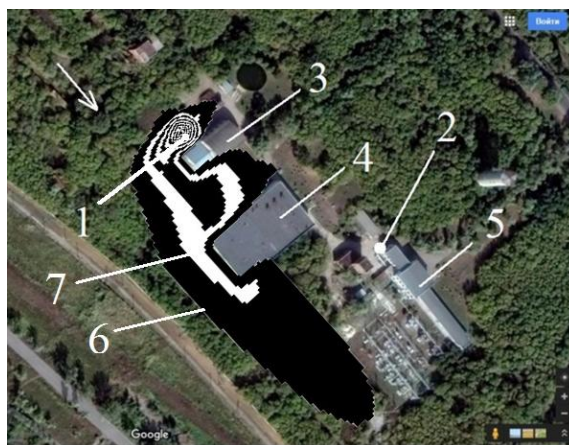


Рисунок 3 – Зона хімічного забруднення на майданчику,  $t=21$  с (Google image 2019): 1 – місце аварійного викиду; 2 – робоча зона; 3, 4, 5 – промислові будівлі; 6 – концентрація хімічного агента  $C=250$  мг/м<sup>3</sup>; 7 – концентрація хімічного агента  $C=1250$  мг/м<sup>3</sup>.

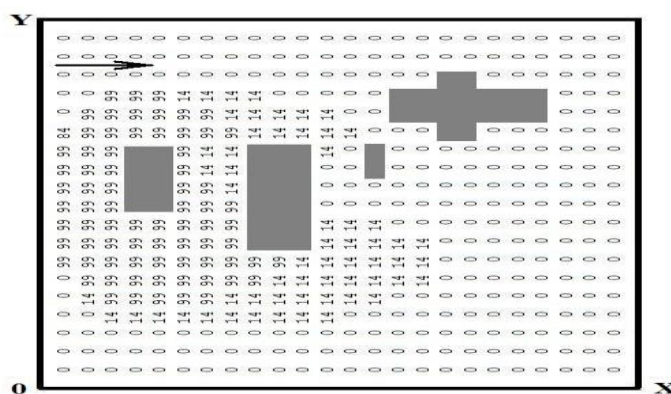


Рисунок 4 – Ймовірність токсичного ураження персоналу на промисловому майданчику на момент часу  $t=8$  с (розрахунок за концентрацією хлору)

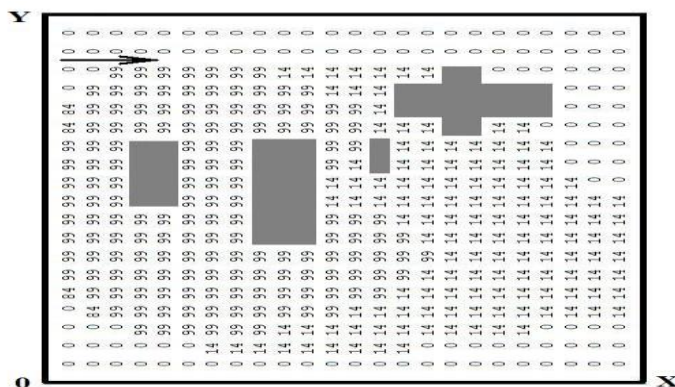


Рисунок 5 – Ймовірність токсичного ураження персоналу на промисловому майданчику на момент часу  $t = 14$  с (розрахунок за концентрацією хлору)

Аналізуючи дані з табл. 1, бачимо, що в робочій зоні персонал перебуває в небезпеці при виникненні аварійної ситуації на промисловому майданчику.

На другому етапі досліджень виконувалась оцінка потенційного територіального ризику у випадку екстремальної ситуації, що призвела до горіння твердого палива на іншому промисловому майданчику хімічного заводу (рис. 6).



Рисунок 6 – Зона токсичного ураження персоналу на промисловому майданчику (Google image 2019): 1 – місце ймовірного аварійного викиду; 2 – робоча зона; 3 – промислова будівля.

На рис. 7-8 зображено матриці потенційного територіального ризику токсичного ураження на промисловому майданчику (оцінка виконана за концентрацією хлору) для різних ймовірних метеорологічних ситуацій.

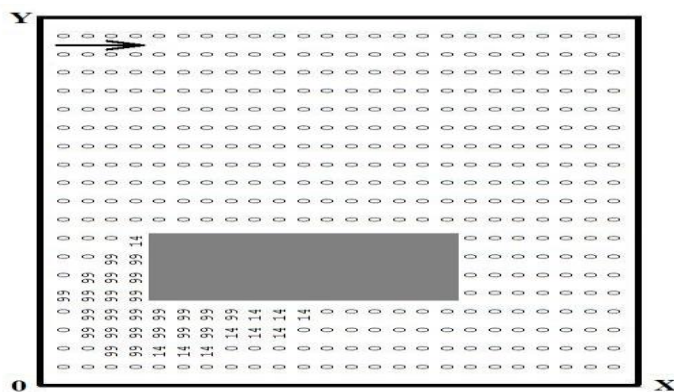


Рисунок 7 – Ймовірність токсичного ураження персоналу на промисловому майданчику на момент часу  $t=4$  с (розрахунок за концентрацією хлору)

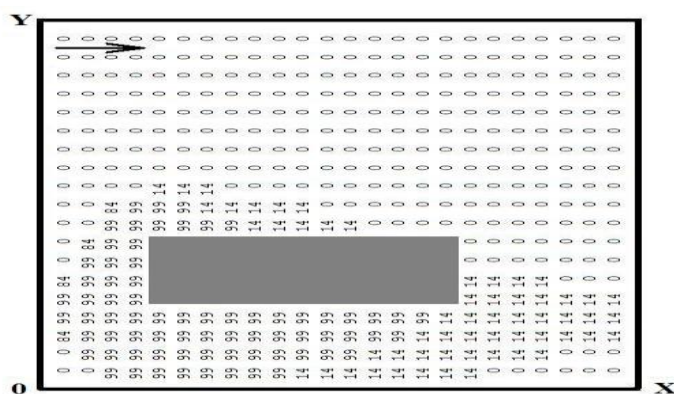


Рисунок 8 – Ймовірність токсичного ураження персоналу на промисловому майданчику на момент часу  $t=10$  с (розрахунок за концентрацією хлору)

Для оцінювання ризику токсичного ураження працівників у робочій зоні розраховувалася токсодоза (за хлором) для конкретного часу після аварії та на рівні  $z=1,7$  м (рівень органів дихання) (табл. 2).

Таблиця 2 – Ступінь ураження персоналу в робочій зоні

Час, с	Ступінь ураження
15	Ураження середньої тяжкості
17	Ураження середньої тяжкості
25	Смертельне ураження

Як ми бачимо з табл. 2, у робочій зоні існує великий ризик токсичного ураження персоналу.

Наводяться результати вирішення задачі з оцінювання потенційного ризику термічного ураження людей на промисловому майданчику хімічного заводу (рис. 8) при горінні твердого палива.





Рисунок 9 – Зона термічного ураження персоналу на промисловому майданчику Павлоградського хімічного заводу (Google image 2019): 1 – місце ймовірного аварійного горіння ракетного палива; 2 – робоча зона № 1; 3 – промислова будівля; 4 – робоча зона № 2.

На рис. 10 показана зона теплового забруднення для моменту часу  $t=32$  с.



Рисунок 10 – Зона теплового забруднення (ізотерми) біля промислової будівлі,  $t=32$  с: 1 –  $T=103$  °C; 2 –  $T=240$  °C; 3 – промислова будівля.

Для більш зрозумілої оцінки можливого ризику термічного ураження працівників на рис. 11 показано зміну температури повітря в робочій зоні № 2 після виникнення екстремальної ситуації на об'єкті.

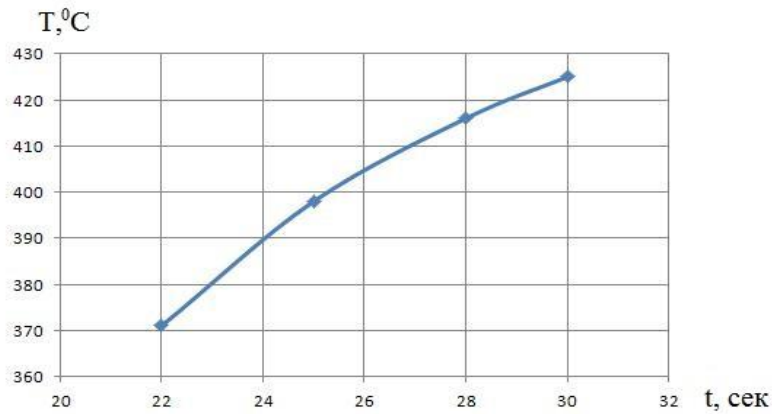


Рисунок 11 – Зміна температури повітря з часом у робочій зоні

Аналізуючи дані, представлені на рис. 11, зрозуміло, що при виникненні екстремальної ситуації на об'єкті буде мати місце тяжке термічне ураження працівників.

На рис. 12-13 зображено матриці потенційного територіального ризику термічного ураження людей на промисловому майданчику для різних моментів часу при реалізації вказаних ймовірних метеорологічних ситуацій.

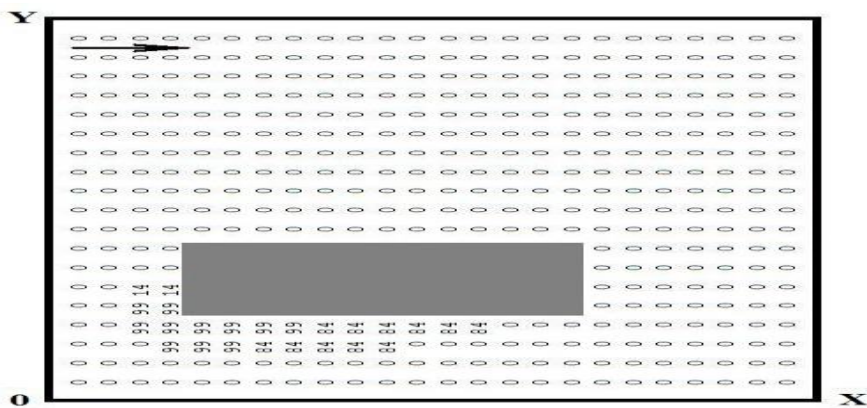


Рисунок 12 – Ймовірність термічного ураження персоналу на промисловому майданчику на момент часу  $t=12$  с

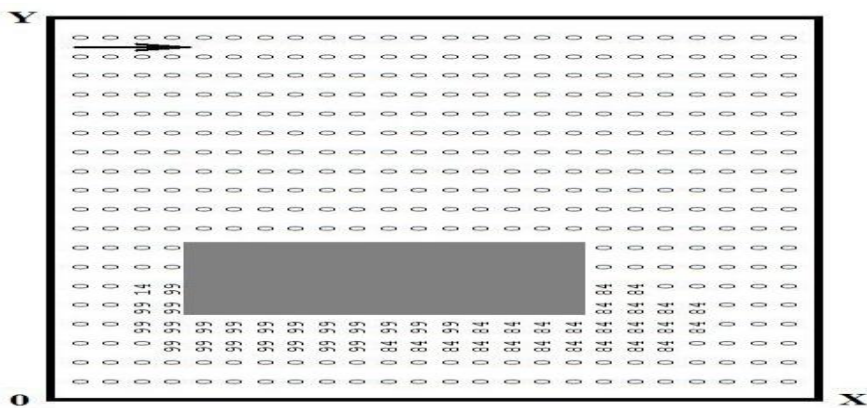


Рисунок 13 – Ймовірність термічного ураження персоналу на промисловому майданчику на момент часу  $t=24$  с

Аналіз даних, представлених на рис. 12-13, показує, що площа зони територіального ризику термічного ураження персоналу постійно змінюється з часом – вона збільшується в розмірах, тому ми говоримо про просторово-часову зміну територіального ризику термічного ураження персоналу на промисловому об'єкті. Для розглянутих метеорологічних ситуацій ризик термічного ураження персоналу дуже високий, оскільки зона термічного ураження формується дуже швидко.

Наведено результати вирішення задач із оцінювання потенційного ризику термічного ураження працівників усередині робочих приміщень при можливих екстремальних ситуаціях, що приводять до горіння твердого палива в цих приміщеннях. Наведено результати вирішення задачі з оцінювання потенційного ризику токсичного ураження працівників у разі ймовірного вилливу хлору на Аульській хлорпереливній станції.

В **четвертому розділі** на основі теорії суміжних рівнянь (теорія академіка Г. Марчука) розглядається розроблення методів наукового обґрунтування вибору місця розташування сховищ хімічно небезпечних речовин із метою мінімізації ризику токсичного ураження персоналу у разі виникнення екстремальних ситуацій на цих сховищах.

Розглядаються 2D, 3D суміжні рівняння. В двовимірному випадку суміжне рівняння має вигляд:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial C^*}{\partial t} - \frac{\partial u C^*}{\partial x} - \frac{\partial v C^*}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C^*}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C^*}{\partial y} \right) + p, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $C^*$  – функція, що пов'язана з функцією  $C$  ( $C$  – концентрація небезпечної речовини);

$p$  – спеціальна функція, що визначається, згідно з акад. Г. Марчуком, конкретною задачею.

Якщо розв'язок суміжного рівняння (4) знайдено, то далі знаходиться значення функціонала:

$$I = Q \int_0^T C^*(r_0, t) dt,$$

де  $Q$  - потужність джерела емісії небезпечної речовини;

$r_0(x_0, y_0)$  - координати точки «турботи», де концентрація небезпечної речовини не повинна перевищувати деякий рівень (наприклад, ГДК) для конкретного моменту часу.

Поле значень функціоналу використовується для вибору локації безпечного розташування хімічного об'єкту з умови, що у випадку аварійного викиду небезпечної речовини на цьому об'єкті концентрація не перевищує заданий рівень до конкретного моменту часу.

Для чисельного рішення 2D, 3D суміжних рівнянь використовуються скінченно-різницеві методи інтегрування.

Наведено результати вирішення задачі про вибір безпечного майданчика для тестування твердопаливних двигунів так, щоб у випадку аварійного вибуху двигуна не зашкодити здоров'ю людей у розташованих поблизу селищах. На рис. 14 показані ізолінії функціоналу (рівень 2 м), де цифрою «1» визначена ізолінія, яка відповідає розв'язанню задачі  $I = Q \int_0^T C^*(r_0, t) dt = 5 \text{ мг/м}^3$ . Цифра «2» вказує на оптимальне місце розташування випробувального майданчика з позиції мінімізації ризику токсичного ураження людей у селищі.

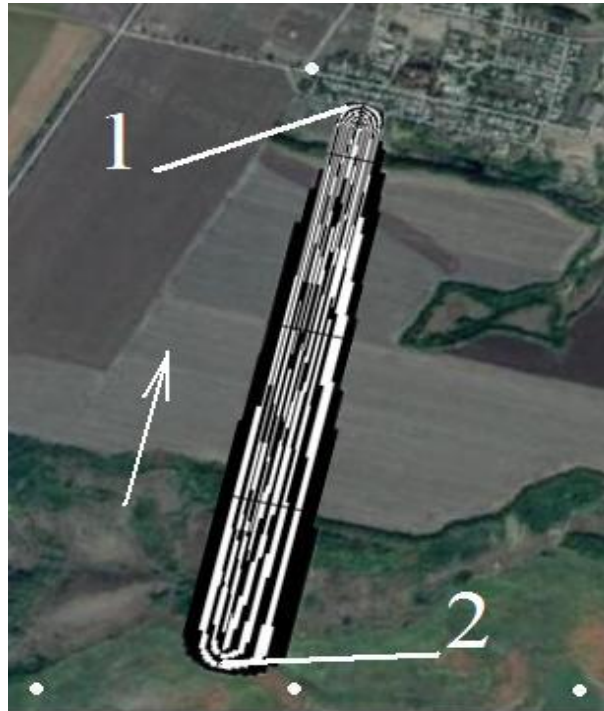


Рисунок 14 – Визначення безпечного місця розташування хімічно небезпечного об'єкта: 1 – значення функціоналу 5 мг/м<sup>3</sup>; 2 – місце безпечного розташування випробувального майданчика.

Наведено результати вирішення задачі про визначення поясу безпеки для «об'єкта турботи» у випадку можливої атаки терориста з використанням хімічного агента. Рішення цієї задачі також отримано на основі розробленої методології, що базується на теорії суміжних рівнянь.

**П'ятий розділ** присвячено проблемі оцінювання ризику токсичного ураження в робочих приміщеннях хімічно небезпечних об'єктів. Розглядаються моделі, що розроблені для оцінювання ризику токсичного ураження працівників всередині робочих приміщень для «ланцюжка» переносу небезпечної речовини при аварійній емісії токсичних речовин на промисловому майданчику (рис. 15).

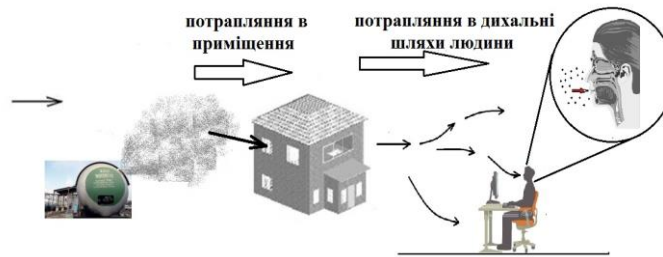


Рисунок 15 – «Ланцюжок» потрапляння хімічно небезпечної речовини в людину, яка знаходиться в робочому приміщенні

Розглядається побудова чисельної моделі для оцінювання ризику токсичного ураження працівників у робочому приміщенні при затіканні забрудненого повітря. Основу моделі створюють рівняння Нав'є-Стокса та рівняння транспорту хімічно небезпечної речовини в повітрі приміщення. Розглядаються методи чисельного моделювання рівнянь моделі та наводяться результати вирішення задачі з аварійного забруднення робочого приміщення, визначення ризику ураження працівників при ймовірній екстремальній ситуації на території хімічного заводу.

Наводиться математична модель, що побудована для оцінювання ризику токсичного ураження працівника в робочому приміщенні, коли забруднене повітря потрапляє в дихальні шляхи працівника. Тобто це розгляд задачі з оцінювання ризику ураження в суттєво іншому масштабі поширення небезпечної речовини, а саме в масштабі «санору». Відзначимо, що всі попередні задачі розглядалися в масштабі «local». Основу моделі створюють: рівняння Лапласу для потенціалу швидкості (розрахунок руху повітря в дихальних шляхах) та рівняння транспорту небезпечної речовини в дихальних шляхах робітника. Розглядається методологія вирішення моделюючих рівнянь та алгоритм вирішення задачі з визначення ризику ураження працівника. Математична модель, що побудована, враховує геометричну форму дихальних шляхів, нерівномірність швидкості руху забрудненого повітря в них, дифузії, процес «осадження» небезпечної речовини на стінках дихальних шляхів, швидкість дихання працівника, а також нестационарний процес потрапляння небезпечної речовини в дихальні шляхи.

Наведено математичну модель, що розроблена для оцінювання ефективності «повітряного душу», або «Rain-System». Ця система використовується для швидкого зниження концентрації небезпечної речовини в робочому приміщенні у випадку її раптового викиду. При проектуванні цієї системи захисту працівників потрібно заздалегідь визначити, як буде зменшуватися концентрація небезпечної речовини для конкретних умов (розміри робочого приміщення, розташування в ньому обладнання, положення робочої зони тощо). Для цього необхідно мати багатofакторні математичні моделі. З цією метою розроблено спеціалізовану математичну модель. Приведено результати вирішення прикладної задачі на базі побудованої моделі.

На рис. 16 показано, як швидко зменшується концентрація небезпечної речовини в робочій зоні при використанні «Rain-System».

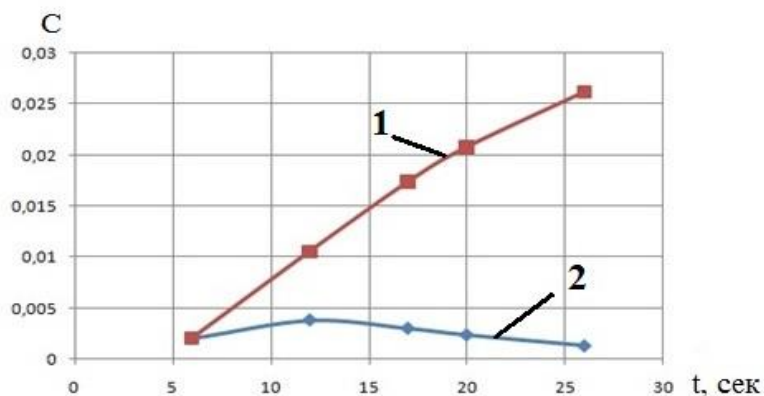


Рисунок 16 – Зміна концентрації (безрозмірне значення) в робочій зоні: 1 – немає Rain-System; 2 – є Rain-System.

З рис. 16 можна бачити, що концентрація небезпечної речовини в робочій зоні, до моменту часу 25 с після аварії, практично в 12 разів менше, ніж за відсутності повітряного душу.

В шостому розділі розглядаються питання зниження концентрації хімічно небезпечних речовин у робочих зонах шляхом створення систем локального захисту повітря на території підприємства. Відомо, що зниження ризику токсичного ураження людей на підприємствах при викидах небезпечних речовин значною мірою пов'язане зі зниженням інтенсивності уражуючого чинника, тобто концентрацією цих речовин. Таким чином, зниження інтенсивності уражуючого чинника є надзвичайно важливою задачею для розроблення стратегії захисту людей на підприємствах при викидах хімічно небезпечних речовин.

Розглядається захист від забруднення повітря в робочих зонах, що розташовані біля промислових будівель, при викиді забрудненого повітря з системи вентиляції через низьку трубу. Як відомо, такий викид може призвести до значного забруднення повітря в робочих зонах біля промислової будівлі. Особливо це небезпечно, коли всередині промислової будівлі був аварійний витік хімічного агента в значній кількості, наприклад, при виході з ладу технологічного обладнання в цеху, та в систему вентиляції потрапила значна кількість цього агента. Для цієї ситуації, з метою захисту від забруднення повітря в робочих зонах, що розташовані біля промислових будівель, пропонується використання на даху будівлі спеціальних екранів (вертикальних, горизонтальних та екранів із ухилом). Представлено математичну модель, що розроблена для оцінювання ефективності використання запропонованих захисних екранів. Розроблена модель дозволяє в режимі реального часу науково обґрунтовано оцінити вплив екранів, розташованих на даху будівлі, на локальне зменшення рівня забруднення повітря на промисловому майданчику. Наведено дані проведених досліджень на базі побудованої моделі.

Розглядається питання захисту від забруднення повітря в робочих зонах, що розташовані біля промислових будівель, шляхом використання повітряної завіси. Наведено дані фізичного експерименту, що був проведений при виконанні досліджень, та розглядається 3D CFD, що була розроблена для оцінювання ефективності використання повітряної завіси для зниження рівня хімічного забруднення робочих зон. Наведено дані обчислювального експерименту з дослідження динаміки зміни концентрації хімічно небезпечної речовини в робочій зоні при використанні завіси.

В **сьомому розділі** надається опис розробленої комп'ютерно-інформаційної системи аналізу та прогнозування територіального ризику при екстремальних ситуаціях на хімічно небезпечних об'єктах. Висвітлюється перелік проблемних задач, які пов'язані з формуванням на промислових майданчиках уражуючих факторів, що призводять до токсичного або термічного ураження людей, та можуть бути вирішені за допомогою розробленої комп'ютерно-інформаційної системи (рис. 17). Наведено функціональні можливості низки розроблених комп'ютерних пакетів програм для вирішення цих прикладних задач.

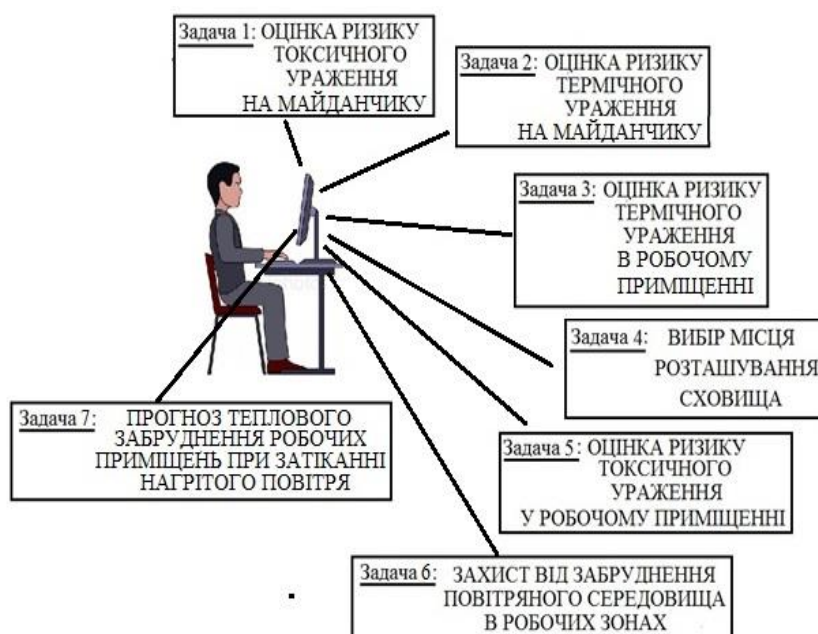


Рисунок 17 – Задачі, які розв'язує комп'ютерно-інформаційна система

Наведено результати верифікації розроблених чисельних моделей. Верифікація здійснена шляхом порівняння результатів, що отримані на основі побудованих моделей, з даними експерименту, а також шляхом вирішення відомих тестових задач, а також порівнянням отриманих розрахункових даних із даними інших дослідників.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, в якій вирішена важлива науково-прикладна проблема створення методології оцінювання

потенційного територіального ризику у випадку виникнення екстремальних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах. Наукові результати дисертаційних досліджень полягають у такому:

1. На основі системного аналізу наукових праць встановлено, що на сьогодні в Україні та світі існує певний дефіцит методів визначення ризиків при екстремальних ситуаціях на хімічно небезпечних об'єктах, що потребує розроблення нових методологій щодо оцінювання ризику для декларування промислової безпеки об'єктів.

2. Розроблено методи 2D та 3D просторово-часового оцінювання потенційного територіального ризику токсичного ураження при аварійних викидах небезпечних речовин на промислових майданчиках, які дозволяють враховувати наявність будівель, хімічну трансформацію небезпечних речовин у повітрі, ймовірність різних погодних умов. Ці методи можуть бути використані для оцінювання потенційного територіального ризику токсичного ураження незалежно від типу хімічно небезпечного об'єкта.

3. Побудовано балансову модель для оцінювання потенційного територіального ризику токсичного ураження людей на хімічно небезпечних об'єктах при аварійних викидах небезпечних речовин, яка дозволяє враховувати ймовірність різних погодних умов, хімічну трансформацію небезпечних речовин у повітрі, їх сухе осадження та вимивання.

4. Розроблено методи просторово-часового оцінювання територіального ризику термічного ураження при аварійних ситуаціях на хімічно небезпечних об'єктах, які дозволяють враховувати наявність будівель, різного роду перешкод, ймовірність різних погодних умов, ймовірне місце займання.

5. Розроблено нові методи експрес-оцінювання безпечного місця розташування сховищ хімічно небезпечних речовин. Ці методи дозволяють оперативно визначати пояс безпеки для важливих об'єктів при терористичних актах із використанням хімічних агентів.

6. Розроблено 3D-методи для обґрунтування безпечного місця розташування сховищ хімічно небезпечних речовин, які враховують вплив будівель, метеорологічних умов, хімічної трансформації небезпечних речовин. Ці методи також дозволяють визначати пояс безпеки для важливих об'єктів при терористичних актах із використанням хімічних агентів.

7. Виконано експериментальні дослідження з визначення ефективності використання повітряної завіси біля промислової будівлі для зниження ризику токсичного ураження персоналу на промисловому майданчику; запропоновано новий метод розрахунку ефективності.

8. Виконано дослідження ефективності використання екрана на промисловій будівлі для локального зниження ризику токсичного ураження персоналу на промисловому майданчику; запропоновано метод розрахунку ефективності.

9. Розроблено метод розрахунку ефективності використання повітряного душу в робочому приміщенні, який застосовується для зниження ризику токсичного ураження людей у приміщенні.



10. Розроблено метод розрахунку процесу осадження небезпечних речовин у дихальних шляхах працівника при вдиханні забрудненого повітря.

11. На основі розроблених методів створено інформаційну систему аналізу та прогнозування потенційного територіального ризику ураження людей при екстремальних ситуаціях на хімічно небезпечних об'єктах.

12. Розроблені моделі й пакети прикладних програм використовуються Державною службою з надзвичайних ситуацій України та в навчальному процесі Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації*

1. Біляєв М. М., Берлов О. В., Гунько О. Ю., Калашніков І. В., Козачина В. А. Експертна оцінка наслідків терактів. *Енергетика, екологія, безпека життєдіяльності та комп'ютерні технології у будівництві* : колективна монографія / ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»; під загальною редакцією М. В. Савицького. Дніпро, 2018. С. 29–33. ISBN 978-966-323-184-6

2. Беляєв Н. Н., Калашников И. В. Оценка территориального риска при эмиссии химически опасного вещества в случае теракта. *Вісник Дніпровського університету. Серія: Механіка*. 2017. Т. 25, № 5. Вип. 21. С.89–95.

3. Беляєв Н. Н., Козачина В. А., Калашников И. В. Экспресс-оценка территориального риска при выбросе химического агента в случае теракта. *Науковий вісник будівництва*. Харків : Харківський національний університет будівництва та архітектури, 2017. № 3 (89). С. 128–132.

4. Беляєв Н. Н., Калашников И. В., Мартыненко И. А. Численная модель для оценки территориального риска при эмиссии химического агента в случае экстремальной ситуации. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. Дніпро : Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», 2017. № 52. С. 329–334.

5. Беляєв Н. Н., Калашников И. В., Шаранова Ю. Г., Стрельцова Ю. М. Теракт с применением химического агента: расчёт зон поражения. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серія: Компьютерные системы и информационные технологии в образовании, науке и управлении*. Днепр : ГВУЗ «ПГАСА», 2017. Вып. 101. С. 48–53.

6. Беляєв Н. Н., Калашников И. В., Козачина В. А. Расчет территориального риска при теракте: экспресс модель. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Дніпро : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2018. Вип. 1 (73). С. 7–14. (Журнал входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus)

7. Беляєв Н. Н., Калашников И. В., Клименко И. В., Козачина В. А. 3D численная модель для оценки территориального риска при теракте. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Дніпро : Дніпропетр.

нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2018. Вип. 3 (75). С. 20–26. (*Журнал входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus*)

8. Беляев Н. Н., Калашников И. В., Козачина В. А. Определение границ пояса безопасности при терактах с применением химических агентов. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Дніпро : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2018. Вип. 4 (76). С. 7–14. (*Журнал входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus*)

9. Biliaiev M. M., Berlov O. V., Kalashnikov I. V., Kozachyna V. A. Calculation of «vulnerability» zone in case of terrorist attack with chemical agents. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Дніпро : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2018. Вип. 5 (77). С. 19–27. (*Журнал входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus*)

10. Biliaiev M. M., Berlov O. V., Kalashnikov I. V., Kozachyna V. A. Anti-terror engineering in the case of possible terrorist attacks with chemical agents. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Дніпро : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2018. Вип. 6 (78). С. 28–36. (*Журнал входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus*)

11. Беляев Н. Н., Калашников И. В., Гунько Е. Ю., Савина О. П. 3D модель для оценки территориального риска. *Вісник Дніпровського університету. Серія: Механіка*. 2018. Т. 26, № 5. Вип. 22. С. 90–95.

12. Беляев Н. Н., Берлов А. В., Калашников И. В., Козачина В. А. Численное моделирование в задачах оценки риска при эмиссии опасных веществ в атмосферу. *Науковий вісник будівництва*. Харків : Харківський національний університет будівництва та архітектури, 2018. № 4 (94). С. 206–211.

13. Беляев Н. Н., Калашников И. В., Берлов А. В. CFD модель для оценки территориального риска и уровня загрязнения воздушной среды при эмиссии химического агента. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. Дніпро : Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 2018. № 53. С. 244–250.

14. Беляев Н. Н., Калашников И. В., Берлов А. В. 3D CFD модель оценки территориального риска в условиях застройки. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. Дніпро : Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 2018. № 54. С. 322–330.

15. Беляев Н. Н., Калашников И. В., Машихина П. Б. Численная модель для решения сопряженных задач в проблеме загрязнения атмосферного воздуха. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. Дніпро : Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 2018. № 55. С. 318–325.

16. Беляев Н. Н., Калашников И. В., Беляева В. В., Берлов А. В. Локальная защита атмосферы от загрязнения. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. Дніпро : Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 2018. № 56. С. 223–231.

17. Беляев Н. Н., Калашников И. В., Козачина В. А., Берлов А. В., Чередниченко Л. А. Оценка техногенного риска при выбросе в атмосферу опасных веществ. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Безопасность жизнедеятельности*. Днепр : ГВУЗ «ПГАСА», 2018. Вып. 105. С.180–186.

18. Беляев Н. Н., Шинкаренко В. И., Габринец В. А., Калашников И. В., Берлов А. В. Моделирование загрязнения атмосферы и оценка территориального риска при эмиссии опасных веществ. *Геотехнічна механіка*. Дніпро : Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України, 2018. Вип. 140. С. 158–165.

19. Biliaiev M. M., Rusakova T. I., Kalashnikov I. V., Bondarenko I. O., Gunko E. Y. Numerical modeling of air pollution from dumps. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Дніпро : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2019. Вип. 4 (82). С. 7–17. Режим доступу: doi: <https://doi.org/10.15802/stp2019/178855> (*Журнал входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus*)

20. Калашников И. В., Габринец В. А., Горячкин В. Н. Комплекс программ для оценки уровня загрязнения воздушной среды. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Дніпро : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2019. Вип. 2 (80). С. 41–48. (*Журнал входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus*)

21. Беляев Н. Н., Калашников И. В., Шинкаренко В. И., Горячкин В. Н. Защита атмосферы от загрязнения при экстремальных ситуациях на химически опасных объектах. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Дніпро : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2019. Вип. 3 (81). С. 7–15. Режим доступу: doi: <https://doi.org/10.15802/stp2019/170017> (*Журнал входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus*)

22. Біляєв М. М., Берлов О. В., Калашніков І. В., Біляєва В. В. Моделирование затекания токсичного газа в помещения. *Науковий вісник будівництва*. Харків : Харківський національний університет будівництва та архітектури, 2019. № 1 (95). С. 227–233.

23. Беляев Н. Н., Калашников И. В., Козачина В. А., Берлов А. В. Математические и дискретные модели в задачах аварийного загрязнения атмосферного воздуха. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. Дніпро : Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 2019. № 57. С. 149–157.

24. Biliaiev M. M., Berlov O. V., Kozachyna V. A., Kalashnikov I. V., Shevchenko O. V. Risk assessment of thermal damage to people at industrial sites in case of emergency of burning solid propellant. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Дніпро : Дніпров. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2020. Вип. 1 (85). С. 7–16. (Журнал входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus)

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

25. Беляев Н. Н., Берлов А. В., Калашников И. В., Мищенко А. Ю., Лукьяненко Е. В. Математическое моделирование загрязнения атмосферного воздуха. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2018): матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції* (м. Дніпро, 1-2 листопада 2018 р.). Дніпро : Баланс-клуб, 2018. С. 36.

26. Беляев Н. Н., Калашников И. В., Грабар Я. А., Мищенко А. Ю. Оценка техногенного риска при чрезвычайных ситуациях на базе численных моделей. *Материалы Международной научно-технической конференции «Информационные технологии в металлургии и машиностроении»* (м. Дніпро, 27-29 березня 2018 р.). Дніпро : НМетАУ, 2018. С. 47.

27. Беляев Н. Н., Саливончик Д. П., Калашников И. В. Информационная система «RISK-2AIR» для оценки техногенного риска при чрезвычайных ситуациях на транспорте. *Тезисы XI Международной научно-практической конференции «Современные информационные и коммуникационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании»* (г. Днепр, 13-14 декабря 2017 г.). Днепр : ДИИТ, 2017. С. 91.

28. Беляев Н. Н., Гырало А. В., Калашников И. В. Перевозка опасных грузов: моделирование последствий аварийных ситуаций. *Тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств»* (м. Дніпро, 29-30 листопада 2017 р.). Дніпро : ДНУЗТ, 2017. С. 17–18.

29. Беляев Н. Н., Римек Я. Е., Калашников И. В. Численные модели в задачах прогноза уровня загрязнения атмосферного воздуха при экстремальных ситуациях. *Матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»* (м. Черкаси, 20-21 жовтня 2017 р.). Черкаси, 2017. С. 110.

30. Беляев Н. Н., Римек Я. Е., Калашников И. В. Компьютерно-информационная система «Risk Assesment» для оценки территориального риска в случае экстремальных ситуаций при транспортировке химически опасных грузов. *Матеріали I-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інноваційні та інформаційні технології в перевезенні небезпечних вантажів»* (м. Харків, 16-17 листопада 2017 р.). Харків : УкрДУЗТ, 2017. С. 36–37.

31. Беляев Н. Н., Мотузко Д. А., Горбович А. С., Калашников И. В. Оценка уровня загрязнения окружающей среды при экстремальных ситуациях. Компьютерное моделирование. *Материалы 77-й Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития*

*железнодорожного транспорта»* (г. Днепр, 11-12 мая 2017 г.). Днепр : ДНУЗТ, 2017. С. 268–269.

32. Беляев Н. Н., Калашников И. В., Гончарова Д. П., Дацко Е. В. Моделирование последствий аварийного загрязнения окружающей среды. *Тезисы докладов Международного научного симпозиума «Неделя эколога-2017»* (г. Каменское, 10-13 апреля 2017 г.). Каменское : ДГТУ, 2017. С. 8–9.

33. Беляев Н. Н., Калашников И. В. Математическое моделирование последствий аварий на транспорте. *Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції «Теоретичні та практичні аспекти розвитку науки»* (м. Київ, 29-30 листопада 2016 р.). Київ, 2016. С. 14–15.

34. Беляев Н. Н., Гунько Е. Ю., Калашников И. В., Машихина П. Б. Проблемы защиты окружающей среды при эксплуатации железнодорожного транспорта. *Тезисы докладов 76-й Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта»* (г. Днепропетровск, 19-20 мая 2016 г.). Днепропетровск : ДИИТ, 2016. С. 254.

35. Біляєв М. М., Долина Л. Ф., Калашніков І. В., Росточило Н. В. Оцінка ефективності різноманітних методів захисту навколишнього середовища при аваріях. *Тезиси докладов 75-й Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта»* (г. Днепропетровск, 14-15 мая 2015 г.). Днепропетровск : ДИИТ, 2015. С. 314–315.

36. Беляев Н. Н., Хичак И. С., Юдин А. И., Соколовская Е. В., Берлов А. В., Калашников И. В. Моделирование нестационарных процессов загрязнения воздушной среды. *Тези за матеріалами VIII Всеукраїнського наукового семінару «Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур»* (м. Харків, 9-10 жовтня 2018 р.). Харків : ХНУБА, 2018. С. 9–10.

37. Беляев Н. Н., Тютюнник А. А., Калашников И. В., Якубовская З. Н. Информационная система анализа и оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха при аварийных ситуациях на железнодорожном транспорте. *Матеріали 12-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті»* (м. Дніпро, 12-13 грудня 2018 р.). Дніпро : ДНУЗТ, 2018. С. 130.

38. Беляев Н. Н., Калашников И. В., Якубовская З. Н., Белов В. В., Гурская А. С. Численное моделирование аварийного загрязнения атмосферного воздуха. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно небезпечних об'єктах»* (м. Харків, 1-2 листопада 2018 р.). Харків, 2018. С. 132–134.

39. Амелина Л. В., Берлов А. В., Калашников И. В. Прогнозирование аварийного загрязнения атмосферного воздуха. *Тези IX міжнародної наукової конференції «Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель та споруд»* (м. Харків, 15-16 жовтня 2019 р.). Харків : ХНУБА, 2019. С. 19–20.

40. Берлов О. В., Калашніков І. В., Кіріченко П. С., Козачина В. А., Русакова Т. І. Прогнозування рівня забруднення атмосфери на базі

чисельної моделі. *Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference. International Trends in Science and Technology* (Warsaw, April 30, 2019). Warsaw : RS Global Sp. z O.O., 2019. Vol.1. P. 41–45.

41. Біляєв М. М., Берлов О. В., Калашніков І. В., Козачина В. А., Татарко Л. Г. Оцінка територіального ризику у випадку аварійного викиду хімічно небезпечної речовини. *Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference. International Trends in Science and Technology* (Warsaw, July 31, 2019), Warsaw : RS Global Sp. z O.O., 2019. Vol.1. P. 43–49.

***Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації***

42. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Калашніков І. В. Математичне моделювання затікання токсичного газу у приміщення при аварії на промисловому майданчику. *Математичне моделювання*. Кам'янське : Дніпровський державний технічний університет, 2018. № 2 (39). С. 95–101.

43. Biliaiev M., Biliaieva V., Kozachyna V., Berlov O., Kalashnikov I. Numerical simulation of toxic chemical transport after accidental release at chemical plant. *Romanian Journal of Information Science and Technology*. 2020. Vol. 23, Number S. Pp. S3-S13, 2020. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus)

44. Voloshyn O., Biliaiev M., Biliaieva V., Kozachyna V., Berlov O., Rusakova T., Kalashnikov I. Numerical model to simulate ventilation of dead-end mine working with brattice. *E3S Web of Conference*, 168, 00066 (2020), *RMGET*, 2020. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus)

45. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Козачина В. А., Калашніков І. В. Аварійне горіння твердого ракетного палива: оцінка ризику ураження людей в робочому приміщенні. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Дніпро : Дніпров. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2020. Вип. 3 (87). С. 22–29. (Журнал входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus)

## АНОТАЦІЯ

Калашніков І. В. Науково-методологічний інструментарій оцінки територіального ризику на хімічно небезпечних об'єктах. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.26.01 – охорона праці. – Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України, 2020.

Дисертацію присвячено розробленню ефективних методів оцінювання потенційного територіального ризику токсичного та термічного ураження працівників у випадку виникнення екстремальних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах.

Розроблено методологію оцінювання потенційного територіального ризику при виникненні екстремальних ситуацій на потенційно небезпечних об'єктах. Уперше запропоновано методи просторово-часового оцінювання потенційного територіального ризику токсичного ураження людей при

аварійних викидах токсичних речовин на потенційно небезпечних об'єктах, які враховують наявність будівель, хімічну трансформацію небезпечних речовин у повітрі, ймовірність різних погодних умов. Набули подальшого розвитку методи оцінювання безпечного місця розташування сховищ хімічно небезпечних речовин, що також дозволяють оперативно визначати пояс безпеки для важливих об'єктів при терористичних актах із використанням хімічних агентів.

Для оцінювання ризику токсичного ураження працівників у робочому приміщенні у разі аварійного витoku хімічно небезпечних речовин розроблено метод розрахунку руху небезпечних речовин у дихальних шляхах працівника при вдиханні ним забрудненого повітря. Отримані в дисертаційній роботі результати, розроблені методи й пакети програм використовуються в Державній службі з надзвичайних ситуацій України та в навчальному процесі Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Ключові слова: охорона праці, територіальний ризик, потенційно небезпечний об'єкт, токсичне ураження працівників, термічне ураження працівників, чисельні методи, захист робочих зон від хімічного забруднення, повітряна завіса, повітряний душ у робочому приміщенні, захисні екрани.

### АННОТАЦИЯ

Калашников И. В. Научно-методологический инструментарий оценки территориального риска на химически опасных объектах. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.26.01 – охрана труда. – Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна Министерства образования и науки Украины, 2020.

Диссертация посвящена разработке эффективных методов оценки потенциального территориального риска токсического и термического поражения работников в случае возникновения экстремальных ситуаций на химически опасных объектах.

Разработана методология оценки потенциального территориального риска при возникновении экстремальных ситуаций на потенциально опасных объектах. Впервые предложены методы пространственно-временной оценки потенциального территориального риска токсического поражения людей при аварийных выбросах токсичных веществ на потенциально опасных объектах, учитывающие наличие зданий, химическую трансформацию опасных веществ в воздухе, вероятность различных погодных условий. Для экспресс-оценки потенциального территориального риска при аварийных выбросах опасных веществ разработана балансовая модель, которая позволяет учитывать вероятность различных погодных условий, химическую трансформацию опасных веществ в воздухе, их сухое осаждение и вымывание осадками, тип выброса химически опасного вещества. С целью определения потенциального территориального риска термического поражения персонала при

возникновении экстремальных ситуаций разработаны методы пространственно-временной оценки территориального риска, учитывающие наличие зданий, вероятность различных погодных условий, вероятность места возгорания. Получили дальнейшее развитие методы оценки безопасного места расположения хранилищ химически опасных веществ, которые также позволяют оперативно определять пояс безопасности для важных объектов при террористических актах с использованием химических агентов.

Для оценки риска токсического поражения работников в рабочем помещении в случае аварийной утечки химически опасных веществ разработан метод расчета движения опасных веществ в дыхательных путях работника при вдыхании им загрязненного воздуха.

Научно обоснована эффективность использования экранов на промышленных зданиях для локального снижения риска токсического поражения персонала на промышленной площадке. Разработана математическая модель для оценки эффективности использования такого защитного средства. Экспериментальным и теоретическим путем показана возможность использования воздушной завесы у промышленного здания для снижения риска токсического поражения персонала на промышленной площадке. Для теоретической оценки эффективности этого метода защиты разработана многофакторная математическая модель.

Разработан метод оценки эффективности использования воздушного душа в промышленном помещении для снижения риска токсического поражения персонала в нем при возникновении экстремальной ситуации.

На базе разработанных методов созданы компьютерные программы, которые являются основой построенной информационной системы анализа и прогноза потенциального территориального риска на химически опасных объектах или объектах повышенной опасности. Использование разработанной информационной системы анализа и прогноза территориального риска при экстремальных ситуациях на предприятиях позволяет оценивать риск с учетом важных факторов, которые ранее не учитывались, а именно: наличия зданий на территории предприятия, нестационарности выброса опасных веществ, химической трансформации веществ в воздухе.

Ключевые слова: охрана труда, территориальный риск, потенциально опасный объект, токсическое поражение работников, термическое поражение работников, численные методы, защита рабочих зон от химического загрязнения, воздушная завеса, воздушный душ в рабочем помещении, защитные экраны.

## **SUMMARY**

Kalashnikov I. V. Scientific and methodological tools for assessing territorial risk at chemically hazardous sites. – On the rights of the manuscript.

Thesis for the scientific degree of doctor of technical sciences in specialty 05.26.01 – labour protection. – Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan of the Ministry of Education and Science of Ukraine, 2020.



The dissertation is devoted to the development of effective methods for assessing the potential territorial risk of toxic and thermal damage to workers in case of emergencies at chemically hazardous sites.

A methodology for assessing potential territorial risk in the event of extreme situations at potentially dangerous sites has been developed. For the first time, methods of spatial-temporal assessment of the potential territorial risk of toxic damage to humans in case of accidental emissions of toxic substances at potentially dangerous objects are proposed, which take into account the presence of buildings, chemical transformation of dangerous substances in the air. Methods for assessing the safe location of storages of chemically hazardous substances have been further developed, which also allow to quickly determine the safety zone for important objects in terrorist acts with the use of chemical agents.

To assess the risk of toxic damage to workers in the workplace in the event of an emergency leak of chemically hazardous substances, a method has been developed to calculate the movement of hazardous substances in the respiratory tract of the employee when he inhales polluted air. The results obtained in the dissertation, developed methods and software packages are used in the State Emergency Service of Ukraine and in the educational process of the Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan.

Key words: labour protection, territorial risk, potentially dangerous object, toxic damage to workers, thermal damage to workers, numerical methods, protection of work areas from chemical pollution, air curtain, air shower in the workplace, protective screens.