


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

На правах рукопису



БЕРЛОВ ОЛЕКСАНДР ВІКТОРОВИЧ

УДК 658.345: 504.5(477.63)(043.5)

**ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ
НА ОБ'ЄКТАХ ПАВЛОГРАДСЬКОГО ХІМІЧНОГО ЗАВОДУ
ПРИ ВИНИКНЕННІ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ СИТУАЦІЙ**

05.26.01 – охорона праці

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук



Науковий керівник:
Біляєв Микола Миколайович
доктор технічних наук, професор

Дніпро – 2017

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ОЦІНЦІ НЕБЕЗПЕКИ НА РОБОЧИХ МІСЦЯХ З УРАХУВАННЯМ РОЗСІЮВАННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН НА ПОТЕНЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТАХ	12
1.1 Опис об'єкта дослідження	12
1.2 Сучасні методи оцінки промислової безпеки при емісії небезпечних речовин в робочій зоні і прилеглих територій	19
1.3 Обґрунтування обраного наукового напрямку	31
Висновки до розділу 1	33
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ ПРИ ВИНИКНЕННІ ГОРІННЯ ТРП	34
2.1 Моделювання екстремальної ситуації при горінні ТРП	35
2.2 Моделювання інфільтрації забрудненого атмосферного повітря в робочу зону промислових корпусів	42
2.3 Моделювання аеродинаміки вітрового потоку при екстремальній ситуації поблизу об'єкта надзвичайної ситуації	44
Висновки до розділу 2	45
РОЗДІЛ 3 ПОБУДОВА ЧИСЕЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗУ ТА ОЦІНКИ НАСЛІДКІВ ПРИ ВИНИКНЕННІ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ СИТУАЦІЙ НА ОБ'ЄКТАХ ПО ЗБЕРІГАННЮ ТА ПЕРЕРОБЦІ ТРП	47
3.1 Чисельне розв'язання тривимірного рівняння розсіювання небезпечної речовини в повітрі робочої зони і на прилеглий до об'єкту території	47
3.2 Чисельне розв'язання двовимірного рівняння розсіювання небезпечної речовини в повітрі робочої зони і на прилеглий до об'єкту території	50

3.3 Чисельне розв'язання аеродинамічної задачі	53
3.4 Розробка пакетів програм для прогнозу і оцінки наслідків при виникненні екстремальних ситуацій, пов'язаних з горінням ТРП	59
3.5 Тестування чисельних моделей	67
Висновки до розділу 3	79
РОЗДІЛ 4 ПРОГНОЗ І ОЦІНКА НАСЛІДКІВ ГОРІННЯ ТРП НА ТЕРИТОРІЇ ПРОМИСЛОВОГО ОБ'ЄКТА АБО ПРИ ЙОГО ТРАНСПОРТУВАННІ	80
4.1 Прогноз і оцінка забруднення території об'єкта в масштабі «microscale» при горінні ТРП в сховищі	80
4.2 Оцінка наслідків екстремальної ситуації в сховищі ТРП на забруднення робочих зон на території ПХЗ	92
4.3 Оцінка промислової безпеки при екстремальній ситуації на етапі транспортування ТРП	99
Висновки до розділу 4	102
РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА ЗАХОДІВ СПРЯМОВАНИХ НА ЗНИЖЕННЯ НЕБЕЗПЕКИ ПРИ ВИНИКНЕННІ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ СИТУАЦІЙ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ ТРП	104
5.1 Оцінка ефективності застосування нейтралізатора для захисту повітря робочих зон і прилеглої території від забруднення при емісії продуктів горіння ТРП біля сховища	105
5.2 Оцінка ефективності процесу нейтралізації при русі поїзда з палаючим ТРП	114
5.3 Оцінка ефективності застосування нейтралізатора при загорянні ТРП в сховищі	125
5.4 Оцінка вразливості ТРП в залізничному вагоні до зовнішнього ініційованого впливу	129
Висновки до розділу 5	134
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВОКИ	136
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	138

	4
ДОДАТКИ	158
Додаток А Акт впровадження результатів дисертаційної роботи	159
Додаток Б Акт впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес	160
Додаток В Акт впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес	161
Додаток Д Приклад програм (кодів)	162

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ДСНС	Державна служба з надзвичайних ситуацій
МБР	міжконтинентальна балістична ракета
ПЛАС	план ліквідації аварійної ситуації
ПХЗ	Павлоградський хімічний завод
РД	ракетний двигун
РДТП	ракетний двигун твердого палива
ТРП	тверде ракетне паливо
CFD	Computational Fluid Dynamics models
CWE	Computational Wind Engineering

ВСТУП

Актуальність теми. Павлоградський хімічний завод (ПХЗ) є одним з найбільших хімічно небезпечних об'єктів. На території ПХЗ виробляється і зберігається сучасне тверде ракетне паливо (ТРП), а також ТРП міжконтинентальної балістичної ракети РС-22. Транспортування ТРП здійснюється як по території підприємства, так і за його межами. У разі виникнення екстремальних ситуацій, що призводить до займання ТРП в сховищі, або на етапі перевезення виникає інтенсивна емісія хімічно небезпечних речовин в повітря і виникає ризик ураження людей на території промислового об'єкта. В першу чергу в область ураження потраплять працівники робочої зони, а також працівники, що знаходяться на прилеглий території інших виробничих корпусів і в тому числі охорона, монтери колії, машиністи, помічники машиністів, служба штучних споруд і т.д. Тому, однією із важливих задач є оцінка наслідків екстремальної ситуації на об'єкті та підвищення безпеки при її виникненні. Ці важливі задачі вирішуються при розробці ПЛАСа (план ліквідації аварійної ситуації). Розробка ПЛАСа необхідна для дотримання та виконання Закону України «Про об'єкти підвищеної небезпеки».

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась в рамках наукової роботи Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (ДІТ) «Моделювання нестационарних процесів забруднення повітряного та водного середовища при техногенних аваріях і організованих викидів забруднюючих речовин» (№ ДР 0112U 002069), «Моделювання процесів забруднення навколишнього середовища при надзвичайних ситуаціях та організованих викидах забруднюючих речовин» (№ ДР 0115U 007226), «Захист навколишнього середовища на об'єктах транспортної інфраструктури» (№ ДР 0115U 007227), «Захист інфраструктури при терористичних актах» (№ ДР 0115U 007228), офіційного

запиту на кафедру «Гідравліка та водопостачання» ДПТУ від МНС України в Дніпропетровській області (лист № 5688/16 від 05.12.2007) з проханням оцінити рівень промислової безпеки при загорянні ТРП на Павлоградському хімічному заводі, в рамках договору №07/2014-У від 03.11.2014 про науково-технічне співробітництво між ДПТОМ і Головним управлінням Державної служби з надзвичайних ситуацій в Дніпропетровській області.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є забезпечення безпеки в робочій зоні на об'єктах зберігання і утилізації твердого ракетного палива з урахуванням моделювання екстремальних ситуацій і прийняття заходів щодо їх зниження.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

– провести аналіз сучасного стану питання в області розробки методів оцінки забруднення повітря робочої зони при емісії токсичних речовин на хімічно небезпечних об'єктах;

– провести моделювання процесів розсіювання небезпечних речовин в робочій зоні і на території підприємства ПХЗ при виникненні екстремальних ситуацій, пов'язаних з викидом продуктів горіння ТРП;

– провести побудову чисельних моделей прогнозу і оцінки наслідків при виникненні екстремальних ситуацій в робочій зоні і на прилеглий території, пов'язаних зі зберіганням, утилізацією та транспортуванням ТРП;

– створити програмне забезпечення (коди) для проведення обчислювального експерименту з оцінки безпеки за допомогою розроблених методів прогнозу;

– виконати оцінку наслідків загоряння ТРП на території ПХЗ в разі екстремальних ситуацій, а також провести обчислювальний експеримент по оцінці ефективності захисту персоналу у разі екстремальної ситуації в сховищі ТРП і при його транспортуванні;

– розробити заходи щодо зниження небезпеки від забруднення продуктами горіння ТРП в робочій зоні і на прилеглій території при екстремальній ситуації на території потенційно небезпечного об'єкта.

Об'єкт дослідження – процеси поширення небезпечних речовин в робочій зоні і на території хімічно небезпечного об'єкта в разі виникнення екстремальних ситуацій в пунктах зберігання і утилізації твердого ракетного палива.

Предмет дослідження – методи прогнозу і оцінки наслідків екстремальних ситуацій на об'єктах по зберіганню і утилізації твердого ракетного палива та розробки захисних заходів щодо зниження негативного впливу.

Методи дослідження. Постановка задач дослідження здійснена методами системного аналізу на основі наукових джерел. Рішення поставлених задач отримано з використанням методів чисельного моделювання. Достовірність теоретичних результатів перевірена шляхом зіставлення їх з даними експериментальних досліджень, а також верифікацією на прикладі рішення відомих тестових задач.

Наукова новизна.

– розроблено комплекс чисельних моделей класу «diagnostic models» для прогнозу забруднення в робочій зоні і на прилеглій території при загорянні ТРП. Дані моделі дозволяють вперше науково обґрунтовано оцінити рівень промислової небезпеки при екстремальній ситуації на об'єктах зберігання і утилізації ТРП і забезпечити безпеку працівників;

– вперше встановлено закономірності процесів розсіювання небезпечних токсичних речовин в робочій зоні і на території прилеглих об'єктів при виникненні екстремальних ситуацій, пов'язаних із загорянням ТРП;

– вперше одержано наукове обґрунтування методу зниження небезпеки при виникненні екстремальної ситуації, яка супроводжується емісією продуктів горіння ТРП.

Практичне значення одержаних результатів:

– на базі запропонованих чисельних моделей розроблено інформаційно-моделюючу систему для прогнозу наслідків екстремальної ситуації, яка супроводжується емісією хімічно небезпечних речовин, що дозволяє прогнозувати забруднення робочих зон і прилеглої території;

– розроблено спосіб нейтралізації продуктів горіння ТРП, який дозволяє підвищити рівень промислової безпеки на території промислового об'єкта або при транспортуванні ТРП за рахунок зменшення концентрації небезпечної речовини в робочих зонах;

– поставлено та розв'язано задачу по оцінці ефективності застосування захисного валу біля сховища з ТРП, з метою мінімізації рівня забруднення в робочих зонах на промисловому майданчику, і показана можливість підвищення рівня промислової безпеки за рахунок застосування додаткового екрану біля сховища;

– запропоновано метод захисту вагона від кульового пробивання, який дозволяє знизити вразливість ТРП при його транспортуванні, що сприяє підвищенню рівня промислової безпеки на етапі транспортування небезпечного вантажу;

– отримані в роботі результати досліджень, розроблені моделі впроваджені в Головному управлінні Державної служби з надзвичайних ситуацій в Дніпропетровській області при моделюванні різних сценаріїв екстремальних ситуацій на об'єктах ПХЗ, що є основою розробки ПЛАСа. Розроблені моделі та коди використовуються в навчальному процесі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна при підготовці студентів, які навчаються за спеціалізацією «Водопостачання та каналізація», а також кафедри опалення, вентиляції та якості повітряного середовища ДВНЗ «ПДАБА» при читанні навчальних дисциплін і при виконанні дипломних і магістерських робіт.

Особистий внесок здобувача. Наукові публікації [33, 34, 112, 113] опубліковані без співавторів. Особистий внесок автора в роботах, опублікованих у співавторстві, полягає в наступному:

- виконанні аналізу методів оцінки рівня забруднення повітря в робочих зонах і на території промислового об'єкта [8];
- розробці комплексу чисельних моделей і CFD моделей для оцінки промислової безпеки [8, 10, 13, 19, 21, 26, 27];
- проведенні обчислювальних експериментів на базі розроблених чисельних моделей та аналіз, обробка результатів досліджень [8, 10, 13, 19-21, 24, 26-28, 32, 58, 119];
- виконанні програмної реалізації розроблених моделей [8, 10, 13, 19-21, 24, 26-28, 32, 58, 119].

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідались й обговорювалися на VII Міжнародній XVIII Традиційній науково практичній конференції «Екологічний інтелект – 2012» (Дніпропетровськ, 2012), Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті» (Дніпропетровськ, 2013), Сьомій Міжнародній науково-практичній конференції (до 95-річчя НАН України) «Проблеми природокористування, сталого розвитку та техногенної безпеки регіонів» (Дніпропетровськ, 2013), Міжнародній науковій конференції з аналітичної хімії та екології присвяченій 110-річчю від дня народження академіка М.Т. Козловського (республіка Казахстан, Алмати, 2013), V Міжнародній конференції «Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу» (Дніпропетровськ, 2014), Міжнародному науковому симпозиумі «Неделя еколога – 2015» (Дніпродзержинськ, 2015), Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів та молодих вчених «Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно небезпечних об'єктах» присвяченій 85-річчю ХНАДУ (Харків, 2015), 76 Міжнародній науково-

практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2016).

Публікації. Основні наукові результати дисертації опубліковано в 17 наукових роботах, у тому числі 8 – у виданнях, рекомендованих МОН України (з них 2 – без співавторів, 2 – у наукометричних виданнях), 8 тез доповідей на наукових конференціях, 1 монографія.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'ятих розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації 168 сторінок. Крім основного тексту, викладеного на 138 сторінках, дисертація містить 85 рисунків, 19 таблиць, список використаних джерел із 155 найменувань на 20 сторінках і додатків на 10 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ОЦІНЦІ НЕБЕЗПЕКИ НА РОБОЧИХ МІСЦЯХ З УРАХУВАННЯМ РОЗСІЮВАННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН НА ПОТЕНЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТАХ

1.1 Опис об'єкта дослідження

Україна є однією з небагатьох держав світу, де на високому рівні розвинена ракетно-космічна галузь. Функціонування даної галузі пов'язано з використанням ракетного палива на досвідчених стендах (стендові випробування ракетних двигунів), спеціальних полігонах, виробництвах, де створюється і утилізується ракетне паливо або здійснюється складання ракет. Необхідно відзначити, що сучасною тенденцією в ракетно-космічній галузі стає застосування твердого ракетного палива в установках двигунів. Україна – це країна, де є величезний досвід по створенню такого палива і його застосування для ракет різного призначення. Провідним підприємством в цій галузі є Павлоградський хімічний завод. Державне підприємство "Науково-виробниче об'єднання "Павлоградський хімічний завод" засноване в 1929 році як підприємство з випуску вибухових матеріалів і спорядження боєприпасів різного призначення (артилерійських, авіаційних, морських, інженерних і ін.). З 60-х років на підприємстві створено провадження у виготовлення сумішевих твердих ракетних палив і виготовлення спорядження корпусів і ракетних двигунів масою від 1 кг до 50000 кг.

З точки зору промислової безпеки ПХЗ відноситься до одного з найбільших в країні хімічно небезпечних об'єктів. На цьому підприємстві:

1. Виробляється ТРП (до складу його входять хімічно небезпечні компоненти).
2. Зберігається ТРП.
3. Утилізується ТРП.

Після отримання незалежності Україною і підписанням договору про без'ядерний статус України на території ПХЗ здійснено складування зарядів ТРП міжконтинентальної балістичної ракети (МБР) РС-22 («Скальпель»). Дана ракета була розроблена в Радянському Союзі для ураження далеких цілей (понад 10000 км). Особливістю ракети РС-22 було те, що її транспортування і запуск здійснювалися з залізничної платформи (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Ракета РС-22, в транспортно-пусковому контейнері

МБР РС-22 на заході отримала позначення SS-24 "Scalpel" MOD 2 (PL-4). МБР РС-22 прийнята на озброєння в 1989 році. Протягом 2003-2007 років усі ракети, що знаходяться в Україні, стаціонарного і рухомого базування, були зняті з озброєння і передані на зберігання і утилізацію.

В даний час на території ПХЗ (рис.1.2) зберігається понад 2000 тонн даного ракетного палива МБР РС-22 [102]. Маса одного спорядженого корпусу першої ступені РС-22 становить близько 47 тонн, маса спорядженого корпусу другої і третьої ступені – менше.

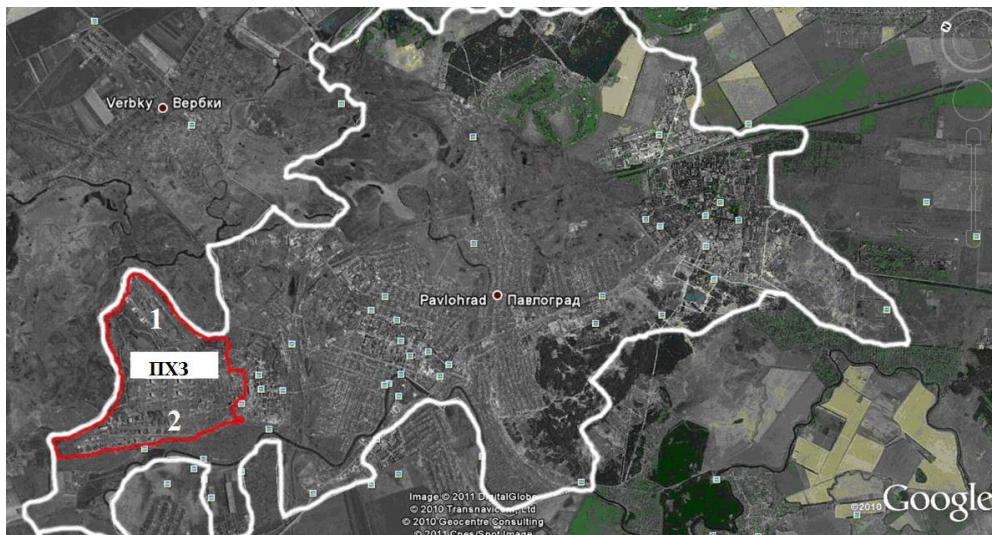


Рисунок 1.2 – Територія Павлоградського хімічного заводу:

1 – сховища ТРП; 2 – будівлі на території ПХЗ



Рисунок 1.3 – Сховища ТРП на території ПХЗ

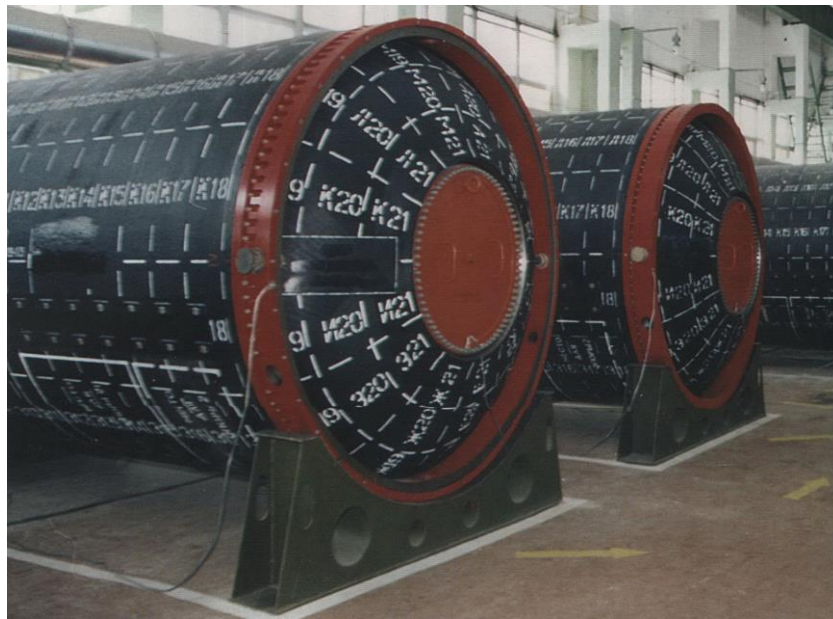


Рисунок 1.4 – Споряджений корпус твердопаливного ракетного двигуна першої ступені РС-22

Паливо зберігається в спеціальних сховищах (рис. 1.3, 1.4). Звісно, що в разі виникнення екстремальної ситуації в сховищах і загоряння ТРП, виникає необхідність вирішення двох важливих задач в області промислової безпеки:

1. Прогноз і оцінка рівня промислової небезпеки при виникненні екстремальних ситуацій внаслідок горіння ТРП.
2. Розробка заходів щодо зниження промислової небезпеки на об'єкті та мінімізація ризику ураження працівників на промисловому об'єкті і прилеглий території.

Аналіз даних з досліджуваної проблеми дозволив виділити ряд важливих факторів, які істотно ускладнюють організацію заходів з підвищення промислової безпеки на об'єкті, в разі виникнення екстремальної ситуації, а саме:

1. Час горіння одного спорядженого корпусу першої ступені (найбільшої) становить близько 10-15 хвилин (без сопла, з відкритими люками).
2. Горіння ТРП може відбуватися без доступу кисню.
3. Виникає масштабна емісія небезпечних речовин в повітря.

4. Виникає масштабна теплова емісія при горінні ТРП.
5. Імовірність виникнення ефекту «доміно» (загоряння в сховищі сусідніх споряджених корпусів ТРП).

Проведений аналіз літературних джерел не дозволив виявити технології по мінімізації рівня забруднення атмосферного повітря в робочій зоні, з метою мінімізації ризику ураження персоналу в разі екстремальної ситуації при займанні ТРП.

Як видно з рис. 1.2, сховище з ТРП розташовується поблизу виробничих і адміністративних будівель на території ПХЗ. Це створить загрозу токсичного ураження людей в робочій зоні і на території промислового об'єкта, як всередині виробничих будівель, так і на відкритій місцевості. У зв'язку з цим, прогноз і оцінка наслідків з урахуванням динаміки формування зон ураження, при виникненні екстремальних ситуацій є важливою актуальною задачею.

При цьому слід враховувати, що по території підприємства здійснюється транспортування ТРП. Перевезення ТРП може мати місце і за межами даного промислового об'єкта засобами залізничного транспорту. Виникнення екстремальної ситуації, що призводить до займання ТРП в вагоні і емісії продуктів горіння, точно також може привести до катастрофічних наслідків, з точки зору промислової безпеки. Міграція хімічно небезпечних речовин в робочій зоні і на території об'єкта призводить до токсичного ураження персоналу на території Павлоградського хімічного заводу:

1. працівники і охорона підприємства;
- а також до токсичного ураження персоналу при транспортуванні:
2. монтери залізничної колії;
 3. бригадири з поточного ремонту та утримання колії;
 4. робочі, що забезпечують навантаження (розвантаження) ТРП;
 5. машиністи і помічники машиністів тепловозів;
 6. охорона і супроводжуючий персонал.

Різде підвищення концентрації хімічно небезпечних речовин в повітряному середовищі веде до загрози отруєння працівників об'єкта.

Особливу небезпеку становить присутність в робочій зоні хімічно небезпечних речовин, які здатні вибухати і горіти. При горінні ТРП в повітря будуть надходити різні небезпечні речовини. Перелік продуктів горіння ТРП МБР РС-22 наведено в табл.1.1. Однак слід зазначити, що дані наведені в таблиці 1.1 дані з певним ступенем наближення [102], що пов'язано зі специфікою даної задачі – склад даного ракетного палива був секретним.

Таблиця 1.1

Продукти згорання ТРП РС-22 [102, 107]

Найменування шкідливої речовини	Питомий викид шкідливих речовин при підриванні сумішевого твердого ракетного палива разом зі спорядженим і корпусним двигунів (СКД), кг		
	1-а ступень	2-а ступень	3-я ступень
Al_2O_3	19975,7	11512,5	5622,8
HCl	6855,8	1351,3	678,5
CO	9121,7	5290,9	1849,8
NO_x у перерахунку на NO_2	1808,0	3974,4	3532,8
Діоксини і циклічні гетероароматичні речовини	458,4	238,3	84,4
Сажисті поліциклічні речовини	781,6	453,4	158,6
Разом	39001,2	22820,8	11926,9

В таблиці 1.2 наведені санітарні норми допустимих концентрацій шкідливих речовин, що виділяються при горінні ТРП.

Санітарні норми допустимих концентрацій шкідливих речовин

Найменування шкідливої речовини	Санітарні норми допустимих концентрацій шкідливих речовин, що виділяються	
	Концентрація (максимально разова), C_{mp} [мг/м ³]	Концентрація (в повітрі робочої зони), C_{pz} [мг/м ³]
Al_2O_3	0,03	6
HCl	0,20	5
CO	0,0003	0,001
NO_x у перерахунку на NO_2	0,20	5
Діоксини і циклічні гетероароматичні речовини	0,02 пг/м ³	0,13 пг/м ³
Сажисті поліциклічні речовини	0,05	0,15

Потрапляння перерахованих в таблиці 1.1 речовин в організм людини може призвести до токсичного ураження і летального результату. Так, наприклад, при високих концентраціях HCl відбувається подразнення слизових, особливо носа і легенів; помутніння рогівки очей і т.п. З'являється захриплість, відчуття задухи, поколювання в грудях, нежить, кашель, іноді кров в мокроті. Хронічне отруєння викликає катар дихальних шляхів; руйнування зубів; виразки слизової носа і навіть прорив носової перегородки; шлунково-кишкові розлади; можливі запальні захворювання шкіри. Згодом, з'являються гострі болі в області шлунка, блювота жовтуватим слизом. З таблиці 1.1 видно, що іншим небезпечним продуктом горіння палива є діоксини, NO_x і CO . Діоксини токсичні для серцево-

судинної системи, шлунково-кишкового тракту, органів дихання, імунної та ендокринної систем і нирок, мутаген, канцероген.

Таким чином, виділення шкідливих речовин, а також неконтрольоване горіння ТРП, в разі екстремальної ситуації в сховищах або при його транспортуванні, веде до інтенсивного викиду в повітря небезпечних речовин і масштабного забруднення навколишнього середовища, що створює ризик отруєння і токсичного ураження працюючих різного ступеня. Слід зазначити, що така небезпечна ситуація створиться в сховищі або під час перевезення ТРП при ініційованому впливі, в тому числі в разі аварії або диверсії.

Крім цього проблема оцінки рівня промислової безпеки виникає і при іншій ситуації – це утилізація твердого ракетного палива шляхом організованого спалювання або підриву [102, 107]. При такому способі утилізації в робочу зону і на промислову територію будуть надходити продукти горіння (табл.1.1) і таким чином виникне загроза небезпечного отруєння і ураження працівників. Тому оцінка масштабу промислової безпеки в цьому випадку є актуальною задачею.

1.2 Сучасні методи оцінки промислової безпеки при емісії небезпечних речовин в робочій зоні і прилеглих територій

Оцінка промислової безпеки в разі викидів токсичних речовин в екстремальних ситуаціях на хімічно небезпечних об'єктах, при зберіганні, утилізації та транспортуванні є особливо важливою задачею [1-3, 5, 6, 38, 44, 46, 47, 51, 75, 80, 81, 89, 92, 106]. Проведений нами аналіз показав, що в разі таких викидів процес емісії шкідливих речовин має ряд особливостей:

1. Емісія є «напівбезперервна», тобто здійснюється протягом певного проміжку часу. Цей проміжок може бути досить малим – наприклад, емісія небезпечних речовин при горінні ТРП (один споряджений корпус) відбувається протягом близько 15 хв. За цей час, до місця емісії, не

встигають під'їхати і надати необхідні заходи щодо усунення екстремальної ситуації спеціальні аварійно-рятувальні бригади.

2. Емісія може бути дуже потужною і неконтрольованою (немає можливості, наприклад, швидко зупинити поїзд з ТРП і забезпечити проведення робіт по зниженню викиду продуктів горіння ТРП в повітрі).

Тому при вирішенні задачі по оцінці промислової безпеки розглядають кілька етапів:

- 1) оцінка уразливості об'єкта;
- 2) оцінка рівня небезпеки шляхом моделювання розсіювання небезпечних речовин в повітрі робочої зони і на прилеглий території з метою визначення поля концентрації, яке формується після аварії;
- 3) *mapping* – зображення зони хімічного зараження на картах і зміна цієї зони з плином часу для візуалізації наслідків аварії і виявлення динаміки формування районів небезпечного об'єкта з високим ризиком ураження працівників;
- 4) прогноз впливу зони хімічного забруднення (*impact influence*) на працівників в робочій зоні і прилеглої території (визначення величини соціального ризику – оцінка кількості постраждалих в приміщеннях промислових корпусів і в робочих зонах на відкритій місцевості на території промислового об'єкта).

Розробка моделей для розрахунку розсіювання шкідливих речовин в повітрі робочої зони та прилеглої території, з метою визначення величини фактора ураження – концентрації, зазвичай здійснюється з урахуванням масштабу перенесення небезпечних речовин. В даний час виділяють наступні масштаби перенесення:

1. *canopy* – масштаб перенесення у межах робочого місця;
2. *microscale* – масштаб перенесення порядку декількох десятків метрів;
3. *local* – масштаб перенесення від ста метрів до кілометра;
4. *urban* – масштаб перенесення порядку 1-3 км, до 10 кілометрів;
5. *county* – масштаб перенесення 10 і більше кілометрів;

- 6. *regional* – масштаб перенесення порядку декількох сотень кілометрів;
- 7. *continental* – масштаб перенесення порядку декількох тисяч кілометрів;
- 8. *global* – масштаб перенесення близько 10000 кілометрів і більше.

При розгляді аварійних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах і транспорті (ПЛАС), зазвичай розглядають процес перенесення небезпечних речовин в масштабах «microscale», «local», «urban». У разі аварії на великих об'єктах (аварія на Чорнобильській АЕС, Фукусіма АЕС) прогноз здійснюють в масштабах «county», «regional» і «continental». Слід підкреслити, що масштаб перенесення домішки в повітрі визначає особливості розроблюваної прогнозованої моделі.

В Україні, в даний час для прогнозу наслідків аварій на хімічно небезпечних об'єктах, транспорті широко використовується нормативна методика [76]. Ця методика являє собою емпіричні моделі для розрахунку розмірів зон хімічного ураження. Наприклад, згідно з нормативною методикою площа прогнозованої зони хімічного забруднення розраховується за формулою:

$$S_{\text{прог.}} = K \cdot \Gamma^2 \cdot N^{0,2} \text{ км}^2,$$

де K – коефіцієнт, який залежить від ступеня вертикальної стійкості повітря;

N – час, на який розраховується глибина площі прогнозованої зони хімічного забруднення;

Γ – глибина зони хімічного забруднення.

Дана методика має такі серйозні недоліки:

– при проведенні прогнозних розрахунків немає врахування впливу швидкості і напрямку вітру на формування зони забруднення;

– немає можливості отримання просторово-часового розподілу концентрації небезпечної речовини в повітрі – а значить, відсутня науково-обґрунтована база для оцінки ризику ураження працівників при екстремальній ситуації на промисловому об'єкті;

– методика не враховує вплив атмосферної дифузії на формування зони хімічного забруднення;

– в розрахунках по даній методиці не враховується вплив часу емісії хімічно небезпечної речовини на процес формування зони забруднення.

Тут слід підкреслити, що особливістю даної екстремальної ситуації в сховищі, на залізничному транспорті під час перевезення ТРП, є нестационарність емісії небезпечних речовин: викид продуктів згорання ракетного палива здійснюється протягом декількох хвилин, а потім відбувається розсіювання в повітрі сформованого шлейфу. Нормативна методика не дозволяє знайти рішення даної задачі з урахуванням цієї важливої особливості.

Досить близькою "за ідеологією" до нормативної методикою є методика РД 52.04.253-90, яка також заснована на застосуванні емпіричних моделей, що дозволяють розрахувати глибину зони хімічного ураження і т.п. Наприклад, згідно з цією методикою величина гранично можливого значення глибини перенесення повітряних мас розраховується за формулою:

$$G_{II} = N \cdot v,$$

де N – час від початку аварії, годин; v – швидкість перенесення переднього фронту зараженого повітря при даній швидкості вітру і ступеня вертикальної стійкості повітря, км/год.

Але дана методика не дозволяє розрахувати динаміку зміни концентрації небезпечної речовини на різній відстані від джерела емісії та, по суті, має перераховані вище недоліки.

У ряді випадків для розрахунку зон хімічного ураження використовується інша емпірична модель – модель ОНД-86 [2, 78, 102]. Приклад розрахунку за допомогою цієї моделі показаний на рис.1.5.

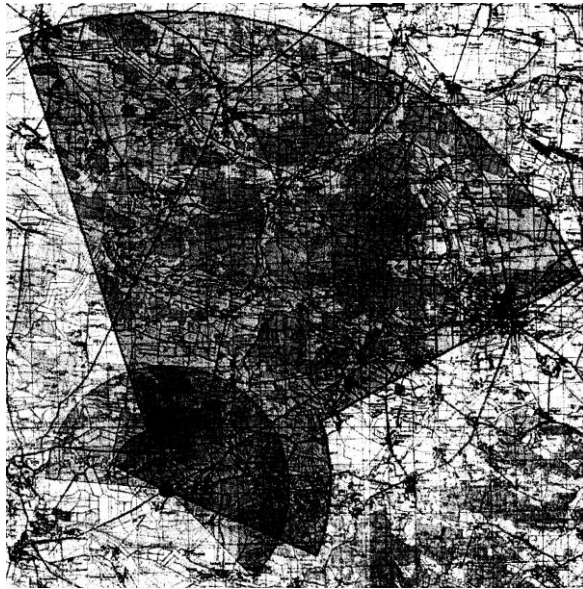


Рисунок 1.5 – Розрахунок зони забруднення при аварії з жовтим фосфором, що сталася на Львівській залізниці (розрахунок за допомогою методики ОНД-86) [2]

Дана методика має таку стандартну назву – "Методика розрахунку концентрацій в атмосферному повітрі шкідливих речовин, що містяться у викидах підприємств. ОНД-86". Існує ряд програм, які реалізують дану методику (наприклад, програма "ЕОЛ 2000" і т.д.). Ця методика призначена для оцінки впливу шкідливих викидів проєктованих і діючих підприємств на забруднення приземного шару атмосфери. Методика ОНД-86 була створена на основі обробки великої кількості емпіричної інформації щодо рівня забруднення повітря поблизу великих промислових об'єктів в різних регіонах СРСР. Керівником даних робіт був д.ф.-м.н. Берлянд М.Є.

Основна розрахункова залежність даної методики, що дозволяє розрахувати максимальну приземному концентрацію, має вигляд:

$$C_m = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta T}},$$

де A – коефіцієнт, що залежить від температурної стратифікації атмосфери і визначає умови вертикального і горизонтального розсіювання шкідливих речовин в атмосферному повітрі;

M – кількість шкідливої речовини, що викидається в повітря в одиницю часу;

F – безрозмірний коефіцієнт, що враховує швидкість осідання шкідливих речовин в атмосферному повітрі;

m і n – безрозмірні коефіцієнти, що враховують умови виходу газоповітряної суміші з гирла джерела викиду;

η – безрозмірний коефіцієнт, що враховує вплив рельєфу місцевості, в разі рівної або слабо пересіченій місцевості з перепадом висот не перевищує 50 м на 1 км;

H – висота джерела викиду над рівнем землі;

ΔT – різниця між температурою, що викидається газоповітряною сумішшю T_c і температурою навколишнього атмосферного повітря T_n ;

V_l – ефективний обсяг газоповітряної суміші.

Методика ОНД-86 призначена для розрахунків розсіювання викидів від промислових труб, в наближенні – «постійно діюче точкове джерело».

Слід підкреслити, що в роботі [102] дана методика і методика РД 52.04.253-90 були використані для оцінки рівня забруднення повітря продуктами згоряння (HCl , діоксини і т.д.) ТРП РС-22, однак, застосування цих методик для розглянутого випадку – неправомірно, тому що емісія при горінні ТРП відбувається протягом короткого проміжку часу, тому наближення «постійно діюче джерело» – не застосовується.

На закінчення слід підкреслити, що для задач прогнозу забруднення атмосферного повітря в робочих зонах і прилеглої території при аваріях на хімічно небезпечних об'єктах, за кордоном, в даний час емпіричні моделі не використовуються, оскільки вони мають очевидні обмеженості за обсягом і якістю прогнозованої інформації.

Нерідко, на практиці, для розрахунку розсіювання шкідливих речовин в повітрі робочих зон і прилеглої території на потенційно небезпечних об'єктах використовується модель Гауса [38, 41, 44, 75, 106, 108, 127, 128, 135]. Ця модель (і різні її варіації – модель Сеттона і т.д.) являє собою аналітичний

розв'язок рівняння переносу домішки з використанням емпіричної інформації щодо впливу турбулентної дифузії на процес розсіювання домішки. Дана модель становить основу великої кількості програмних продуктів, наприклад "Аммиак", "AEROMOD". "CAMEO/ALOHA", "НРАС/SCIPUFF" і т.д. (рис.1.6).

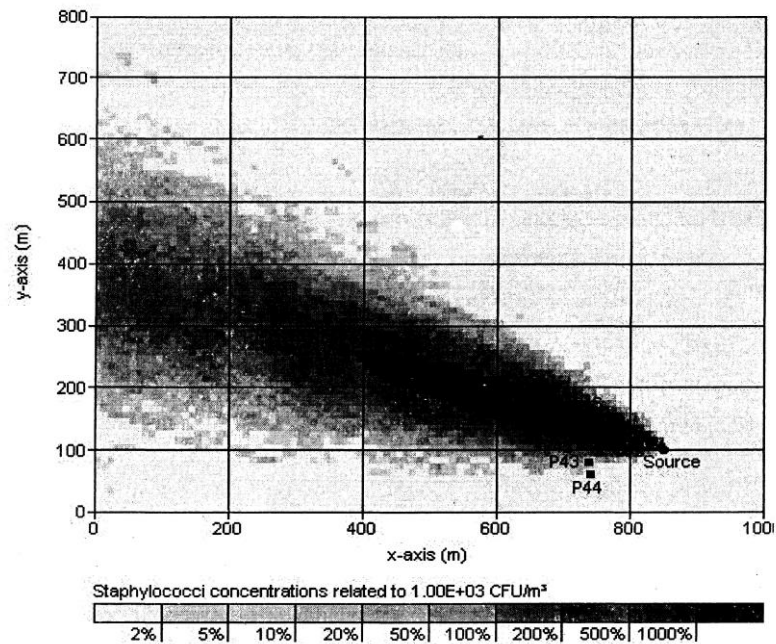


Рисунок 1.6 – Розрахунок зони біологічного забруднення повітря на базі моделі Гауса (модель TALIP version 1.2) [141]

Модель Гауса і її аналоги – аналітичні моделі, отримані для умов точкового постійного викиду, точкового миттєвого викиду [5, 6, 35, 38, 76, 84, 89, 94, 98, 103, 127, 150, 151] не враховують профіль швидкості вітру і т.п. і, тому – володіють певною обмеженістю за своїми можливостями. Крім цього, ці моделі дають не фізично завищене значення концентрації небезпечної речовини біля джерела, оскільки засновані на припущенні про "точковий викид". Слід також зазначити, що в моделі Гауса застосовуються коефіцієнти дисперсії, емпіричне значення яких визначено в США і Великобританії. Для регіонів України такі коефіцієнти не визначались.

Іншим класом моделей, які використовуються для прогнозу забруднення повітря робочих зон та прилеглої території на потенційно небезпечних об'єктах, є лагранжеві моделі [38, 122] (наприклад, “ARCO”, “MOE”, “NAME”, “NARAC/ADAPT-LODI”, “QWIC” і т.д.). У цих моделях досліджується рух частинок домішки по траєкторіях [38]. В Україні такі моделі не отримали свого поширення. За кордоном, як правило, дані моделі використовуються для розрахунку далекого переносу забруднюючих речовин в повітрі (модель “NAME” використовується для розрахунку «ближнього» перенесення домішки).

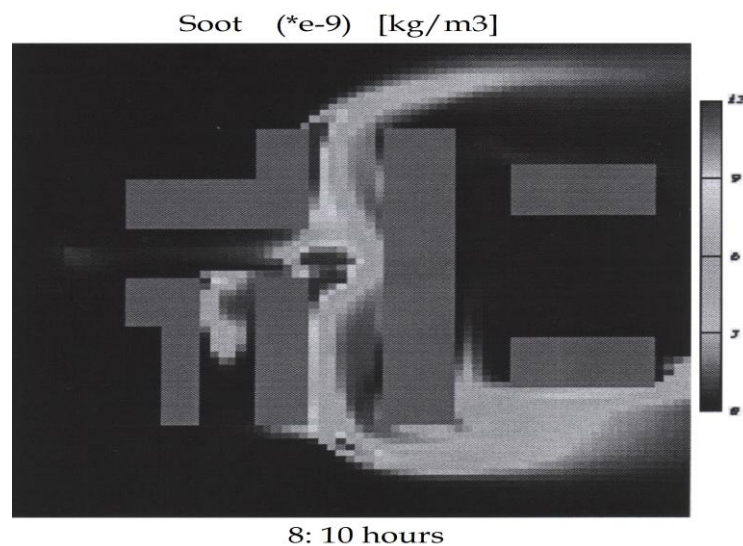


Рисунок 1.7 – Розрахунок зони забруднення, що формується між будівлями (CWE модель [139])

В даний час найбільш ефективним інструментом вирішення прогнозних задач, пов'язаних з аварійним забрудненням, є чисельні моделі [46, 53, 54, 71, 85, 105, 112-117, 121, 123, 133, 134, 137, 140, 142, 143, 149]. В цьому класі моделей виділяють дві підгрупи: моделі, в рамках яких здійснюється розрахунок поля швидкості вітрового потоку з урахуванням рельєфу місцевості, будівель (CFD моделі, або названі пізніше CWE моделі, рис.1.7, 1.8) [3, 59, 74, 80, 90, 105, 115-117, 123, 140, 141, 143].

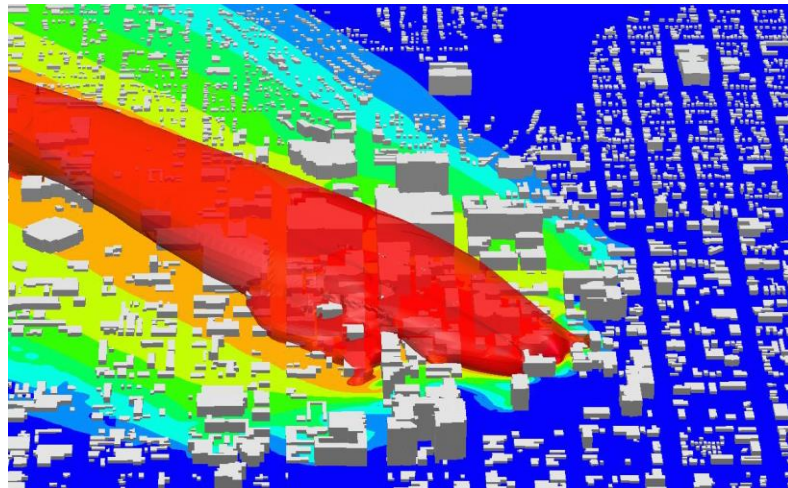


Рисунок 1.8 – Розрахунок на базі CFD моделі зони забруднення для оцінки соціального ризику при емісії хімічно небезпечної речовини [132]

Однак відомо, що в даний час існує проблема розрахунку турбулентних потоків, в яких переносяться забруднюючі речовини. Існуючі в даний час CFD моделі опису турбулентних потоків не дозволяють у багатьох випадках отримати розрахункові дані близькі до експериментальних, особливо в областях складної геометричної форми. Наприклад, в разі моделювання розсіювання забруднюючих речовин при наявності будівель (рис.1.9).

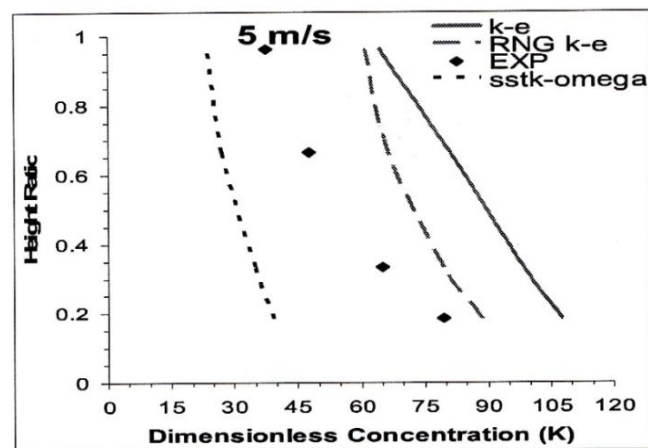


Рисунок 1.9 – Порівняння експериментальних значень концентрації з розрахунком на базі рівнянь Нав'є-Стокса і з використанням різних моделей турбулентності [139, с. 8/13]

Моделі даної підгрупи дозволяють оперативно розраховувати динаміку забруднення повітря робочих зон та прилеглої території на потенційно небезпечних об'єктах з урахуванням основних фізичних факторів, що впливають на процес перенесення домішки.

Слід підкреслити, що за кордоном для задач CWE моделювання вітрового потоку використовуються рівняння Нав'є-Стокса – одна з фундаментальних моделей аеродинаміки. Чисельні моделі дають можливість відтворювати процес забруднення повітря практично з тієї ж близькістю, що і фізичний експеримент.

Необхідно відзначити, що для даної задачі – горіння ТРП, слід розробляти теоретичні методи прогнозу, які можна було б використовувати, як для оцінки промислової безпеки, так і для оцінки ефективності розроблюваних методів захисту повітря робочих зон та прилеглої території на потенційно небезпечних об'єктах від забруднення. Наприкінці слід зазначити, що постановка фізичного експерименту для задач, пов'язаних з дослідженням забруднення повітря техногенними викидами вимагають великих витрат часу, дорогого обладнання (наприклад, для вимірювання швидкості вітру в турбулентному потоці рис.1.12), наявності спеціальних полігонів [84, 110, 126, 129-131, 141, 145, 146, 148, 155] (рис.1.10, 1.11).

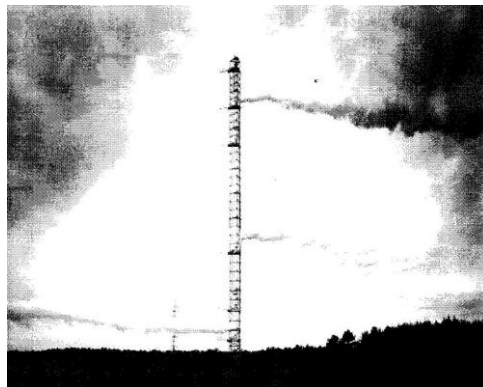


Рисунок 1.10 – Полігон Brookhaven National Laboratory (дослідження по виявленню залежностей розсіювання шлейфу забруднюючої речовини в повітрі при викидах на різній висоті) [152]



Рисунок 1.11 – Полігон NASA для випробування ракетних двигунів (добре видно інтенсивну зону забруднення атмосферного повітря продуктами горіння ТРП [<http://spynet.ru/blog/Interesting/39124.html>])

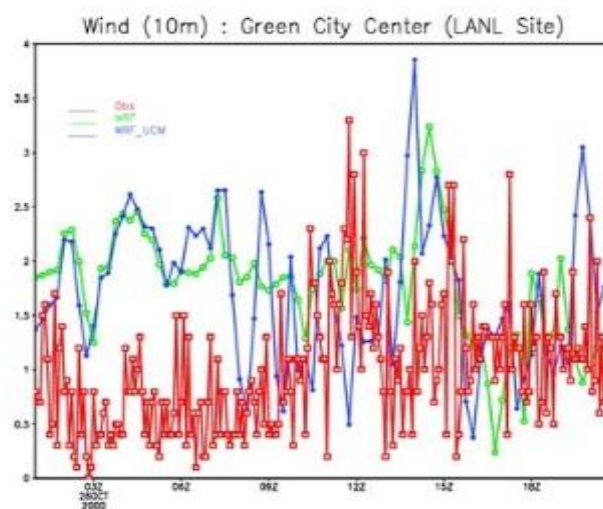
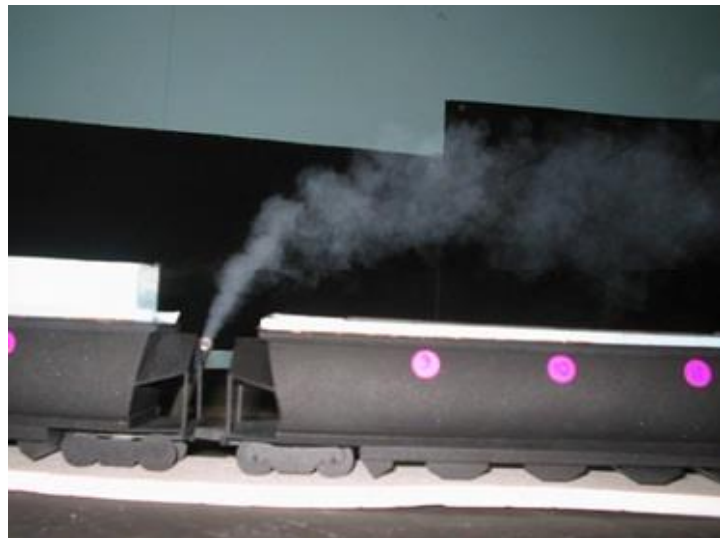


Рисунок 1.12 – Експериментальне вимірювання величини швидкості вітру [132]

Проведення фізичного експерименту на моделях, в аеродинамічних трубах (рис.1.13) також пов'язано з великими часовими витратами на постановку експерименту, його проведення і обробку результатів і вимагає використання дорогого устаткування. Тому, в даний час, не можна вважати експериментальний метод щоденним інструментом вирішення складних задач в області промислової безпеки.



а)



б)

Рисунок 1.13 – Проведення експерименту в аеродинамічній трубі:
а) розміщення моделей вагонів в аеродинамічній трубі; б – візуалізація течії між вагонами [John Scherer (Environmental Protection Agency, USA)]

Аналіз літературних джерел дозволив виявити незначну кількість експериментальних досліджень в Україні, що проводяться в рамках визначення залежностей по розсіюванню забруднюючих речовин в повітрі робочої зони та прилеглої території [64]. Стимування наукових досліджень в цьому напрямку пояснюється відсутністю сучасного устаткування для вимірювання в натурних умовах або в аеродинамічних трубах швидкості турбулентного вітрового потоку (сучасні прилади вимірювання без "проникнення" в потік – Doppler Systems, SODAR, mini – SODAR) і концентрації домішки (сучасні прилади вимірювання без "проникнення" в потік – LS-DIP, Optical Methods). Крім цього очевидно, що проведення натурального експерименту для певних задач в рамках розглянутого класу – неможливо. Це відноситься, зокрема, до задачі проведення фізичного експерименту при горінні споряджених корпусів ТРП.

1.3 Обґрунтування обраного наукового напрямку

При виникненні екстремальної ситуації на об'єктах зберігання і утилізації ТРП або під час транспортування ТРП, в робочу зону і на прилеглу територію будуть надходити токсичні речовини у великій кількості, які в значній мірі перевищують ГДК. Негативний вплив може проявитися в ряді робочих зон (рис.1.14), а саме, можливе ураження робочого персоналу, а також на відкритій місцевості (рис.1.14, позиція 2); ураження робочого персоналу всередині виробничих корпусів, куди буде надходити забруднене атмосферне повітря (рис.1.14, позиція 3); ураження персоналу, що супроводжує потяг, який здійснює перевезення ТРП (рис.1.14, позиція 4). Тому проведення прогнозу та оцінки на об'єктах підвищеної небезпеки при виникненні екстремальних ситуацій і розробка заходів і засобів, спрямованих на зниження небезпеки ураження працівників в робочій зоні і на прилеглий до об'єктів території, з урахуванням моделювання розвитку ситуацій, є важливою актуальною задачею.

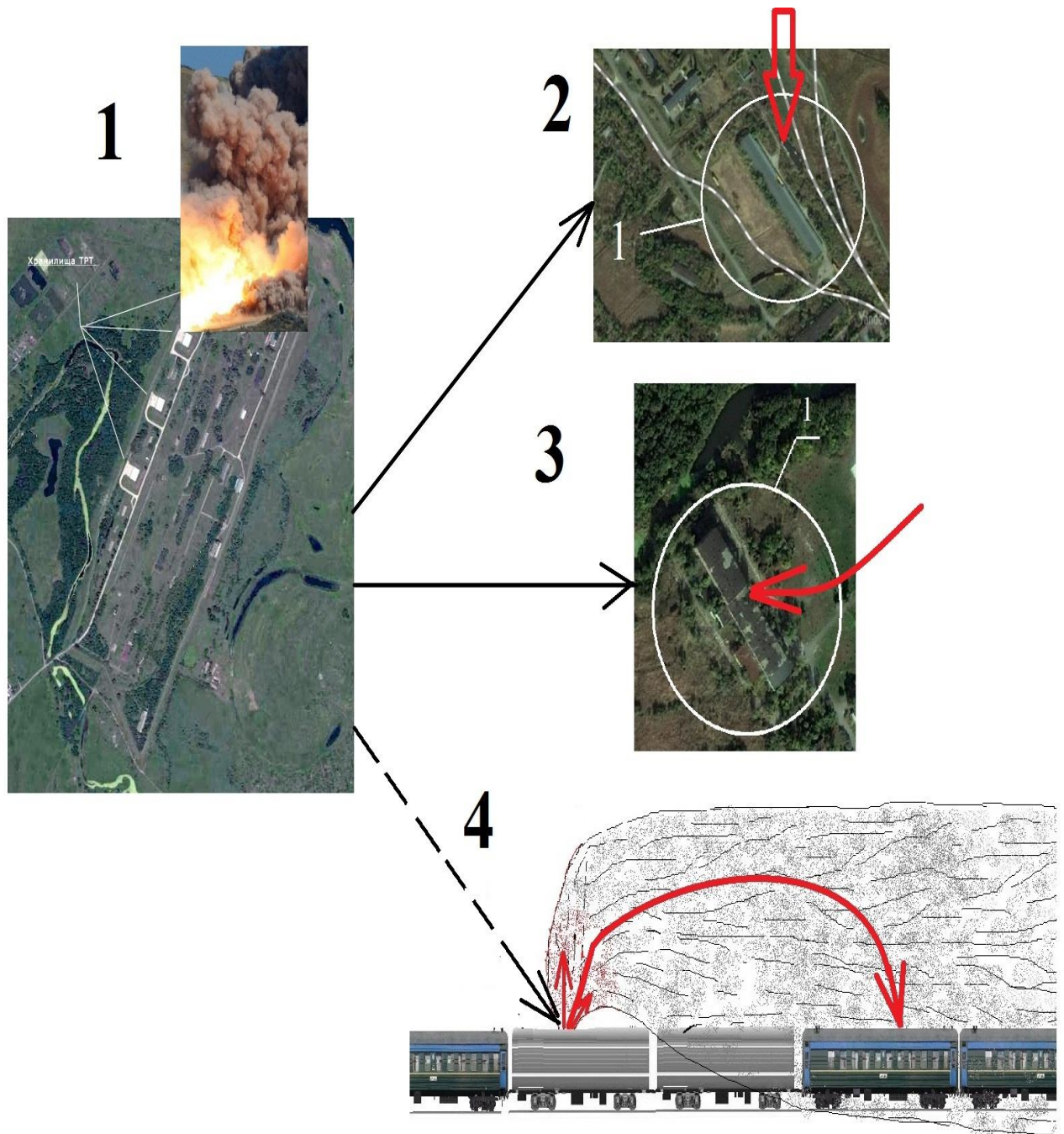


Рисунок 1.14 – Об'єкти ураження при загорянні ТРП

Проведений нами аналіз робіт показав, що в даний час відсутні науково-обґрунтовані методики по оцінці рівня промислової небезпеки в разі виникнення екстремальних ситуацій на об'єктах зберігання і утилізації, в тому числі при горінні ТРП в сховищі.

Висновки до розділу 1

1. Проведений аналіз показав, що в разі виникнення екстремальної ситуації при зберіганні і утилізації ТРП, яка призводить до виникнення горіння ТРП в сховищі або при його транспортуванні, відбувається дуже потужна емісія небезпечних речовин в повітря, яку не можна зупинити. Це створить загрозу інтенсивного забруднення повітря та ураження виробничого персоналу в робочій зоні і на прилеглий території.

2. Для оцінки рівня промислової безпеки в разі екстремальної ситуації при загорянні ТРП, необхідно виконати адекватний прогноз динаміки забруднення атмосферного повітря в робочій зоні і на прилеглий території.

3. Застосовувана в Державній службі з надзвичайних ситуацій України (ДСНС України) нормативна методика для прогнозу наслідків аварій на хімічно небезпечних об'єктах і транспорті не дозволяє отримати адекватну прогнозну інформацію щодо динаміки забруднення атмосферного повітря при загорянні ТРП в сховищі або на етапі його транспортування. Дана методика заснована на застосуванні емпіричних, малоінформативних моделей, які не можуть відобразити сутність модельованого процесу – короткочасна емісія небезпечних речовин.

4. Виявлено необхідність проведення моделювання та розробки моделей для оцінки промислової безпеки в разі екстремальної ситуації, що призводить до займання ТРП.

5. Виявлено необхідність розробки заходів щодо захисту повітря в робочій зоні і на прилеглий території від забруднення продуктами горіння ТРП з урахуванням прогнозу і оцінки виникнення безпеки.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ ПРИ ВИНИКНЕННІ ГОРІННЯ ТРП

При прогнозі і оцінці промислової безпеки та розробки заходів для захисту працівників у разі виникнення екстремальних ситуацій, що призводять до виникнення загоряння ТРП, необхідно розглянути задачі комплексно і в певній послідовності. Якщо розглядається екстремальна ситуація на хімічно небезпечних об'єктах, то етапи вирішення цієї задачі показані в таблиці 2.1 [127].

Таблиця 2.1

Послідовність розв'язання задачі по оцінці наслідків
екстремальних ситуацій на небезпечному об'єкті (транспорті)

Етап	Конкретизація
1. Ідентифікація джерела ризику.	Сховища з ТРП (вагони з ТРП).
2. Ідентифікація небезпеки – визначення небезпечного (уражуючого) чинника на об'єкті при виникненні екстремальних ситуацій.	Концентрація небезпечних речовин – продукти горіння ТРП.
3. Сценарій екстремальних ситуацій.	Загоряння ТРП у сховищі (у вантажному вагоні).
4. Побудова поля небезпечних факторів.	Побудова поля концентрації небезпечних речовин і визначення їх концентрації в робочих зонах.
5. Розробка методів щодо мінімізації негативних наслідків екстремальних ситуацій.	Мінімізація концентрації небезпечних речовин у повітрі робочої зони та прилеглої території на ПХЗ.

2.1 Моделювання екстремальних ситуацій при горінні ТРП

У разі загоряння ТРП в сховищі або пункті утилізації ТРП буде формуватися струмінь продуктів горіння з урахуванням обмеженості простору і величини повітряного потоку та в робочу зону і на прилеглу територію почнуть надходити хімічно небезпечні речовини (рис.2.1).



Рисунок 2.1 – До розрахунку забруднення повітряного простору продуктами згоряння ТРП: 1 – емісія продуктів горіння ТРП; 2 – сховище ТРП

Для прогнозу і оцінки промислової безпеки при горінні ТРП слід враховувати основні фізичні параметри, які надають визначальний вплив на розсіювання небезпечних речовин, а саме: швидкість, напрямок вітру, стан атмосфери, час емісії небезпечних речовин, інтенсивність емісії, можливість руху джерела емісії. Для врахування цих чинників, при проведенні прогнозних розрахунків, будемо застосовувати рівняння Марчука Г.І. [1, 35, 71, 90, 105]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} + \sigma C = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \sum Q_i(t) \delta(x - x(t)_i) \delta(y - y(t)_i) \delta(z - z_i), \quad (2.1)$$

де C – концентрація небезпечної речовини в атмосферному повітрі;
 u, v, w – компоненти вектора швидкості руху повітряного середовища;

μ_x, μ_y, μ_z – коефіцієнти атмосферної турбулентної дифузії;

σ – коефіцієнт, що враховує зміну концентрації за рахунок хімічних реакцій, що протікають в повітрі і вимивання забруднювача опадами [38];

t – час;

x_i, y_i, z_i – координати розташування точкового джерела виділення забруднювача (місце розташування палаючого спорядженого корпусу двигуна з ТРП);

$Q_i(t)$ – інтенсивність емісії точкового джерела (інтенсивність викиду продуктів горіння ТРП);

$\delta(x - x(t_i))\delta(y - y(t_i))\delta(z - z_i)$ – позначення дельта-функції Дірака (відзначимо, що координати джерела емісії залежать від часу, тобто є врахування руху джерела викиду забруднювача).

При цьому, якщо необхідно врахувати гравітаційне осадження забруднювача, то моделююче рівняння має вигляд [71, 105]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)C}{\partial z} + \sigma C = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \sum Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i), \end{aligned} \quad (2.2)$$

де w_s – швидкість гравітаційного осідання забруднювача.

Відзначимо, що для моделювання процесу вимивання забруднювача з атмосфери опадами можна використовувати наступне емпіричне рівняння [38]:

$$\sigma = k_r \cdot k_0 \cdot I,$$

де σ – параметр вимивання домішки опадами, який залежить від типу опадів;

k_r – стандартна величина абсолютної вимиваючої здатності дощу ($k_r = 10^{-5} \text{ г}/(\text{мм} \cdot \text{с})$);

k_0 – відносна вимиваюча здатність опадів інших типів, наведена в таблиці 2.2;

I – інтенсивність опадів, $I = 1 \text{ мм/г}$.

Таблиця 2.2

Відносна вимиваюча здатність різних типів опадів

Тип опадів	k_0
дощ	1
дощ з грозою	1,1
злива	2,6
сніг	3,0

Слід зазначити, що параметр σ також може враховувати процес хімічного перетворення забруднювача в атмосфері [71]. Однак в цьому випадку необхідно використовувати дані фізичних експериментів щодо коефіцієнта σ . Наприклад, для SO_2 , коефіцієнт сигма становить близько: $\sigma = 0,27 \text{ 1/год}$ [55], для NO_2 – $\sigma = 0,045 \text{ 1/с}$. Також необхідно мати на увазі те, що значення даного коефіцієнта залежить від кліматичних умов, висоти і т.д.

У чисельної моделі запропоновано використовувати такі залежності для завдання профілю швидкості вітру і вертикального коефіцієнта атмосферної дифузії [35, 38]:

$$u = u_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^p, \quad \mu_z = k_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^m,$$

де u_1 – швидкість вітру на висоті z_1 (приймається $z_1=10\text{м}$); $k_1=0,2$; $p=0,16$; $m \approx 1$. Як відомо параметр p дозволяє враховувати стійкість атмосферного повітря [103]. Даний параметр, слідуючи Сеттону, пов'язаний з параметром n , який є функцією стійкості атмосферного повітря.

Зв'язок цих параметрів визначається наступною залежністю

$$p = \frac{n}{2-n}.$$

Значення n для різних умов стабільності наведені в роботі [103].

Для розрахунку інших коефіцієнтів атмосферної дифузії використовувалися наступні емпіричні залежності [35, 71]:

$$\mu_y = \mu_x,$$

$$\mu_y = k_0 u, \text{ где } k_0 = 0,1.$$

При викиді відпрацьованих газів на місці емісії утворюється стовп продуктів горіння (рис.2.2).



Рисунок 2.2 – Стовп продуктів горіння ракетного палива

В цьому випадку в моделі необхідно врахувати наявність такого стовпа висотою h . Для визначення висоти струменя стовпа продуктів горіння ТРП в запропонованій чисельній моделі використовувалася емпірична залежність [103]:

$$h = 4,71 \cdot \frac{Q^{0,444}}{u^{0,694}}, \quad (2.3)$$

де u – швидкість вітру, Q – інтенсивність емісії тепла при горінні ТРП ($Q=4 \cdot 10^3$ кДж/кг).

Розглянемо постановку граничних і початкових умов для рівняння міграції небезпечної речовини в повітрі (2.1) або (2.2). Розв'язання задачі буде визначатися в області, що має форму паралелепіпеда. Розміри розрахункової області: L_x , L_y , L_z . На границі входу повітряного потоку в розрахункову область ставиться умова [71, 105]:

$$C|_{\text{границя}} = C_n,$$

де C_n – відоме значення концентрації небезпечної речовини в атмосферному повітрі (в розрахунках приймається $C_n = 0$).

На вихідних границях розрахункової області в чисельній моделі ставиться «м'яка» гранична умова [71, 105]. Наприклад, в різницевому вигляді, для площини $x=L_x$, дана умова записується так

$$C(i+1, j, k) = C(i, j, k),$$

де $(i+1, j, k)$ – остання (гранична) різницева комірка.

На нижній площині – поверхні землі ставиться гранична умова виду

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0,$$

де n – одиничний вектор зовнішньої нормалі до поверхні.

Для моменту часу $t=0$, початкова умова розглянутої крайової задачі має вигляд: $C = C_0$, де C_0 – відоме значення концентрації токсичного газу в розрахунковій області (в розрахунках приймається $C_0=0$).

Відзначимо, що в дослідженні дане рівняння розглядається для вирішення прогностної задачі про забруднення атмосферного повітря в масштабі «Local».

Для вирішення прогностної задачі по забрудненню повітря в масштабі «Urban», а також при моделюванні процесу нейтралізації продуктів горіння ТРП нами в роботі розглядається також двовимірне рівняння виду (2.1) [71]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \sigma C = \text{div}(\mu \text{grad} C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x - x(t)_i) \delta(y - y(t)_i), \quad (2.4)$$

де C – осереднене значення концентрації небезпечної речовини (а також нейтралізатора);

u, v – осереднене значення компонент вектора швидкості вітру;

$\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коефіцієнти атмосферної турбулентної дифузії;

σ – коефіцієнт, що враховує зміну концентрації небезпечної речовини за рахунок хімічних реакцій, вимивання опадами, гравітаційне осідання забруднювача і взаємодія його з приземною поверхнею [71];

Q_i – осереднене значення потужності емісії небезпечної речовини (продуктів горіння);

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

x_i, y_i – координати розташування точкового джерела емісії небезпечної речовини;

t – час.

Осереднення проводиться по висоті перенесення H :

$C(x, y) = \frac{1}{H} \int_0^H C_{np}(x, y, z) dz$, а в разі профільної задачі осереднення виконується по

ширині перенесення домішки. Відзначимо, що тут C_{np} – просторове значення концентрації небезпечної речовини.

У розробленій чисельній моделі (профільна задача) нами застосовуються наступні залежності для завдання профілю вітру і вертикального коефіцієнта атмосферної дифузії [35, 38]:

$$u = u_1 \left(\frac{y}{y_1} \right)^p, \quad (2.5)$$

$$\mu_y = k_1 \left(\frac{y}{y_1} \right)^m, \quad \mu_x = k_0 u. \quad (2.6)$$

Позначення для параметрів даної моделі наведено вище. Дані залежності дозволяють при моделюванні враховувати реальний розподіл швидкості вітру в повітрі.

Якщо розглядається планова задача (моделювання розсіювання небезпечної речовини в повітрі в масштабі "Urban"), то турбулентні коефіцієнти атмосферної дифузії розраховуються по залежностям [35]:

$$\mu_x = \mu_y ,$$

$$\mu_y = k_0 u .$$

Для двовимірного рівняння масопереносу ставляться такі крайові умови. На границі виходу повітряного потоку ставиться «м'яка» гранична умова, яка в чисельній моделі записується, наприклад, для границі $x=L_x$

$$C(i+1,j)=C(i,j),$$

де $(i+1,j)$ – гранична різницева комірка.

На вхідній границі – границя затікання повітряного потоку, задається умова виду

$$C|_{\text{границя}} = C_p ,$$

де C_p – відоме значення концентрації забруднюючої речовини (в розрахунках приймається $C_p = 0$).

Для моменту часу $t=0$, початкова умова розглянутої крайової задачі має вигляд: $C = C_0$, де C_0 – відоме значення концентрації токсичного газу в розрахунковій області (в розрахунках приймається $C_0=0$).

Розглянемо розв'язання задачі по нейтралізації продуктів горіння ТРП, як при нерухомому джерелі емісії продуктів горіння (викид на полігоні, зі сховища або біля сховища), так і під час руху поїзда, в складі якого знаходиться палаючий вантаж (при перевезенні ТРП). Оскільки розв'язання задачі по нейтралізації продуктів горіння при русі поїзда є дуже складною задачею, то при її розгляді нами були зроблені ряд припущень:

1. Рух поїзда, в якому знаходиться вагон з палаючим ТРП – прямолінійний.
2. Розглядається планова задача (двовимірна); яка використовує моделююче рівняння (2.4).

3. Коефіцієнти дифузії по обом координатним напрямкам визначаються залежністю (2.6).

У висновку відзначимо, що застосування даної моделі дозволяє прогнозувати наслідки екстремальної ситуації з урахуванням напрямку, швидкості вітру, інтенсивності емісії хімічно небезпечних речовин.

2.2 Моделювання інфільтрації забрудненого атмосферного повітря в робочу зону промислових корпусів

Рішення задачі по оцінці рівня забруднення атмосферного повітря на базі рівнянь (2.1), (2.2) або (2.4) дозволяє виявити динаміку його забруднення в разі емісії продуктів горіння ТРП, тобто – створити платформу для розв’язання задачі по оцінці соціального ризику, внаслідок токсичного ураження працівників на території ПХЗ. Але для адекватної оцінки ризику ураження працюючих людей в разі екстремальної ситуації в сховищі, необхідно прогнозувати динаміку забруднення повітряного середовища усередині промислових корпусів і будівель в робочих зонах. Тому виникає задача розрахунку нестационарного процесу забруднення повітряного середовища усередині промислових корпусів при інфільтрації в них забрудненого атмосферного повітря.

Нами для моделювання процесу забруднення повітряного середовища в промислових корпусах при інфільтрації в них забрудненого атмосферного повітря використовується наступне рівняння [109, 124]:

$$V \frac{dC}{dt} = QC_{np} - QC, \quad (2.7)$$

де C_{np} – концентрація забруднювача в приточному повітрі, що інфільтрується; C – концентрація небезпечної речовини у вихідному з приміщення повітрі; V – об’єм приміщення; Q – інтенсивність

повітрообміну; t – час. При застосуванні моделі (2.7) було припущено, що концентрація забруднювача в приміщенні дорівнює $C=0$ для моменту часу $t=0$.

Інтенсивність повітрообміну розраховується за допомогою наступного рівняння [124]:

$$Q = ELA \cdot \sqrt{f_s^2 |\Delta T| + f_w^2 U^2}, \quad (2.8)$$

де f_s – параметр, що враховує процес інфільтрації через стелю та підлогу; f_w – параметр, що враховує наявність біля будівлі інших об'єктів; ELA – площа інфільтрації; ΔT – перепад температур між температурою всередині приміщення і зовні; U – швидкість вітру. При розрахунках вважалося, що параметри f_s, f_w дорівнюють 0,15 [124].

Нами запропоновано розв'язання задачі на базі рівняння (2.7) спільно з рівнянням переносу (2.1) або (2.4), тобто вирішується «пов'язана» задача – визначається концентрація небезпечної речовини для певного моменту часу в конкретній різницевій комірці і отримане значення концентрації стає рівним концентрації C_{np} в повітрі, що інфільтруються, для будівлі, що знаходиться в цьому осередку. На наступному розрахунковому кроці відбувається перерахунок поля концентрації в розрахунковій області, визначається нове значення величини C_{np} , знову розв'язується рівняння (2.7) і т.д. Для чисельного інтегрування рівняння (2.7) використовується метод Ейлера [97].

Необхідно підкреслити, що застосування даної моделі дозволяє проводити оцінку ризику ураження працівників в разі екстремальної ситуації в сховище ТРП і всередині промислових корпусів в робочих зонах з урахуванням приточної концентрації забруднювача, об'єму приміщень промислових будівель, швидкості вітру, наявності перешкод біля промислових будівель, інтенсивності повітрообміну, часу впливу.

2.3 Моделювання аеродинаміки вітрового потоку при екстремальній ситуації поблизу об'єкта надзвичайної ситуації

Для розрахунку поля швидкості вітрового потоку поблизу сховища або вагона при викиді з нього продуктів горіння ТРП у вигляді струменю (масштаб задачі «microscale») використовуються рівняння Нав'є-Стокса, записані в змінних Гельмгольца [69, 105]:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u \omega}{\partial x} + \frac{\partial v \omega}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right), \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega, \quad (2.10)$$

де Re – число Рейнольдса; $\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ – завихореність; $u = \frac{\partial \psi}{\partial y}$,

$v = \frac{\partial \psi}{\partial x}$ – компоненти вектора швидкості повітряного потоку; ψ – функція току.

Граничні умови прилипання на нерухомих стінках записані через функцію струму, мають вигляд [105]:

$$\psi|_{\Gamma} = \text{const}; \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = 0. \quad (2.12)$$

На вході вітрового потоку в розрахункову область задається профіль швидкості вітру $u=f(y)$ і відповідне значення функції струму ψ :

$$\psi|_{\text{вход}} = \psi(y).$$

На вході в розрахункову область завихореність покладається рівною $\omega = 0$.

На вихідній границі ставляться «м'які» граничні умови для функції струму і завихореності [69]. Для функції струму ця умова записується так:

$$\left. \frac{\partial \psi}{\partial n} \right|_{x=L} = 0,$$

де L – границя розрахункової області.

Розв'язання стаціонарної аеродинамічної задачі знаходиться методом встановлення розв'язку по часу t . У початковий момент $t=0$ для завихореності ставиться початкова умова типу $\omega|_{t=0}=0$.

В дисертаційній роботі використовується методологія визначення завихореності біля твердої границі, яка розроблена проф. Хрущем В.К. [105, 115].

Застосування даної моделі дозволяє моделювати вітровий потік з урахуванням в'язкості – важливого фізичного фактора, тобто в більш повному фізичному поданні.

Висновки до розділу 2

1. Для оцінки промислової безпеки при горінні ТРП, запропоновано використовувати диференціальне рівняння масопереносу.

2. Застосування рівняння масопереносу дозволяє прогнозувати наслідки екстремальної ситуації з урахуванням напрямку і швидкості вітру, інтенсивності емісії хімічно небезпечних речовин.

3. Застосування моделі інфільтрації забрудненого атмосферного повітря дозволяє проводити оцінку ризику ураження працівників в разі екстремальної ситуації в сховищі ТРП і всередині виробничих корпусів і будівель, в робочих зонах з урахуванням приточної концентрації забруднювача, об'єму приміщень промислових будівель, швидкості вітру, наявності перешкод біля промислових будівель, інтенсивності повітрообміну, часу впливу. Це дозволяє оперативно вирішувати «пов'язану»

задачу – оцінювати динаміку забруднення повітряного середовища усередині виробничих будівель з урахуванням руху хмари токсичного газу.

4. Застосування моделі аеродинаміки вітрового потоку поблизу сховища і залізничного вагона дозволяє моделювати вітровий потік з урахуванням в'язкості – важливого фізичного фактора, тобто в більш повному фізичному поданні.

5. Реалізація розглянутих в розділі прогнозних моделей здійснюється з використанням стандартної метеорологічної інформації та даних про параметри емісії, що є важливим для широкого застосування їх на практиці.

РОЗДІЛ 3

ПОБУДОВА ЧИСЕЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗУ ТА ОЦІНКИ НАСЛІДКІВ ПРИ ВИНИКНЕННІ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ СИТУАЦІЙ НА ОБ'ЄКТАХ ПО ЗБЕРІГАННЮ ТА ПЕРЕРОБЦІ ТРП

Проведені дослідження показали, що для прогнозу наслідків при горінні ТРП, необхідно розглянути побудову чисельних моделей, які ґрунтуються на застосуванні методу кінцевих різниць для чисельного інтегрування моделюючих рівнянь.

3.1 Чисельне розв'язання тривимірного рівняння розсіювання небезпечної речовини в повітрі робочої зони і на прилеглий до об'єкту території

Розглянемо апроксимацію похідних, що входять в рівняння масопереносу (2.1).

Конвективні похідні представимо у вигляді [71]:

$$\frac{\partial u C}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial v C}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y},$$

$$\frac{\partial w C}{\partial z} = \frac{\partial w^+ C}{\partial z} + \frac{\partial w^- C}{\partial z},$$

$$\text{де } u^+ = \frac{u+|u|}{2}; u^- = \frac{u-|u|}{2}; v^+ = \frac{v+|v|}{2}; v^- = \frac{v-|v|}{2}; w^+ = \frac{w+|w|}{2}; w^- = \frac{w-|w|}{2}.$$

Для апроксимації конвективних похідних використовуємо вирази [71]:

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j,k}^+ C_{i,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^+ C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j,k}^- C_{i+1,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1,k}^+ C_{i,j,k}^{n+1} - v_{i,j,k}^+ C_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1,k}^- C_{i,j+1,k}^{n+1} - v_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial w^+ C}{\partial z} \approx \frac{w_{i,j,k+1}^+ C_{i,j,k}^{n+1} - w_{i,j,k}^+ C_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z} = L_z^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial w^- C}{\partial z} \approx \frac{w_{i,j,k+1}^- C_{i,j,k+1}^{n+1} - w_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z} = L_z^- C^{n+1},$$

де $L_x^+ = \frac{u_{i+1,j,k}^+ C_{ijk}^{n+1} - u_{ijk}^+ C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x}$, $L_x^- = \frac{u_{i+1,j,k}^- C_{i+1,jk}^{n+1} - u_{ijk}^- C_{ijk}^{n+1}}{\Delta x}$, L_y^+ , L_y^- , L_z^+ , L_z^- –

позначення різницевих операторів при апроксимації конвективних похідних.

Другі похідні апроксимуємо наступними виразами [71]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \approx \mu_x \frac{C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{ijk}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_x \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \approx \mu_y \frac{C_{i,j+1,k}^{n+1} - C_{ijk}^{n+1}}{\Delta y^2} - \mu_y \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \approx \mu_z \frac{C_{i,j,k+1}^{n+1} - C_{ijk}^{n+1}}{\Delta z^2} - \mu_z \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{ij,k-1}^{n+1}}{\Delta z^2} = M_{zz}^- C^{n+1} + M_{zz}^+ C^{n+1}.$$

В даних виразах

$$M_{xx}^+ = -\mu_x \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2}, \quad M_{xx}^- = \mu_x \frac{C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2}, \quad M_{yy}^+, \quad M_{yy}^-, \quad M_{zz}^+, \quad M_{zz}^-$$
 –

позначення різницевих операторів при апроксимації других похідних.

З урахуванням цих позначень, різницевий аналог тривимірного рівняння переносу домішки матиме вигляд:

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ijk}^{n+1} - C_{ijk}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + L_y^+ C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} + L_z^+ C^{n+1} + L_z^- C^{n+1} + \sigma C_{ijk}^{n+1} = \\ & = \left(M_{xx}^+ C^{n+1} + M_{xx}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1} + M_{yy}^- C^{n+1} + M_{zz}^+ C^{n+1} + M_{zz}^- C^{n+1} \right). \end{aligned}$$

Похідна за часом представляється так: $\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t}$.

При інтегруванні на часовому інтервалі dt виконаємо розщеплення даного рівняння наступним чином [71]:

на першому часовому кроці $k = n + \frac{1}{4}$:

$$\begin{aligned} & \frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} \left(L_x^+ C^k + L_y^+ C^k + L_z^+ C^k \right) + \frac{\sigma}{4} C_{i,j,k}^k = \\ & = \frac{1}{4} \left(M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n + M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n + M_{zz}^+ C^k + M_{zz}^- C^n \right), \end{aligned} \quad (3.1)$$

на другому часовому кроці $k = n + \frac{1}{2}$; $c = n + \frac{1}{4}$:

$$\begin{aligned} & \frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} \left(L_x^- C^k + L_y^- C^k + L_z^- C^k \right) + \frac{\sigma}{4} C_{i,j,k}^k = \\ & = \frac{1}{4} \left(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c + M_{zz}^- C^k + M_{zz}^+ C^c \right), \end{aligned} \quad (3.2)$$

на третьому часовому кроці $k = n + \frac{3}{4}$; $c = n + \frac{1}{2}$ використовується формула (3.2),

на четвертому часовому кроці $k = n + 1$; $c = n + \frac{3}{4}$ використовується формула (3.1).

В якості обмежень відзначимо, що розглянута різницева схема має перший порядок точності.

На п'ятому часовому кроці розщеплення в дискретній моделі враховується вплив джерел на зміну концентрації домішки і розрахункова залежність на цьому кроці має вигляд:

$$\frac{C_{i,j,k}^{5^{n+1}} - C_{i,j,k}^{5^n}}{\Delta t} = \sum_{l=1}^N \frac{q_l(t^{n+1/2})}{\Delta x \Delta y \Delta z} \delta_l .$$

Функції δ_l тотожно дорівнюють нулю, крім комірок, де розташоване 1-е джерело забруднення.

Початкова умова для кожного рівняння, на кожному кроці розщеплення, записується у вигляді [71]:

$$\begin{aligned} C \Big|_{t=t^n}^1 &= C(x, y, z, t^n), \\ C \Big|_{t=t^n}^k &= C \Big|_{t=t^{n+1}}^{k-1}, \quad k = 2, 3, 4, \\ C(x, y, z, t^{n+1}) &= C \Big|_{t=t^{n+1}}^5, \end{aligned}$$

де C^1, C^k, C^5 – значення концентрації домішки на тому чи іншому розрахунковому кроці.

Розрахунок невідомого значення концентрації C на кожному кроці розглянутої різницевої схеми, здійснюється за явною формулою «біжучого» рахунку [71, 97].

3.2 Чисельне розв'язання двовимірного рівняння розсіювання небезпечної речовини в повітрі робочої зони і на прилеглий до об'єкту території

Розглянемо побудову неявної різницевої схеми для чисельного інтегрування 2-D рівняння масопереносу. Чисельне розв'язання даного рівняння буде визначатися в прямокутній області

$G = \{0 \leq t \leq T, 0 \leq x \leq X, 0 \leq y \leq Y\}$, розбитою рівномірною прямокутною сіткою. Невідоме значення концентрації домішки (небезпечна речовина, нейтралізатор) будемо визначати в центрі різницевих комірок.

Розглянемо апроксимацію похідних, що входять в дане рівняння. Похідну за часом апроксимуємо розділеної різницею «назад»:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t}.$$

Конвективні похідні запишемо у вигляді [3, 93, 105]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u C}{\partial x} &= \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}, \\ \frac{\partial v C}{\partial y} &= \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y}, \end{aligned}$$

$$\text{де } u^+ = \frac{u + |u|}{2}; \quad u^- = \frac{u - |u|}{2}; \quad v^+ = \frac{v + |v|}{2}; \quad v^- = \frac{v - |v|}{2}.$$

Апроксимуємо конвективні похідні розділеними різницями «проти потоку» на верхньому часовому шарі наступним чином [3, 105]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^+ C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{ij}^{n+1} - u_{ij}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial u^- C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1}, \\ \frac{\partial v^+ C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{ij}^{n+1} - v_{ij}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial v^- C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}. \end{aligned}$$

Компоненти швидкості u визначатимемо на вертикальних гранях різницевих комірок, а компоненти швидкості v – на горизонтальних гранях. Індeksi цих граней відповідають індексам комірок, розташованих правіше або вище відповідної границі.

Для апроксимації других похідних використовуються такі залежності [105]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}) \approx \mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_x \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial y}(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}) \approx \mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_y \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}.$$

В даних залежностях $L_x^+, L_x^-, L_y^+, L_y^-, M_{xx}^+, M_{xx}^-, M_{yy}^+, M_{yy}^-$ – умовні позначення різницевих операторів. Використовуючи ці позначення, запишемо різницеву апроксимацію рівняння переносу:

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + L_y^+ C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} + \sigma C_{ij}^{n+1} = \\ = (M_{xx}^+ C^{n+1} + L_{xx}^- C^{n+1} + L_{yy}^+ C^{n+1} + L_{yy}^- C^{n+1}) + q_{ij} \delta_{ij}. \end{aligned}$$

Тут використано позначення $\delta_{i,j}$ – це число 1 чи 0, в залежності від того, розташоване чи ні в різницевій комірці "i,j" джерело забруднення.

Виконаємо розщеплення отриманого різницевого рівняння на чотири різницевих рівняння наступним чином [105]:

на першому часовому кроці розщеплення $k = \frac{1}{4}$:

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n + M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l; \end{aligned} \quad (3.3)$$

на другому часовому кроці розщеплення $k = n + \frac{1}{2}$, $c = n + \frac{1}{4}$:

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l; \end{aligned} \quad (3.4)$$

на третьому часовому кроці розщеплення $k = n + \frac{3}{4}$, $c = n + \frac{1}{2}$:

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l; \end{aligned} \quad (3.5)$$

на четвертому часовому кроці розщеплення $k = n+1$, $c = n + \frac{3}{4}$:

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l. \end{aligned} \quad (3.6)$$

У дискретному вигляді дельта-функція Дірака $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$ «розмазується» на одну різницеву комірку, тому в різницевих співвідношеннях використовується залежність $\bar{q}_l = \frac{q_{ij}}{\Delta x \Delta y}$.

На кожному кроці розщеплення (3.3)-(3.6) шаблон різницевих рівнянь має трикутну форму на верхньому часовому шарі, тому невідоме значення функції C можна легко знайти за методом «біжучого» рахунку [71, 105]. Гранична умова для концентрації домішки на твердій стінці $\frac{\partial C}{\partial n} = 0$ реалізується за рахунок використання фіктивних комірок.

Поставлені граничні умови забезпечують єдність розв'язку крайової задачі [93].

3.3 Чисельне розв'язання аеродинамічної задачі

Для розрахунку швидкості вітрового потоку поблизу сховища чи залізничного вагона з ТРП використовуються рівняння Нав'є-Стокса. Розрахунок даних рівнянь виконується на прямокутній різницевій сітці. Функція струму визначається в вузлах різницевої сітки, завихореність – в центрах різницевих комірок, компонента швидкості u – на вертикальних,

компонента швидкості v – на горизонтальних сторонах різницевих комірок. Схематично такий розподіл показано на рис.3.1. Сітку такого роду (рис.3.1.) називають рознесеною [105].

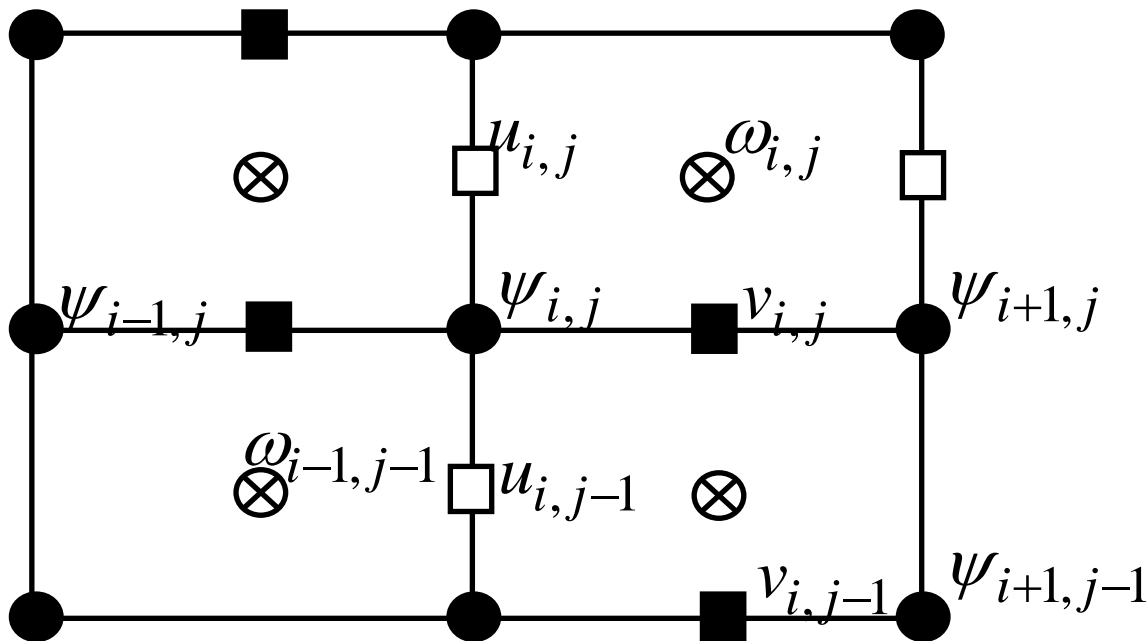


Рисунок 3.1 – Схема рознесеною сітки для розрахунку течій повітря в змінних ω , ψ

При чисельному інтегруванні рівняння Пуассона визначається також завихореність ω в комірках, що примикають до твердих стінок області, де використовуються умови $\frac{\partial \psi}{\partial n} = 0$. Функція ω визначається лише у внутрішніх різницевих комірках.

Запишемо поперемінно-трикутну різницеву схему для чисельного розв'язання рівняння (3.1) [105]. Представимо швидкість перенесення у

вигляді суми двох знакопостійних величин $u = u^+ + u^- = \frac{u + |u|}{2} + \frac{u - |u|}{2}$,

$v = v^+ + v^- = \frac{v + |v|}{2} + \frac{v - |v|}{2}$, і замінимо конвективні похідні односторонніми

розділеними різницями проти потоку [105]:

$$\frac{\partial u^+ \omega}{\partial x} \approx \Lambda_x^+ \omega = \left(u_{i+1,j}^+ \omega_{i,j} - u_{i,j}^+ \omega_{i-1,j} \right) / \Delta x, \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial u^- \omega}{\partial x} \approx \Lambda_x^- \omega = (u_{i+1,j}^- \omega_{i+1,j} - u_{i,j}^- \omega_{i,j}) / \Delta x,$$

$$\frac{\partial v^+ \omega}{\partial y} \approx \Lambda_y^+ \omega = (v_{i,j+1}^+ \omega_{i,j} - v_{i,j}^+ \omega_{i,j-1}) / \Delta y,$$

$$\frac{\partial v^- \omega}{\partial y} \approx \Lambda_y^- \omega = (v_{i,j+1}^- \omega_{i,j+1} - v_{i,j}^- \omega_{i,j}) / \Delta y.$$

Другі похідні будемо апроксимувати на двох часових шарах [105]:

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \approx L_{xx}^+ \omega - L_{xx}^- \omega = (-\omega_{i,j} + \omega_{i-1,j}) / \Delta x^2 + (\omega_{i+1,j} - \omega_{i,j}) / \Delta x^2, \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \approx L_{yy}^+ \omega - L_{yy}^- \omega = (\omega_{i,j-1} - \omega_{i,j}) / \Delta y^2 + (\omega_{i,j+1} - \omega_{i,j}) / \Delta y^2,$$

де в подальшому різницеві оператори L_{xx}^+ , L_{xx}^- , L_{yy}^+ , L_{yy}^- будуть визначатися на різних розрахункових шарах. Замінюючи похідні розділеними різницями (3.7), (3.8), отримуємо наступну різницеву схему [105]:

$$\begin{aligned} & \frac{\omega_{i,j}^{n+1} - \omega_{i,j}^n}{\Delta t} + (\Lambda_x^+ + \Lambda_x^- + \Lambda_y^+ + \Lambda_y^-) (\omega^{n+1} \xi + (1-\xi) \omega^n) = \\ & = \frac{1}{\text{Re}} (L_{xx}^+ + L_{xx}^- + L_{yy}^+ + L_{yy}^-) (\omega^{n+1} \xi + (1-\xi) \omega^n) \end{aligned} \quad (3.9)$$

або

$$\begin{aligned} & \left((E + \Delta t \xi) (\Lambda_x^+ + \Lambda_x^- + \Lambda_y^+ + \Lambda_y^-) - \frac{\Delta t}{\text{Re}} \xi (L_{xx}^+ + L_{xx}^- + L_{yy}^+ + L_{yy}^-) \right) \omega^{n+1} = \\ & = \left(E - \Delta t (1-\xi) (\Lambda_x^+ + \Lambda_x^- + \Lambda_y^+ + \Lambda_y^-) + \frac{\Delta t}{\text{Re}} (1-\xi) (L_{xx}^+ + L_{xx}^- + L_{yy}^+ + L_{yy}^-) \right) \omega^n. \end{aligned}$$

Різницева схема (3.9) при $\xi = 1/2$ має другий порядок точності за часовою координатою, однак для визначення невідомих ω^{n+1} необхідно вирішувати систему алгебраїчних рівнянь великої розмірності.

Запишемо різницеву схему розщеплення так, щоб забезпечити другий порядок точності за часом [105]:

$$\begin{aligned}
& \left(E + \frac{\Delta t}{2} (\Lambda_x^+ + \Lambda_y^+) - \frac{\Delta t}{2 \operatorname{Re}} (L_{xx}^+ + L_{yy}^+) \right) \omega^{n+1/2} = \\
& = \left(E - \frac{\Delta t}{2} (\Lambda_x^- + \Lambda_y^-) + \frac{\Delta t}{2 \operatorname{Re}} (L_{xx}^- + L_{yy}^-) \right) \omega^n; \\
& \left(E + \frac{\Delta t}{2} (\Lambda_x^- + \Lambda_y^-) - \frac{\Delta t}{2 \operatorname{Re}} (L_{xx}^- + L_{yy}^-) \right) \omega^{n+1} = \\
& = \left(E - \frac{\Delta t}{2} (\Lambda_x^+ + \Lambda_y^+) + \frac{\Delta t}{2 \operatorname{Re}} (L_{xx}^+ + L_{yy}^+) \right) \omega^{n+1/2}.
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Введемо позначення операторів [105]:

$$\Lambda_1 = \frac{1}{2} (\Lambda_x^+ + \Lambda_y^+) - \frac{1}{2 \operatorname{Re}} (L_{xx}^+ + L_{yy}^+), \quad \Lambda_2 = \frac{1}{2} (\Lambda_x^- + \Lambda_y^-) - \frac{1}{2 \operatorname{Re}} (L_{xx}^- + L_{yy}^-),$$

і перепишемо поперемінно-трикутну схему (3.10) в цілих кроках [105]:

$$\begin{aligned}
\omega^{n+1} &= (E + \Delta t \Lambda_2)^{-1} (E - \Delta t \Lambda_1) (E + \Delta t \Lambda_1)^{-1} (E - \Delta t \Lambda_2) \omega^n = \\
&= \left(E - 2\Delta t (\Lambda_1 + \Lambda_2) + 2\Delta t^2 (\Lambda_1^2 + \Lambda_1 \Lambda_2 + \Lambda_2 \Lambda_1 + \Lambda_2^2) + O(2\Delta t^3) \right) \omega^n.
\end{aligned}$$

При $\xi = 1/2$ вираз (3.9) записується так:

$$(E + \Delta t (\Lambda_1 + \Lambda_2)) \omega^{n+1} = (E - \Delta t (\Lambda_1 + \Lambda_2)) \omega^n$$

або

$$\begin{aligned}
\omega^{n+1} &= (E + \Delta t (\Lambda_1 + \Lambda_2))^{-1} (E - \Delta t (\Lambda_1 + \Lambda_2)) \omega^n = \\
&= \left(E - 2\Delta t (\Lambda_1 + \Lambda_2) + 2\Delta t^2 (\Lambda_1 + \Lambda_2)^2 + O(\Delta t^3) \right) \omega^n.
\end{aligned}$$

Це розкладання збігається з точністю до доданків $O(\Delta t^3)$ з поперемінно-трикутною схемою розщеплення (3.10). Отже, схема розщеплення (3.10) має другий порядок точності за часовою координатою з урахуванням того, що різницеві оператори Λ_1 і Λ_2 некомутативні.

Такий же розрахунок застосовується для комірок, що примикають до границі виходу з розрахункової області G . Це викликано тим, що рівняння параболічного типу і в рамках прийнятої математичної моделі (3.7), (3.8) на структуру течії в області G впливають збурення, розташовані і поза розрахункової області. Тому передбачається, що збурення на вхідний і

вихідній границях області G не можуть поширюватися за рахунок дифузії, число Рейнольдса $Re \rightarrow \infty$ для повітряного потоку, що знаходиться поза розрахункової області [104]. Тоді на вході завихореність повинна бути задана так, щоб наближено характеризувати течію повітряного потоку до границі входу, зокрема можна вважати $\omega = 0$. На виході з розрахункової області, за умови, що нормальна до границі складова швидкості повітряного потоку позитивна, слід додатково допустити, що збурення ззовні не проникають всередину розрахункової області G .

Додаткові умови, що накладаються на швидкість повітряного потоку на виході, наприклад, умова, що кривизна ліній струму на виході дорівнює нулю $\frac{\partial v}{\partial x} = 0$, дозволяють визначити в прикордонних комірках величину завихореності ω [105]:

$$\left. \frac{\partial \psi}{\partial n} \right|_{x=L} = 0. \quad (3.11)$$

Для чисельного інтегрування рівняння Пуассона використовується метод ітерацій [105]. Для цього дане рівняння приводиться до еволюційного виду

$$\frac{\partial \psi}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \omega, \quad (3.12)$$

де η – фіктивний час. Функція $\psi(x, y, \eta)$, будучи розв'язком нестационарного рівняння (3.12), буде розв'язком рівняння Пуассона при $\eta \rightarrow \infty$ [116].

Використовувана різницева схема має вигляд [105]:

$$\frac{\psi_{ij}^{\ell+1} - \psi_{ij}^{\ell}}{\Delta \eta} = (L_{xx}^+ + L_{xx}^-) \frac{\psi^{\ell+1} - \psi^{\ell}}{2} + (L_{yy}^+ + L_{yy}^-) \frac{\psi^{\ell+1} - \psi^{\ell}}{2} + \tilde{\omega}_{ij}, \quad (3.13)$$

$$\tilde{\omega}_{ij} = \frac{1}{4} (\omega_{ij} + \omega_{i-1,j} + \omega_{i,j-1} + \omega_{i-1,j-1}).$$

Розщеплюючи це рівняння, отримуємо

$$\psi^{\ell+1/4} = \psi^{\ell} + \tilde{\omega} \frac{\Delta \eta}{2},$$

$$\begin{aligned} \left(E - \frac{\Delta\eta}{2}(L_{xx}^+ + L_{yy}^+)\right)\psi^{\ell+2/4} &= \left(E + \frac{\Delta\eta}{2}(L_{xx}^- + L_{yy}^-)\right)\psi^{\ell+1/4}, \\ \left(E - \frac{\Delta\eta}{2}(L_{xx}^- + L_{yy}^-)\right)\psi^{\ell+3/4} &= \left(E + \frac{\Delta\eta}{2}(L_{xx}^+ + L_{yy}^+)\right)\psi^{\ell+2/4}, \\ \psi^{\ell+1} &= \psi^{\ell+3/4} + \tilde{\omega}\frac{\Delta\eta}{2}. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Рекомендована величина ітераційного кроку [105]:

$$\Delta\eta = \frac{\Delta x^2 \Delta y^2}{(\Delta x^2 + \Delta y^2)}. \quad (3.15)$$

Невідомі $\psi^{\ell+2/4}$, $\psi^{\ell+3/4}$ визначаються у всіх внутрішніх вузлах методом «біжучого» рахунку.

Компоненти вектора швидкості повітряного потоку визначаються на вертикальних і горизонтальних гранях різницевих комірок по залежностям:

$$u_{ij} = (\psi_{i,j+1} - \psi_{ij})/\Delta y; v_{ij} = -(\psi_{i+1,j} - \psi_{ij})/\Delta x. \quad (3.16)$$

Гранична умова типу Неймана задовольняється в ході ітерацій за рахунок визначення завихореності і приграничних комірок за формулою:

$$\omega_{ij} = \frac{1}{2} \frac{(v_2 + v_3 - v_1 - v_4)}{\Delta x} - \frac{1}{2} \frac{(u_4 + u_3 - u_1 - u_2)}{\Delta y}, \quad (3.17)$$

де u_k, v_k – компоненти швидкості в вузлах різницевої сітки.

У формулі (3.17) для вузлів, розташованих на твердій стінці, в силу умови прилипання, швидкості дорівнюють нулю, а для внутрішніх вузлах сітки швидкості визначаються за формулами інтерполяції, що використовують розраховані значення компонент швидкості (3.16) на гранях комірок [105].

Розглянуті різницеві співвідношення зручні для програмування, тому що невідоме значення шуканої величини визначається за явною формулою «біжучого» рахунку.

3.4 Розробка пакетів програм для прогнозу і оцінки наслідків при виникненні екстремальних ситуацій, пов'язаних з горінням ТРП

Побудовані в роботі чисельні моделі відносяться до класу «diagnostic models». Це моделі, які враховують основні фізичні фактори, що впливають на розвиток екстремальної ситуації, і вимагають невеликих затрат комп'ютерного часу при практичній реалізації на комп'ютерах малої і середньої потужності (час розрахунку від декількох секунд до декількох хвилин). Призначення таких моделей – швидкий серійний розрахунок різноманітних сценаріїв екстремальної ситуації і діагностика інтенсивності забруднення навколишнього середовища. Моделі даного класу забезпечують оперативне визначення зон забруднення і соціального ризику для екстремальної ситуації, що моделюється.

Всі розроблені в даній роботі моделі реалізовані у вигляді прикладних програм (кодів) для проведення обчислювального експерименту на персональному комп'ютері. Розглянемо ці пакети.

1. Пакет програм «WALL-3». Даний пакет програм реалізує розрахунок розсіювання небезпечної речовини в повітрі на базі тривимірного рівняння переносу домішки в атмосфері (масштаб перенесення Local). Пакет програм включає в себе наступні підпрограми (модулі):

1. В2 – чисельний розрахунок розсіювання небезпечної речовини в повітрі на першому і четвертому кроці розщеплення;
2. В3 – чисельний розрахунок розсіювання небезпечної речовини в повітрі на другому і третьому кроці розщеплення;
3. В4 – реалізація граничних умов (для рівняння масопереносу);
4. В5 – розрахунок висоти підняття стовпа забруднювача в силу теплового підйому продуктів горіння;
5. В6 – розрахунок концентрації в точці розташування рецептора;
6. В7 – розрахунок зміни концентрації небезпечної речовини в повітрі під дією джерела емісії;

7. ВРР – друк результатів (поле концентрації, підзони, де концентрація перевищує допустиму величину);
8. В1.dat – файл введення даних, необхідних для проведення обчислювального експерименту. Це такі дані:
 - розміри розрахункової області;
 - координати розташування джерела емісії небезпечної речовини;
 - час, протягом якого відбувається емісія небезпечної речовини;
 - інтенсивність емісії тепла при горінні ТРП;
 - швидкість і напрям вітру;
 - швидкість гравітаційного осадження домішок;
 - значення коефіцієнта σ ;
 - положення рецептора;
 - значення ГДК для мігруючого в повітрі забруднювача.

Основні етапи алгоритму розв'язання задачі за допомогою даного пакету програм показані на рис.3.2.

Функціональні особливості пакета програм «WALL-3»:

1. Можливість розрахунку просторово-часового розподілу концентрації небезпечної речовини в повітрі.
2. Можливість врахування різних класів стабільності атмосфери.
3. Можливість врахування гравітаційного осідання домішки в повітрі.
4. Можливість врахування вимивання домішки опадами.
5. Врахування нерівномірного по висоті профілю швидкості вітру.
6. Можливість врахування розсіювання небезпечної речовини в повітрі від стовпа продуктів горіння.
7. Швидкість розрахунку (близько 10 с на розрахунок одного варіанта задачі).

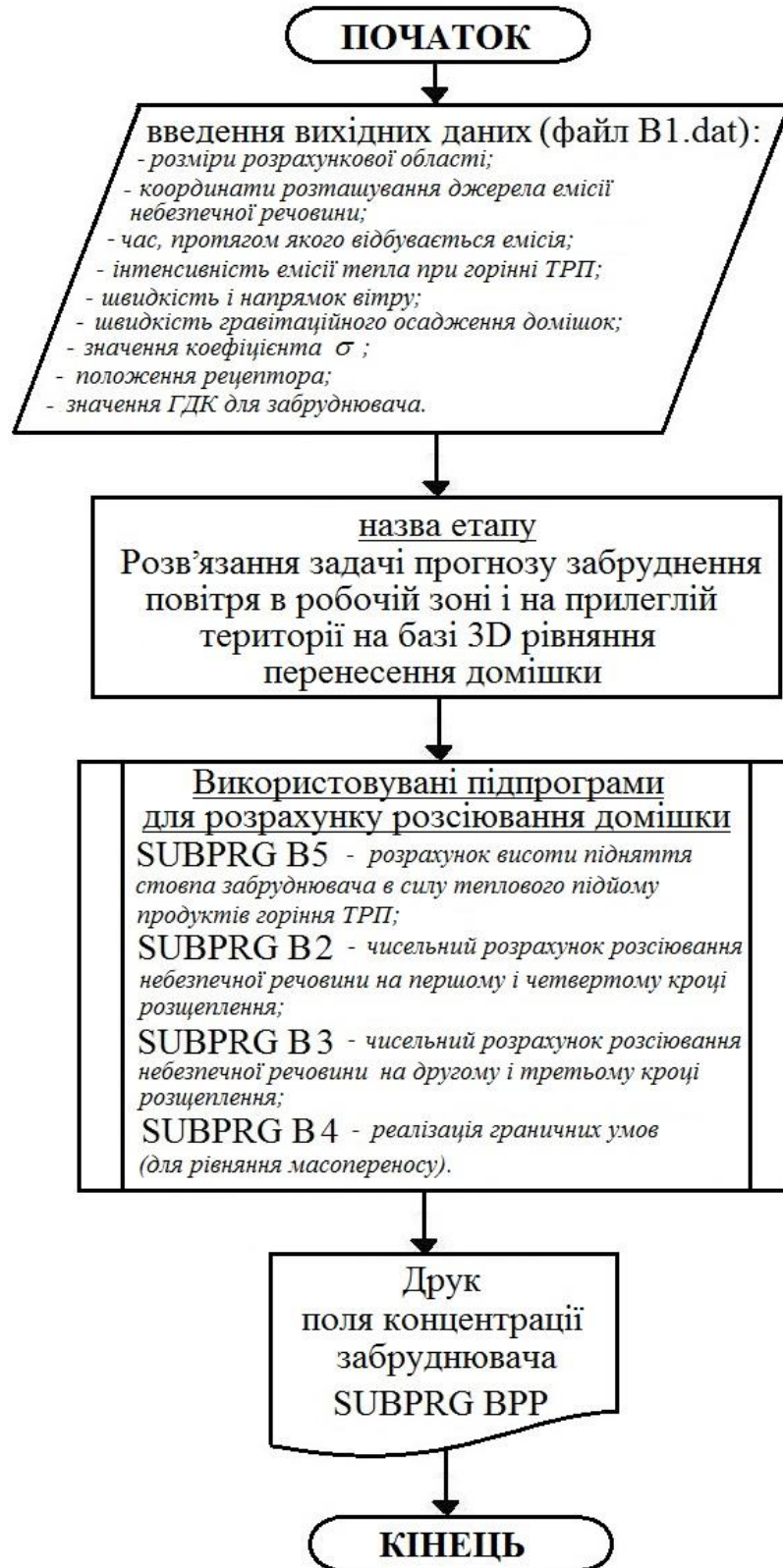


Рисунок 3.2 – Основні етапи алгоритму розв'язання задачі по прогнозу екстремальної ситуації на базі тривимірної чисельної моделі за допомогою пакету програм «WALL-3»

2. Пакет програм «WALL-1». Даний пакет програм реалізує розрахунок розсіювання небезпечної речовини в повітрі на базі двовимірного рівняння переносу домішки (масштаб перенесення «microscale» – профільна задача, і «urban» – планова задача). Пакет програм включає в себе наступні підпрограми:

1. ТВ2 – чисельний розрахунок розсіювання небезпечної речовини в повітрі на першому кроці розщеплення;
2. ТВ3 – чисельний розрахунок розсіювання небезпечної речовини в повітрі на другому кроці розщеплення;
3. ТВ4 – чисельний розрахунок розсіювання небезпечної речовини в повітрі на третьому кроці розщеплення;
4. ТВ5 – чисельний розрахунок розсіювання небезпечної речовини в повітрі на четвертому кроці розщеплення;
5. ТВ6 – реалізація граничних умов;
6. ТВPP – друк результатів (поле концентрації, підзони, де концентрація перевершує допустиму величину);
7. BROOM – розрахунок процесу забруднення повітряного середовища в приміщенні при його заповненні забрудненим атмосферним повітрям;
8. ZONA – розрахунок кількості постраждалих людей в зоні можливого хімічного ураження;
9. ТВ1.dat – файл введення даних, необхідних для проведення обчислювального експерименту. Це такі дані:
 - розміри розрахункової області;
 - координати розташування джерела емісії небезпечної речовини;
 - час, протягом якого відбувається емісія небезпечної речовини;
 - інтенсивність емісії тепла при горінні ТРП;
 - швидкість і напрям вітру;
 - положення рецептора;
 - значення ГДК для мігруючого в повітрі забруднювача;
 - стабільність атмосфери.

Функціональні особливості пакета програм «WALL-1»:

1. Можливість врахування різних класів стабільності атмосфери.
2. Можливість врахування гравітаційного осідання домішки в повітрі.
3. Можливість врахування вимивання домішки опадами.
4. Врахування нерівномірного по висоті профілю швидкості вітру (профільна задача).
5. Можливість розрахунку рівня забруднення повітряного середовища в будівлях при затікання в них забрудненого атмосферного повітря.
6. Можливість моделювання різних процесів емісії небезпечної речовини (напівбезперервний викид і т.п.).
7. Дозволяє аналізувати процес протікання екстремальної ситуації з урахуванням часу.
8. Швидкість розрахунку (2 с).

3. Пакет програм «WALL-2». Даний пакет програм реалізує розрахунок розсіювання небезпечної речовини в робочій зоні і прилеглій території на базі двовимірного рівняння переносу домішки в повітрі і рівнянь Нав'є-Стокса (розрахунок поля вітрового потоку в масштабі "microscale").

Пакет програм включає в себе наступні підпрограми:

1. ТВ2 – чисельний розрахунок розсіювання небезпечної речовини в повітрі на першому кроці розщеплення за часом;
2. ТВ3 – чисельний розрахунок розсіювання небезпечної речовини в повітрі на другому кроці розщеплення за часом;
3. ТВ4 – чисельний розрахунок розсіювання небезпечної речовини в повітрі на третьому кроці розщеплення за часом;
4. ТВ5 – чисельний розрахунок розсіювання небезпечної речовини в повітрі на четвертому кроці розщеплення за часом;
5. ТВ6 – реалізація граничних умов;
6. ZNS – розв'язання рівняння переносу завихореності;

7. GFNS – реалізація граничних умов для рівняння переносу завихореності;
8. ZNSPS – розв’язання рівняння для функцій струму;
9. ZCC – розрахунок хімічної взаємодії “HCl+нейтралізатор”;
10. ZKL – реалізація граничних умов для рівняння функції струму;
11. TB1.dat – файл введення даних, необхідних для проведення обчислювального експерименту. Це такі дані:
 - розміри розрахункової області;
 - координати розташування джерела емісії небезпечної речовини;
 - час на протязі якого відбувається емісія небезпечної речовини;
 - інтенсивність емісії тепла при горінні ТРП;
 - швидкість і напрям вітру;
 - положення рецептора;
 - форма будівлі на примагістральній території;
 - форма захисного валу.

Функціональні особливості пакета програм «WALL-2»:

1. Можливість врахування різних класів стабільності атмосфери.
2. Можливість врахування швидкості витікання струменя продуктів горіння ракетного палива з вагона або сховища і взаємодія цього струменя з будівлею, захисним валом.
3. Можливість врахування вимивання домішки опадами.
4. Врахування нерівномірного по висоті профілю швидкості вітру.
5. Швидкість розрахунку (5 хвилин).

Основні етапи алгоритму розв’язання задачі за допомогою даного пакету програм показані на рисунку 3.3.

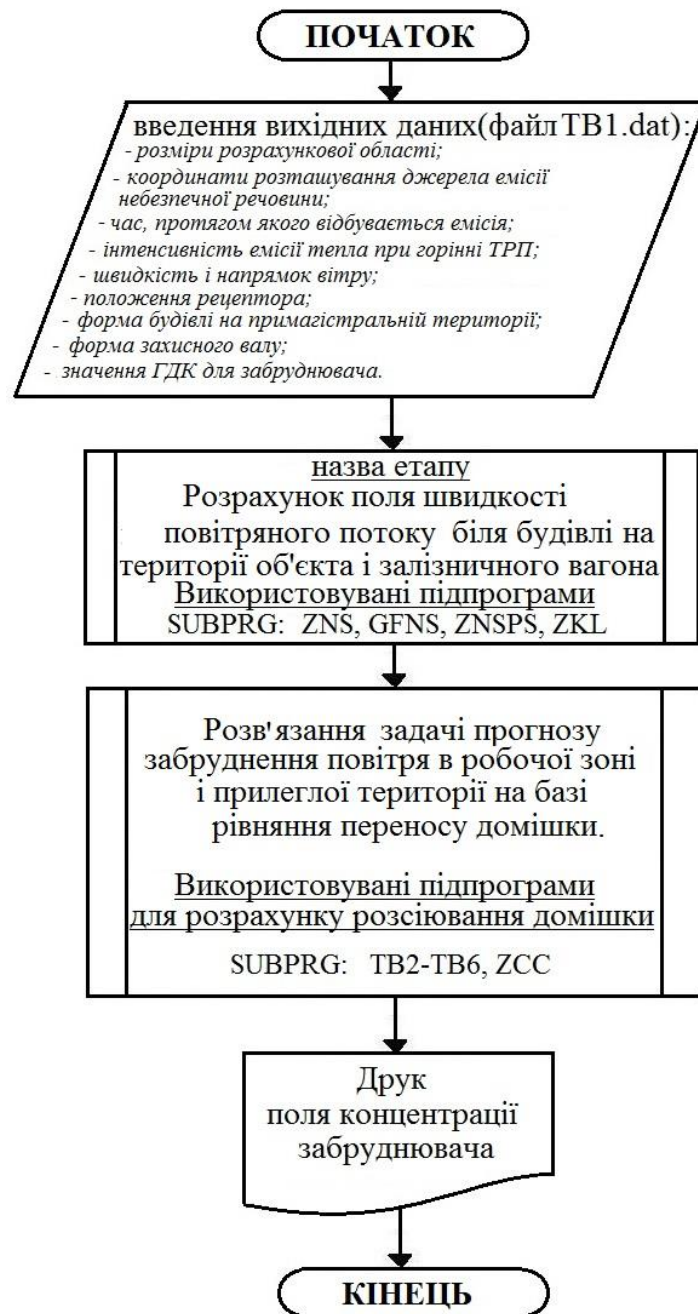


Рисунок 3.3 – Основні етапи алгоритму розв'язання задачі за допомогою пакету програм «WALL-2»

Для створення перерахованих пакетів програм використовувався ФОРТРАН.

На основі розроблених кодів створена інформаційно-моделююча система для вирішення задач перенесення забруднень при аварійних викидах небезпечних речовин. Основні блоки цієї системи показані на рисунку 3.4.

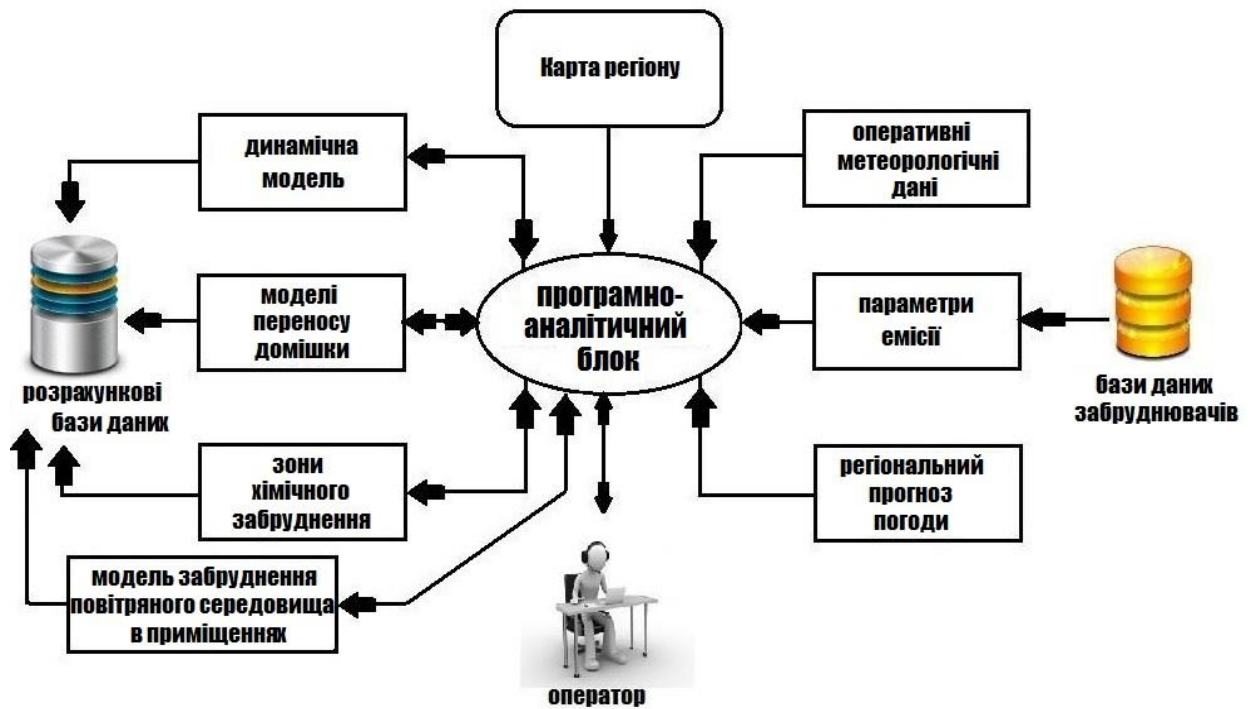


Рисунок 3.4 – Структура інформаційно-моделюючої системи

Як видно з рис.3.4 для роботи інформаційно-моделюючої системи в якості вихідних даних необхідні дані у вигляді карти області, для якої здійснюється прогноз рівня забруднення повітря, дані про вид забруднювача, інтенсивності емісії, метеорологічна інформація. Відзначимо, що для оцінки рівня забруднення атмосферного повітря можуть використовуватися швидкість і напрям вітру, отримані в результаті метеорологічного прогнозу або на основі оперативних метеорологічних даних, отриманих на постах вимірювання. Також слід підкреслити, що дана інформаційно-моделююча система може бути використана для прогнозу динаміки забруднення атмосферного повітря для іншого регіону країни і іншого джерела емісії небезпечних речовин.

Таким чином, нами розроблена інформаційно-моделююча система для прогнозу наслідків екстремальної ситуації, що супроводжується емісією хімічно небезпечних речовин, що дозволяє прогнозувати забруднення робочих зон і прилеглої території.

3.5 Тестування чисельних моделей

Для перевірки адекватності розроблених чисельних моделей і пакетів програм нами було проведено тестування. У даній роботі проводилося порівняння результатів розрахунку за розробленими чисельним моделям з відомими аналітичними і чисельними розв'язками інших авторів (таке порівняння в зарубіжній літературі називають «verification»), а також порівняння з даними проведених експериментів (таке порівняння називають в літературі «validation»). Важливість оцінки адекватності чисельної моделі шляхом порівняння розрахункових даних, отриманих з її допомогою з аналітичними і наближеними рішеннями, відзначається в роботах [4, 7, 68]. Одні тестові задачі, розглянуті в даному розділі, були призначені для оцінки адекватності численних моделей аеродинаміки, а інші – чисельних моделей процесів переносу. Розглянемо їх.

Тестова задача 1. Розглядається задача про розрахунок осьової швидкості повітря у щілинного відсмоктування, вбудованого в плоску стінку. Ця задача використовувалася в роботі [68] для порівняння результатів розрахунку швидкості по методу граничних інтегральних рівнянь і методу конформних відображень (двовимірна задача). Розрахункова схема до даної задачі показана на рисунку 3.5. Однією з граничних умов задачі була умова непроникності на границях ВСМ і АДМ. Другою умовою є величина швидкості в щілині на ділянці АВ ($v_{\infty} = 1 \text{ м/с}$). Цей перетин знаходиться на відстані одного калібру від входу в щілину ($AB=AD$). Ширина щілини становить $2B$. Для чисельного моделювання використовується модель течії в'язкої рідини. У дискретній моделі довжина бокової стінки зі щілиною дорівнювала $10*B$, сітка – 40×40 комірок.

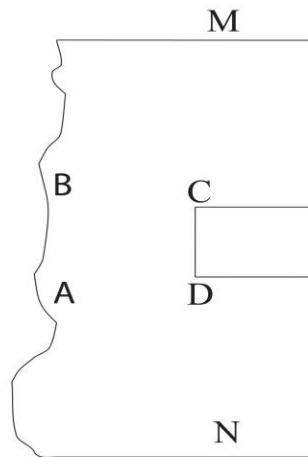


Рисунок 3.5 – Область течії у щілинного відсмоктування
в плоскій безмежній стінці

Таблиця 3.1

Порівняння розрахункових значень осьової швидкості повітря
(двовимірна задача)

х/В	Величина швидкості, розрахована за методом граничних інтегральних рівнянь [68]	Величина швидкості, розрахована за методом конформних відображень рівнянь [68]	Величина швидкості, розрахована за розробленою чисельною моделі (рівняння Нав'є- Стокса)
0,5	0,631	0,645	0,639
1,0	0,470	0,471	0,468
1,5	0,362	0,365	0,358
2,0	0,290	0,290	0,286
2,5	0,240	0,240	0,238
3,0	0,205	0,202	0,195
3,5	0,176	0,176	0,172
4,0	0,158	0,155	0,151

У таблиці 3.1 представлені розрахункові значення величини осьової швидкості повітря, отримані для даної задачі за розробленим чисельним алгоритмом і за допомогою зазначених вище методів [68].

З даної таблиці видно, що має місце задовільне узгодження розрахункових даних, отриманих за розробленою чисельною моделлю з даними, отриманими за допомогою інших розрахункових методів авторами роботи [68].

Тестова задача 2. Розглядається задача про міграцію домішки від безперервно діючого точкового джерела. Результати експериментального дослідження розподілу домішки поперек забрудненого струменя представлені в роботі [84]. На рисунках 3.6, 3.7 показані результати експериментального визначення концентрації домішки і результати розрахунку з використанням аналітичного розв'язку задачі [84]:

$$C(x, y, z) = \frac{2q}{4\pi x \sqrt{\mu_y \mu_z}} \exp \left[-\frac{uy^2}{4\mu_y x} - \frac{uz^2}{4\mu_z x} \right].$$

Експеримент в роботі [84] проводився при наступних вихідних даних:

$$u = 30 \text{ см/сек}; \quad q = 2.78 \cdot 10^{-2} \text{ г/сек}; \quad x_1 = 2.5 \cdot 10^3 \text{ см};$$

$$\mu_y = 7.5 \cdot 10^2 \text{ см}^2/\text{сек}; \quad \mu_z = 42 \text{ см}^2/\text{сек}, \quad z = 0.$$

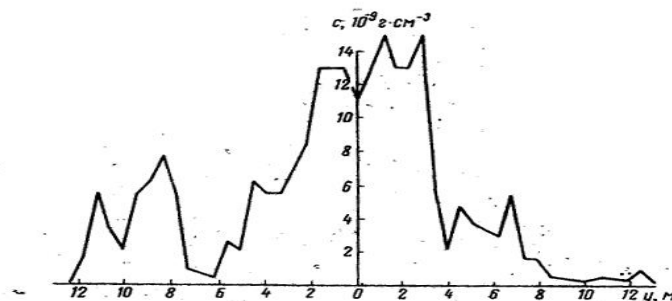


Рисунок 3.6 – Розподіл концентрації домішки (дані експерименту) в поперечному перерізі струменя на відстані $x=25$ м від джерела [84]

Слід мати на увазі, що коефіцієнти дифузії визначалися шляхом використання аналітичного розв'язку і його найкращого «узгодження» з даними експерименту [84].

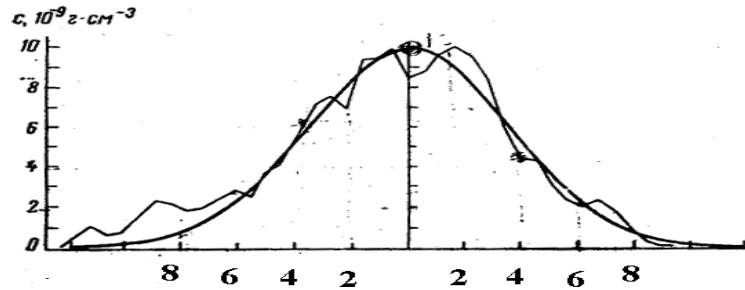


Рисунок 3.7 – Розподіл концентрації домішки в поперечному перерізі струменю на відстані $x=25$ м від джерела: ламана лінія – осереднений розподіл концентрації домішки за даними експерименту; гладка лінія – аналітичний розв'язок задачі [84].

Таблиця 3.2

Результати розрахунку величини концентрації поперек шлейфу, отримані за розробленою чисельною моделлю на основі аналітичного розв'язку

Y, см	Експеримент, концентрація, $C, \text{г/м}^3$	Концентрація, $C, \text{г/м}^3$ (аналітичний розв'язок)	Концентрація, $C, \text{г/м}^3$ (розв'язок на основі розробленої чисельної моделі)
0	$0,83 \cdot 10^{-8}$	$0,997 \cdot 10^{-8}$	$0,999 \cdot 10^{-8}$
150	$0,94 \cdot 10^{-8}$	$0,910 \cdot 10^{-8}$	$0,928 \cdot 10^{-8}$
200	$0,69 \cdot 10^{-8}$	$0,850 \cdot 10^{-8}$	$0,865 \cdot 10^{-8}$
300	$0,71 \cdot 10^{-8}$	$0,690 \cdot 10^{-8}$	$0,714 \cdot 10^{-8}$
400	$0,52 \cdot 10^{-8}$	$0,526 \cdot 10^{-8}$	$0,532 \cdot 10^{-8}$
500	$0,36 \cdot 10^{-8}$	$0,367 \cdot 10^{-8}$	$0,374 \cdot 10^{-8}$
600	$0,23 \cdot 10^{-8}$	$0,236 \cdot 10^{-8}$	$0,242 \cdot 10^{-8}$
700	$0,21 \cdot 10^{-8}$	$0,140 \cdot 10^{-8}$	$0,152 \cdot 10^{-8}$

В таблиці 3.2 наведені результати розрахунку величини концентрації домішки в поперечному перерізі струменя на відстані $x=25$ м від джерела за розробленою чисельною моделлю і отримані на основі аналітичного розв'язку. Тут же представлено осереднене значення концентрації домішки з експерименту Озмідова Р.В. [84].

Як видно з даної таблиці має місце задовільне узгодження між даними, отриманими на основі аналітичного розв'язку, за допомогою побудованого чисельного алгоритму і результатами експерименту.

Тестова задача 3. Розглядається розв'язання задачі про вдув струменю в плоску прямокутну камеру розміром $108\text{см} \times 150\text{см}$ (рис.3.8). Експериментальні дані по визначенню швидкості повітряного потоку в плоскій камері наведені в роботі [56]. У даній публікації представлені результати чисельного моделювання цієї течії на основі рівнянь Нав'є-Стокса і моделі Д. Смагоринського для замикання рівнянь з урахуванням турбулентності. Задача вирішувалася при таких вихідних даних – ширина вхідного і вихідного отворів становила 4 см, швидкість на вході – 60 см/с.

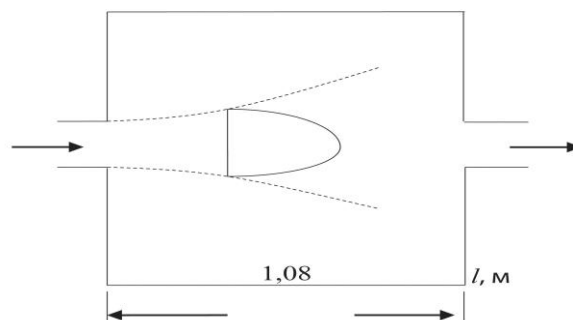


Рисунок 3.8 – Схема розрахункової області в задачі про вдув струменю в камеру

В таблиці 3.3 представлені результати розрахунку осьової швидкості потоку U_m , отримані за розробленою чисельною моделлю (рівняння Нав'є-Стокса в змінних Гельмгольца) на сітці 50×50 комірок і дані інших авторів.

Таблиця 3.3

Значення осьової швидкості в камері

Відстань від входу, м	0	0,2	0,4	0,6	1
Розрахунок за розробленим алгоритмом	0,6 м/с	0,45 м/с	0,38 м/с	0,36 м/с	0,30 м/с
Фізичний експеримент [56]	0,6 м/с	0,47 м/с	0,40 м/с	0,38 м/с	0,25 м/с
Розрахунок [56]	0,6 м/с	0,46 м/с	0,41 м/с	0,38 м/с	0,31 м/с

З наведеної таблиці можна бачити, що має місце задовільне узгодження розрахункових і експериментальних даних інших авторів з даними, отриманими на основі створеної чисельної моделі.

Тестова задача 4. Була вирішена тестова задача про стаціонарний викид домішки від точкового постійно діючого джерела. Аналітичний розв'язок задачі про викид від точкового постійно діючого джерела використовувався в роботі [4] для тестування чисельної моделі процесу перенесення домішки в повітрі. Аналітичний розв'язок задачі має вигляд [4]:

$$C = \frac{M}{4\pi x \sqrt{k_y k_z}} \exp\left(-\frac{Wy^2}{4k_y x}\right) \times \left\{ \exp\left[-\frac{W(z+H)^2}{4k_z x}\right] + \exp\left[-\frac{W(z-H)^2}{4k_z x}\right] \right\}.$$

Тестовий розрахунок в роботі [4] був виконаний при таких параметрах:

$$M=10^6 \text{ мг/с}; K_z=5 \text{ м}^2/\text{с};$$

$$W=4 \text{ м/с}; K_y=500 \text{ м}^2/\text{с};$$

$$Y=0; H=120 \text{ м};$$

$$Z=120 \text{ м} - \text{розрахунковий рівень.}$$

Результати розв'язання даної тестової задачі представлені в таблиці 3.4.

Значення концентрації C забруднювача на різній відстані від джерела

X , км	1	2	3	4
C , мг/м ³ (аналітичний розв'язок)	1,59	0,79	0,54	0,42
C , мг/м ³ (розрахунок за розробленою чисельною моделлю / розрахунок за чисельною моделлю [4])	1,77 /1,8	0,88 /0,9	0,63 /0,6	0,55 /0,5

З наведеної таблиці видно, що має місце задовільне узгодження розрахункових даних, отриманих на базі розробленої чисельної моделі і аналітичного розв'язку. Відзначимо, що в роботі [4] порівняння чисельних і аналітичних даних показано на графіку, тому в даній таблиці чисельні дані авторів з роботи [4] наведені з точністю одного знака після коми, оскільки визначити ці значення більш точно на графіку – важко.

Тестова задача 5. (експериментальне визначення швидкості в аеродинамічній трубі).

Для перевірки адекватності чисельної моделі, заснованої на рівняннях руху Нав'є-Стокса, було проведено фізичний експеримент з вимірювання швидкості потоку в аеродинамічній трубі (рис. 3.9).



Рисунок 3.9 – Аеродинамічна труба Т5: 1 – аеродинамічна труба;
2 – експериментальна установка; 3 – вимірювальне обладнання

Експеримент проводився в аеродинамічній трубі Т5, яка знаходиться в лабораторії аеродинаміки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Схема експериментальної установки наведена на рисунку 3.10.

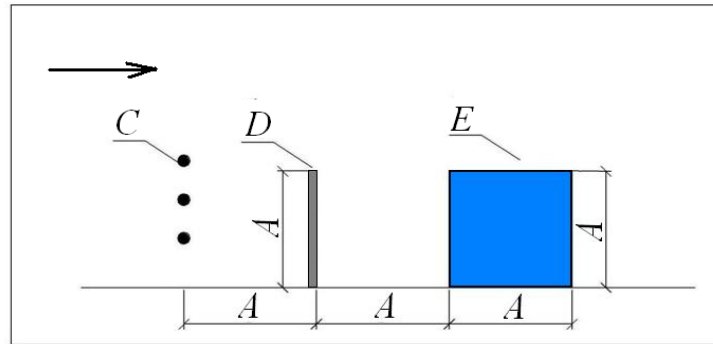


Рисунок 3.10 – Схема області, що моделюється: D – перешкода; E – модель будівлі (сховища); C – точки вимірювання ($A = 100\text{мм}$)

Розміщення моделей в робочій частині труби показано на рисунку 3.11.

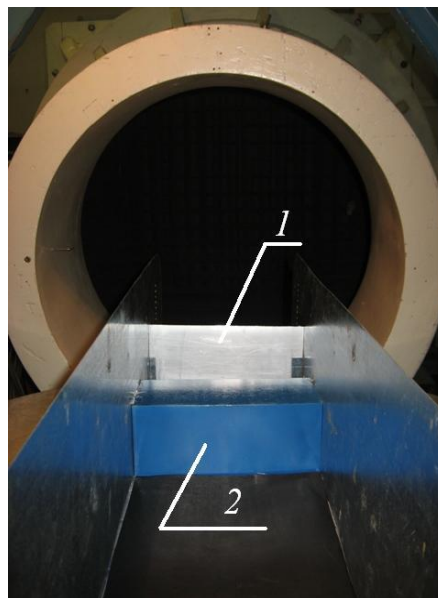


Рисунок 3.11а – Експериментальна установка, розміщення моделей в аеродинамічній трубі:

1 –перешкода; 2 – модель будівлі (сховища)

Робоча частина аеродинамічної труби Т5 виконана відкритою. Довжина робочої частини дорівнює 1115 мм, діаметр вихідного перетину сопла $D=750$ мм. Швидкість потоку вимірювалася за допомогою трубки Піто $d=8$ мм. Швидкість потоку в трубі при проведенні експерименту становила 16 м/с, тиск 745 мм.рт.ст., температура повітря 22°C .

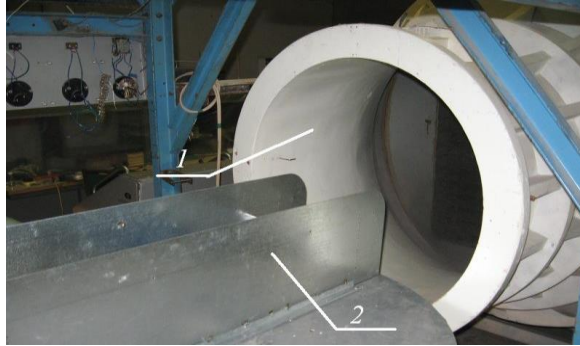


Рисунок 3.116 – Вид робочої частини аеродинамічної труби Т5:

1 – аеродинамічна труба; 2 – обмежувальні шайби

При проведенні експерименту проводилося вимірювання швидкості перед перешкодою (рис.3.10). Результати порівняння вимірних значень швидкості і розрахунку швидкості за розробленою чисельною моделлю показані в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Швидкість повітряного потоку перед перешкодою

Висота від основи	Розрахунок	Експеримент
10 мм	11,38 м/с	11,43 – 11,55 м/с
30 мм	11,66 м/с	11,71 – 11,79 м/с
50 мм	12,23 м/с	12,37 – 12,46 м/с
70 мм	13,05 м/с	13,11 – 13,16 м/с
90 мм	14,07 м/с	14,13 – 14,26 м/с

Як видно з представлених даних спостерігається задовільне узгодження розрахункових і експериментальних даних. На жаль, з причини відсутності обладнання для точкового вимірювання концентрації домішки, не було можливості для проведення експерименту з моделювання розсіювання домішки в умовах забудови в аеродинамічній трубі.

Тестова задача 6. (експериментальне визначення концентрації CO).

Також для підтвердження працездатності розроблених чисельних моделей нами в лабораторії гідравліки Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна був проведений експеримент. Експеримент був проведений по вимірюванню концентрації CO при горінні пластику типу полістиролу (при горінні сильно коптить, що в експерименті служить аналогом продуктів горіння ТРП), який знаходився всередині моделі сховища (рис.3.12). Модель сховища виконана в масштабі 1:30. Довжина моделі 1,5 м, ширина моделі 80 см, висота моделі 40 см. Моделювання здійснюється за числом Рейнольдса. Вважалося, що в реальному сховищі, при виникненні екстремальної ситуації, утворився отвір розміром 8 м*8 м. Швидкість газового потоку на виході – 5 м/с. Температура повітря 20⁰С. Визначимо числа Рейнольдса для природи і моделі.

Число Рейнольдса для природи становить:

$$Re_n = \frac{v_n \cdot \ell_n}{\nu_n} = \frac{5 \cdot 8}{1,51 \cdot 10^{-5}} = 26 \cdot 10^5,$$

де індекс «n» – відповідає природі.

Число Рейнольдса для моделі становить:

$$Re_m = \frac{v_m \cdot \ell_m}{\nu_m} = \frac{9 \cdot 0,3}{1,51 \cdot 10^{-5}} = 1,8 \cdot 10^5,$$

де індекс «m» – відповідає моделі.

Як ми бачимо з значень чисел Рейнольдса, в природі і на моделі реалізується турбулентний режим течії. Відомо, що домогтися збігу чисел Рейнольдса для моделі і природи, при розгляді задач аеродинаміки, практично

неможливо. Проте, на модельній установці реалізується турбулентний режим течії, що дозволяє з певним ступенем достовірності оцінювати результати експерименту. Розглядалася третина довжини будівлі, оскільки моделювався викид з бічної стінки сховища.

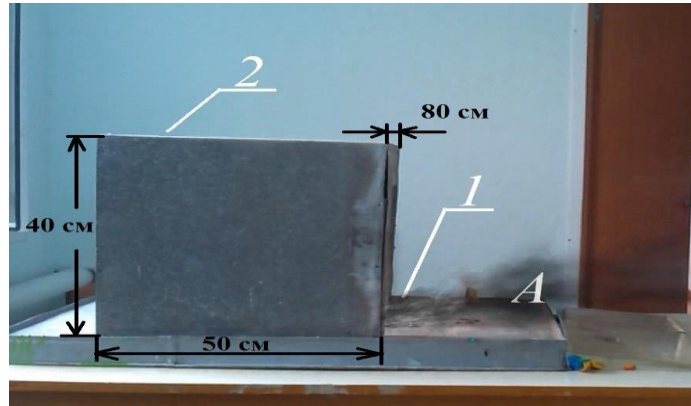


Рисунок 3.12 – Зона забруднення біля моделі сховища: 1 – вихід продуктів горіння від джерела емісії; 2 – модель сховища; А – зона забруднення перед моделлю вагона

В моделі будівлі сховища внутрішній отвір був наскрізним. Один отвір моделював вихід газового потоку продуктів горіння (рис.3.12), а біля другого отвору створювався повітряний потік за допомогою повітрорудки. Для вимірювання швидкості вихідного повітряного потоку з моделі сховища застосовувався анемометр GM 8908 з діапазоном вимірювання швидкості потоку повітря 0-30 м/с. Для вимірювання концентрації CO застосовувався газоаналізатор GD-3301, що дозволяє вимірювати концентрацію від 0 до 1000 ppm. Концентрація CO вимірювалася на різній відстані від моделі будівлі. Розрахунок концентрації CO виконувався на базі моделі течії в'язкого газу (рівняння Нав'є-Стокса).

Оскільки інтенсивність виділення CO при горінні пластику була невідома, то в чисельній моделі було припущено, що концентрація CO на виході з моделі будівлі становить 41 ppm (47,56 мг/м³) (при проведенні експерименту значення CO становило 36-41 ppm (41,76-47,56 мг/м³), для CO 1 ppm становить 1,16 мг/м³).

В таблиці 3.6 показано розрахункове значення концентрації CO і виміряне при проведенні експерименту.

Таблиця 3.6

Порівняння розрахункових і експериментальних даних концентрації CO

X, см	Концентрація CO, ppm	
	Експеримент	Розрахунок
0	36÷41 ppm (41,76÷47,56 мг/м ³)	41 ppm (47,56 мг/м ³)
15	14÷18 ppm (16,24÷20,88 мг/м ³)	22 ppm (25,52 мг/м ³)
25	4÷7 ppm (4,64÷8,12 мг/м ³)	9 ppm (10,44 мг/м ³)
35	1÷3 ppm (1,16÷3,48 мг/м ³)	4 ppm (4,64 мг/м ³)

З таблиці 3.6 можна зробити висновок про задовільне узгодження експериментальних і розрахункових даних, тим самим можна стверджувати, що проведене нами в роботі тестування дозволило оцінити адекватність отриманих результатів обчислювальних експериментів, на основі розроблених чисельних моделей і пакетів програм. Розбіжність результатів розрахунку з експериментом склало близько 15%.

Висновки до розділу 3

1. Представлено опис різницевих схем, які використовуються для чисельного розв'язання рівняння масопереносу і аеродинаміки. Особливістю даних різницевих схем є те, що розрахунок невідомого значення знаходиться за явною формулою. Це забезпечує просту програмну реалізацію чисельних моделей, що значно скорочує час розрахунку різноманітних аварійних сценаріїв в робочих зонах і на прилеглий території.

2. Розроблено інформаційно-моделюючу систему для прогнозу наслідків екстремальної ситуації, що супроводжується емісією хімічно небезпечних речовин, що дозволяє прогнозувати забруднення робочих зон і прилеглої території. Створені програми для практичної реалізації побудованих чисельних моделей. Вони засновані на модульному принципі, що забезпечує їх «гнучкість» при практичному застосуванні – немає необхідності внесення змін до програми при вирішенні іншої задачі з розглянутого класу.

3. Тестування побудованих моделей підтвердило їх адекватність і можливість застосування для вирішення задач з оцінки промислової безпеки на хімічно небезпечних об'єктах при екстремальних ситуаціях.

РОЗДІЛ 4

ПРОГНОЗ І ОЦІНКА НАСЛІДКІВ ГОРІННЯ ТРП НА ТЕРИТОРІЇ ПРОМИСЛОВОГО ОБ'ЄКТА АБО ПРИ ЙОГО ТРАНСПОРТУВАННІ

З урахуванням проведених досліджень і розроблених моделей виникла необхідність оцінки рівня забруднення на території ПХЗ і залізничної станції «Павлоград-1» в разі екстремальної ситуації в сховищі ТРП або при його транспортуванні. Для отримання такої оцінки застосовані розроблені чисельні моделі.

4.1 Прогноз і оцінка забруднення території об'єкта в масштабі «microscale» при горінні ТРП в сховищі

Нами при дослідженні вивчалися процеси забруднення території об'єкта при горінні ТРП в сховищі в декількох масштабах перенесення забруднювача в повітрі. Перший масштаб перенесення забруднювача – "microscale". Він характеризується розглядом перенесення домішки в масштабі порядку декількох десятків метрів. В рамках такого масштабу вирішувалася задача по оцінці розмірів і інтенсивності зони забруднення безпосередньо поблизу сховища і захисного валу, який влаштований біля сховища (рис.4.1).



Рисунок 4.1 – Загальний вигляд зони розміщення сховищ ТРП:

1 – сховища ТРП, 2 – захисний вал

Процес розрахунку забруднення в повітрі робочої зони та прилеглої території нами розбивався на два кроки. На першому кроці вирішувалася задача по визначенню поля швидкості повітряного потоку, з урахуванням взаємодії газового потоку, що виходить зі сховища з вітровим потоком і з захисним валом. Для вирішення цієї задачі застосовуються рівняння Нав'є-Стокса (розділ 2). Після визначення поля швидкості повітряного потоку вирішувалася задача про перенесення забруднюючої речовини (розглядається розсіювання HCl – продукту горіння ТРП) в повітрі. Для моделювання цього процесу використовувалося двовимірне рівняння переносу хімічно небезпечних речовин в повітряному просторі (профільна задача). Розрахунок виконувався при наступних вихідних даних: значення швидкості вітру на фіксованій висоті Y_1 (в розрахунках приймається, що це висота 10м) дорівнює 5м/с; $m \approx 1$, $n = 0.15$ – параметри. Розміри розрахункової області 41.6м*42м; висота валу – 12м; висота сховища – 12 м; $\sigma = 0$.



Рисунок 4.2а – Сховище ТРП:

- 1 – будівля сховища (висота – 12 м; довжина – 44 м; ширина – 25 м);
2 – захисний вал

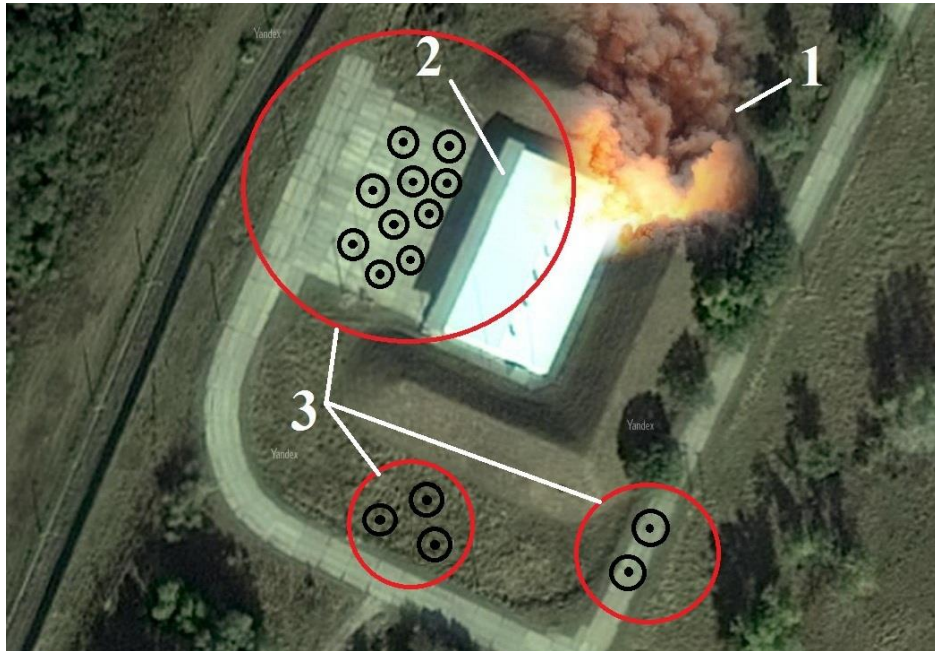


Рисунок 4.2б – Сховище ТРП: 1 – емісія продуктів горіння ТРП;
 2 – будівля сховища ТРП (висота – 12 м; довжина – 44 м; ширина – 25 м);
 3 – розташування робочих зон

Усередині сховища розташовується палаючий корпус РД РС-22, з якого виходить струмінь газу, що містить продукти горіння. Модельний експеримент даної екстремальної ситуації показаний на рисунку 3.12. Всередині моделі сховища знаходився палаючий пластик типу полістирол, що імітує горіння ТРП.

Чисельно цей процес моделюється наступним чином. Всередині будівлі задається різницева комірка, з якої виходить потік зі швидкістю V_{gas} , який містить забруднювач (хлористий водень) з максимальною концентрацією (в безрозмірному вигляді), $Re \approx 33 \cdot 10^5$. При розрахунку числа Рейнольдса в якості масштабів вибиралося швидкість вітрового потоку, висота будівлі і кінематичний коефіцієнт в'язкості при температурі 20°C.

Швидкість струменя газового потоку, що виходить зі сховища – продуктів згоряння прийнята рівною $V_{gas} = 20 \text{ м/с}$. Розрахунок перенесення забруднювача здійснюється як усередині будівлі сховища, так і зовні. Швидкість перенесення забруднювача всередині будівлі визначається швидкістю газового потоку V_{gas} і дифузиею, а зовні будівлі – швидкістю перенесення, яка формується в процесі взаємодії газового потоку, що виходить з будівлі і вітрового потоку + атмосферна дифузія. Коефіцієнти дифузії по обох напрямках всередині будівлі розраховуються за залежністю $\mu \approx k \cdot u$, де $u = V_{gas}$ – швидкість газового потоку, $k = 0.1$. В рамках такої постановки розглянуто вирішення низки задач на базі коду «WALL-2».

Задача 1. *Прогноз локального забруднення повітря в робочій зоні біля будівлі сховища ТРП при наявності захисного валу.*

На наведених нижче рисунках показана динаміка забруднення повітря робочої зони поблизу сховища для різних моментів часу при загорянні ТРП. Ці дані дозволяють визначити форму зони забруднення, її розміри і інтенсивність.

Видно, що з плином часу формується складна зона забруднення, викликана впливом захисного валу на процес поширення забруднювача. Висота зони забруднення повітря робочої зони для моменту часу 5 с після початку емісії складе близько 22 м, а для моменту часу 50 с – більше 40 м, тобто відбувається її стрімке зростання. Найбільш інтенсивне забруднення повітряного середовища спостерігається усередині сховища і на відстані близько 15-20 м від нього, тобто біля валу. На цій відстані концентрація знижується тільки до величини порядку 94% від максимальної концентрації всередині сховища. За захисним валом концентрація забруднювача становить величину порядку 66%, тобто – інтенсивність забруднення зменшилася приблизно на 34% в порівнянні з концентрацією всередині сховища.

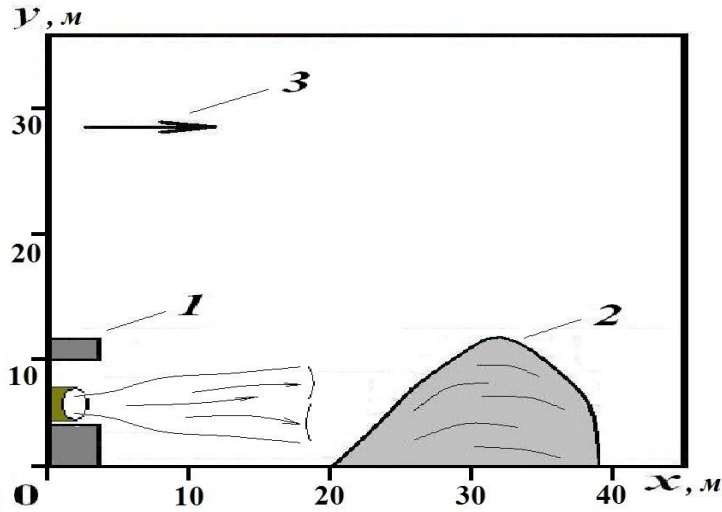


Рисунок 4.3– Схема розрахункової області: 1 – сховище ТРП; 2 – захисний вал; 3 – напрямок вітру

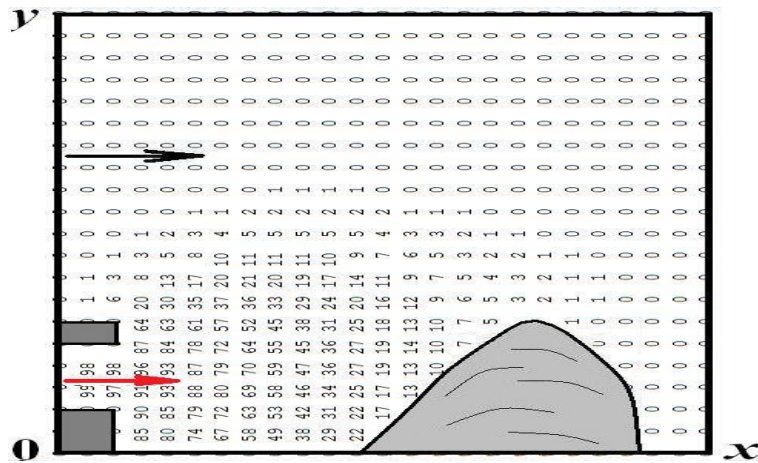


Рисунок 4.4 – Забруднення повітря робочої зони для моменту часу $t=5c$ (швидкість вітру на висоті Y_1 дорівнює 5м/с)

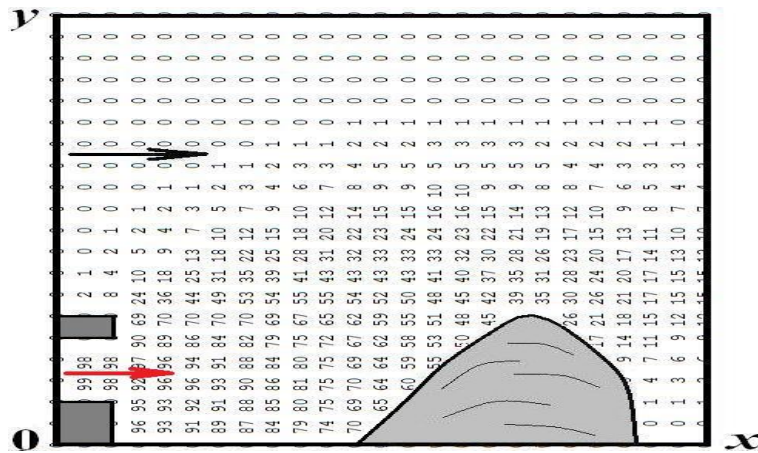


Рисунок 4.5 – Забруднення повітря робочої зони для моменту часу $t=10c$ (швидкість вітру на висоті Y_1 дорівнює 5м/с)

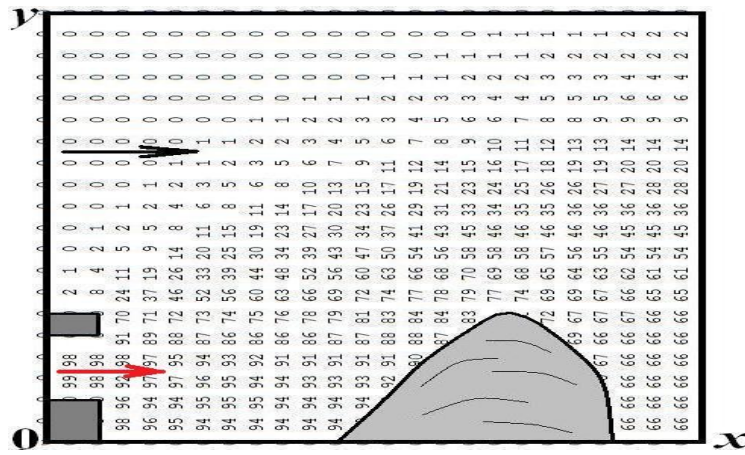


Рисунок 4.6 – Забруднення повітря робочої зони для моменту час $t=50\text{с}$
(швидкість вітру на висоті Y_1 дорівнює 5м/с)

На рис.4.7 показана зона забруднення повітря робочої зони при меншій швидкості вітру – $u_1 = 3\text{ м/с}$.

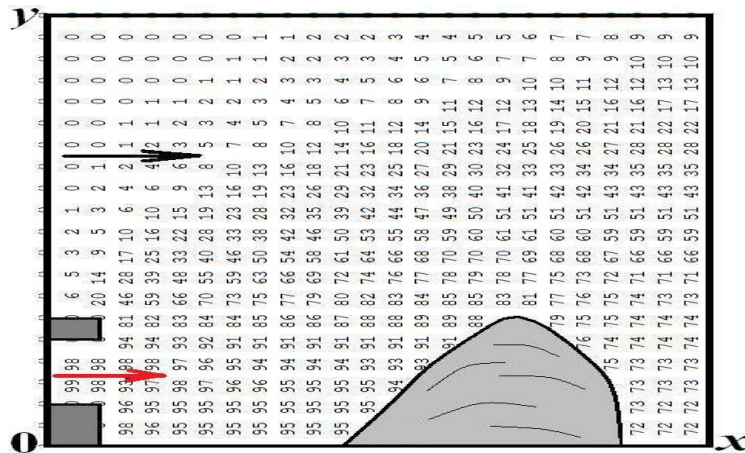


Рисунок 4.7 – Забруднення повітря робочої зони для моменту час $t=50\text{с}$
(швидкість вітру на висоті Y_1 дорівнює 3м/с)

Задача 2. Прогноз локального забруднення повітря робочої зони при наявності захисного валу і витоку продуктів згоряння з двох отворів в будівлі сховища.

Розглядається сценарій, коли викид продуктів горіння ТРП відбувається через два отвори в будівлі – через отвір в бічній стінці і через отвір в даху (рис.4.8).

Результати обчислювального експерименту наведені на наступних рисунках. На них показана зона забруднення для різних моментів часу [24].

Видно, що з плином часу формується складна картина забруднення. Домінуючий вплив на формування зони забруднення надають струмінь газу, що виходить через отвір в стіні, струмінь газу, що виходить через отвір в даху – не настільки сильно впливає на формування зони забруднення. Видно, що концентрація забруднювача поблизу отвори на даху становить приблизно 40% від концентрації біля джерела забруднення. У той же час концентрація забруднювача біля отвору в стіні становить приблизно 90% від концентрації біля джерела. Для зазначеного моменту часу концентрація забруднювача за захисним валом становить приблизно 13% від концентрації біля джерела всередині сховища.

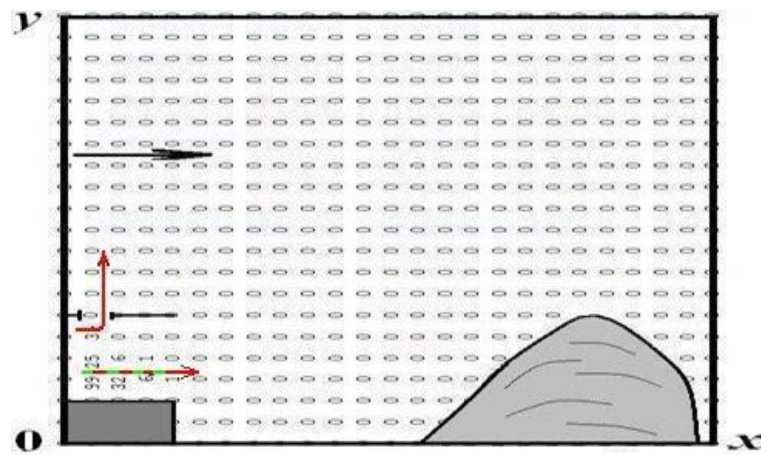


Рисунок 4.8 – Забруднення повітря робочої зони для моменту часу $t=0,1\text{c}$ (швидкість вітру на висоті Y_1 дорівнює 5м/с)

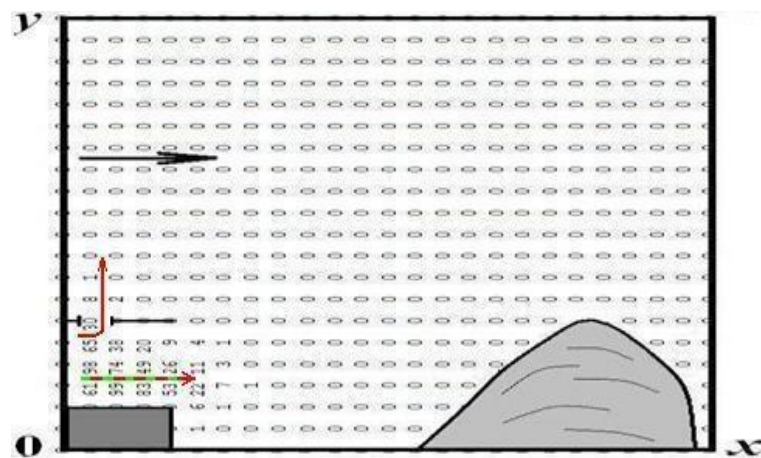


Рисунок 4.9 – Забруднення повітря робочої зони для моменту часу $t=0,5\text{c}$ (швидкість вітру на висоті Y_1 дорівнює 5м/с)

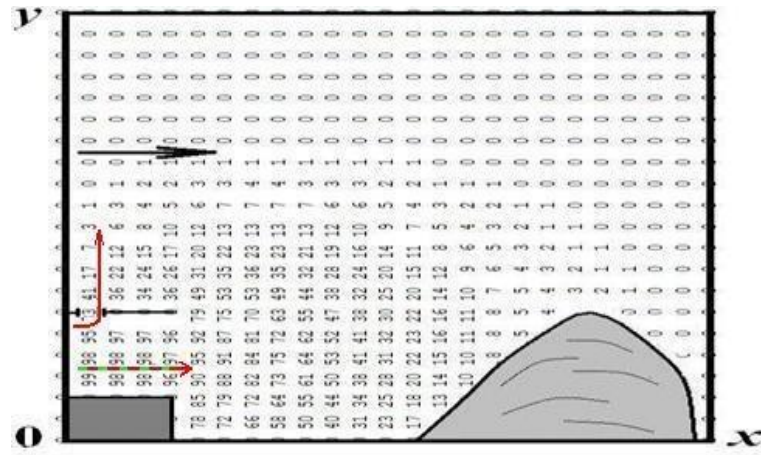


Рисунок 4.10 – Забруднення повітря робочої зони для моменту часу $t=6s$
(швидкість вітру на висоті Y_1 дорівнює 5м/с)

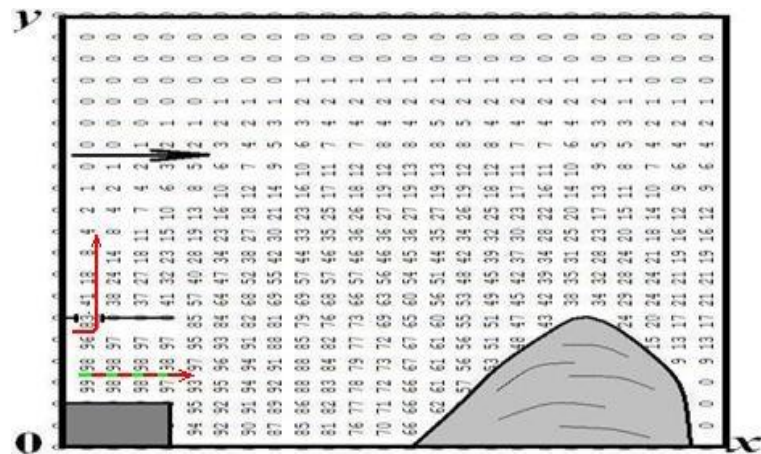


Рисунок 4.11 – Забруднення повітря робочої зони для моменту часу $t=12s$
(швидкість вітру на висоті Y_1 дорівнює 5м/с)

Результати вирішення даної задачі показують, що розроблена чисельна модель дозволяє розраховувати процес розсіювання небезпечної речовини в складній постановці – взаємодія вітрового потоку з будівлею сховища і з продуктами горіння ракетного палива, що виходять з різних отворів в будівлі, які можуть утворитися в результаті аварії в сховищі і подальшим загорянням ТРП.

Задача 3. *Прогноз локального забруднення повітря робочої зони при наявності захисного валу і додаткового захисного екрана.*

Нижче наведені результати обчислювального експерименту з оцінки впливу додатково встановленого біля захисного валу екрану, для локального

зниження рівня забруднення повітря робочої зони при емісії небезпечних речовин зі сховища.

Обчислювальний експеримент, на базі розробленої моделі, був проведений для наступних сценаріїв:

1. Викид продуктів згоряння відбувається зі сховища, при цьому на навітряній стороні вала розміщений захисний екран (висота екрану 16м).
2. Викид продуктів згоряння відбувається зі сховища, при цьому на вершині валу розміщений захисний екран.

На наведених нижче рисунках показані результати розрахунку зони забруднення повітря поблизу сховища для даних сценаріїв. На першому рисунку, для порівняння, представлена зона забруднення повітря робочої зони при відсутності захисного екрана. Представлені дані дозволяють визначити форму зони забруднення, її розміри і інтенсивність.

Видно, що при відсутності екрану концентрація забруднювача за валом, на рівні органів дихання людини становить приблизно 72% від концентрації забруднювача біля джерела емісії (рис.4.12). Найбільш інтенсивне забруднення повітряного середовища спостерігається усередині сховища і на відстані близько 15-20м, тобто біля валу.

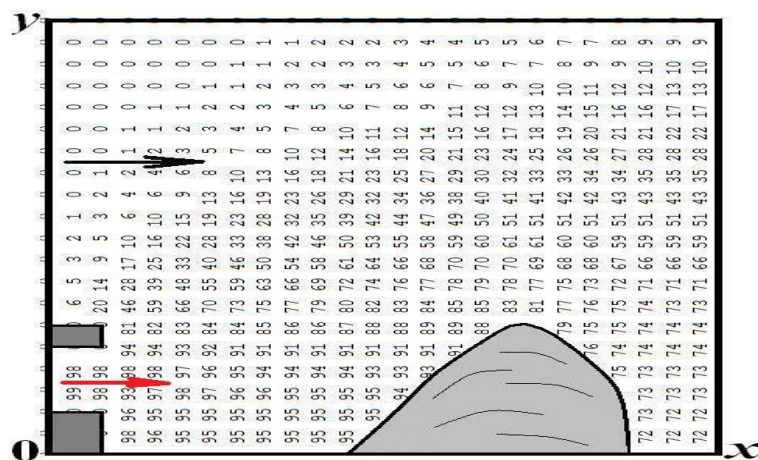


Рисунок 4.12 – Забруднення повітря робочої зони для моменту часу $t=47$ с

Для першого сценарію (рис.4.13; 4.14), за захисним валом концентрація забруднювача становить величину порядку 50%, тобто – інтенсивність забруднення зменшилася приблизно вдвічі в порівнянні з концентрацією всередині сховища (рис.4.14).

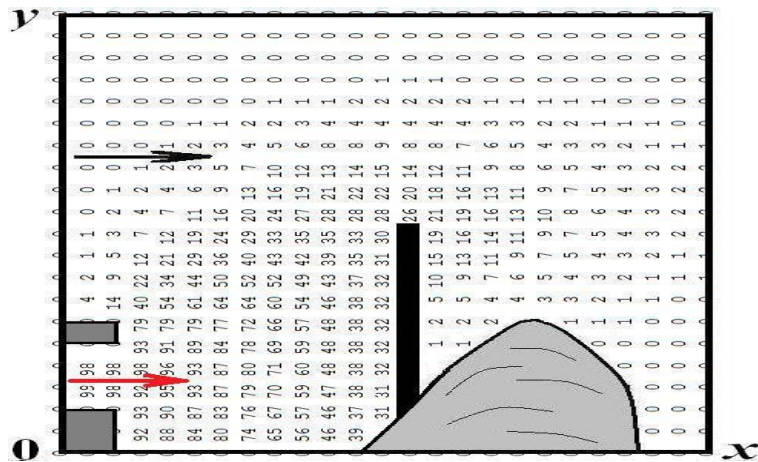


Рисунок 4.13 – Забруднення повітря робочої зони для моменту часу $t=8с$ (перший сценарій)

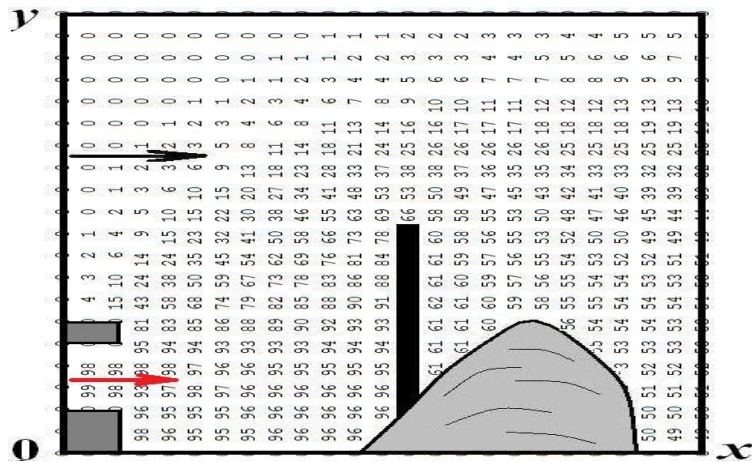


Рисунок 4.14 – Забруднення повітря робочої зони для моменту часу $t=45с$ (перший сценарій)

Безпосередньо перед екраном концентрація забруднювача становить величину порядку 96%, а за екраном – 61% від концентрації поблизу джерела емісії. Тобто застосування екрану призвело до локального зниження концентрації приблизно на 30%. На рис.4.13 добре видно, як за екраном

формується зона зі зниженою концентрацією – ця зона більш «розріджена візуально» і концентрація забруднювача там, для обраного моменту часу, становить 1-5%.

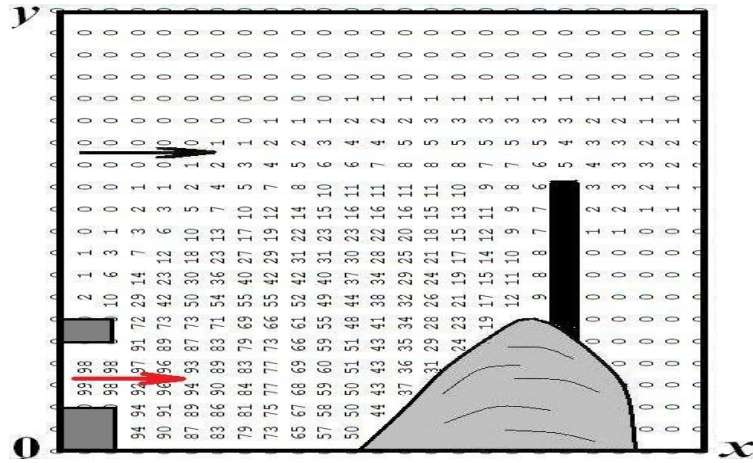


Рисунок 4.15 – Забруднення повітря робочої зони для моменту часу $t=8с$ (другий сценарій)

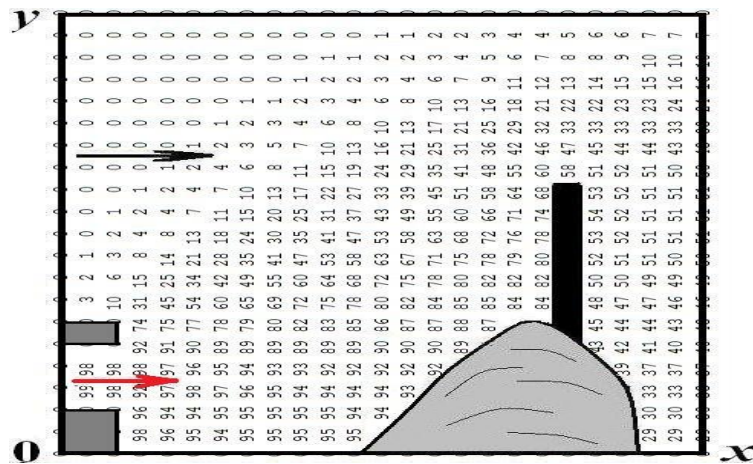


Рисунок 4.16 – Забруднення повітря робочої зони для моменту часу $t=45с$ (другий сценарій)

Для другого сценарію (рис.4.15; 4.16), за захисним валом концентрація забруднювача становить величину порядку 30%, тобто – інтенсивність забруднення за валом зменшилася приблизно втричі в порівнянні з концентрацією всередині сховища (рис.4.16). Для кількісної оцінки рівня забруднення робочої зони за валом (місце знаходження охорони) був

зроблений перерахунок розміру концентрації в розмірному вигляді. Для розглянутого третього сценарія концентрація за валом, при наявності екрана, складе для HCl порядку $C = 135 \text{ г/м}^3$. Без наявності екрану значення цієї концентрації складе близько $C = 325 \text{ г/м}^3$. Результати такого моделювання свідчать про те, що в зоні знаходження охорони концентрація HCl буде значно перевищувати ГДК для розглянутих випадків. Це означає, що співробітники охорони повинні мати обов'язково засоби індивідуального захисту.

На наступному рисунку представлена зона забруднення поблизу фізичної моделі будівлі сховища, всередині якої відбувався процес горіння пластику, при цьому, на певній відстані від «будівлі» перебував захисний екран. Розглядалася третина довжини будівлі, оскільки моделювався викид з бічної стінки сховища.

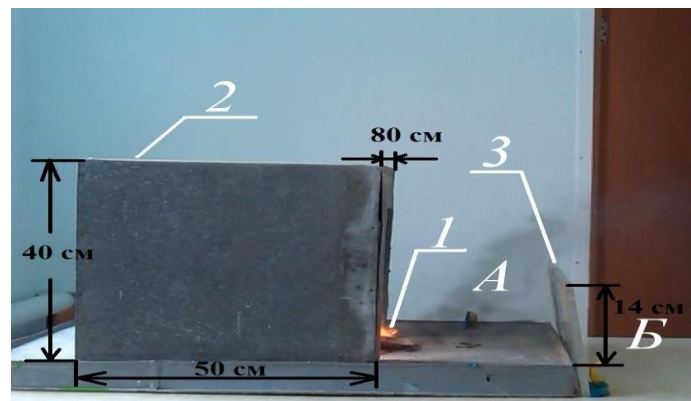


Рисунок 4.17 – Зона забруднення біля моделі сховища: 1 – вихід продуктів горіння від джерела емісії; 2 – модель будівлі сховища; 3 – екран; А – зона забруднення перед екраном; Б – зона за екраном, де немає забруднення

З рисунку 4.17 добре видно, що область, яка перебуває за екраном (зона Б) – візуально «вільна» від забруднення. Це підтверджує висновок про те, що установка захисного екрану дозволить локально знизити інтенсивність

забруднення повітря робочої зони біля сховища при можливій екстремальній ситуації в ньому.

На закінчення відзначимо, на основі обчислювального експерименту показано, що вал, що знаходиться біля сховища дозволяє локально знизити рівень забруднення повітря робочої зони, а також рекомендовано застосування захисного екрана, встановленого на валу, для додаткового ефекту зниження можливих негативних ефектів при горінні ТРП.

4.2 Оцінка наслідків екстремальної ситуації в сховищі ТРП на забруднення робочих зон на території ПХЗ

Оскільки сховища з ТРП знаходяться безпосередньо на території ПХЗ, то необхідно виконати оцінку наслідків екстремальної ситуації на даному об'єкті, яка призводить до виникнення горіння ТРП. Оскільки чинником ураження в даній екстремальній ситуації є концентрація токсичної речовини, то необхідно визначити концентрацію небезпечної речовини в місцях перебування персоналу (на відкритій місцевості і всередині виробничих приміщень). У цьому параграфі розглядається вирішення такої прогнозової задачі.

Задача 1.

Розглядається застосування коду «WALL-3» для прогнозу концентрації *HCl* біля промислового корпусу на території ПХЗ в разі загоряння ТРП в першому сховищі (рис.4.18). Розглядається робоча зона біля промислового корпусу, показаного на рис.4.18 позицією 2. Даний корпус розташовується біля залізничної магістралі, де на відкритій місцевості знаходяться робочі з поточного утримання та ремонту колії, оглядачі – ремонтники вагонів.



а)

б)

Рисунок 4.18 – Розміщення сховищ на території заводу: а) – загальний вигляд: А – місце розташування сховищ з ТРП, Б – територія ПХЗ; б) схема розрахункової області: 1 – сховище з ТРП; 2 – розташування рецептора (виробничий корпус на території заводу)

При проведенні розрахунків враховувався нерівномірний профіль швидкості вітру і залежність вертикального коефіцієнта атмосферної дифузії від висоти і стабільності атмосферного повітря.

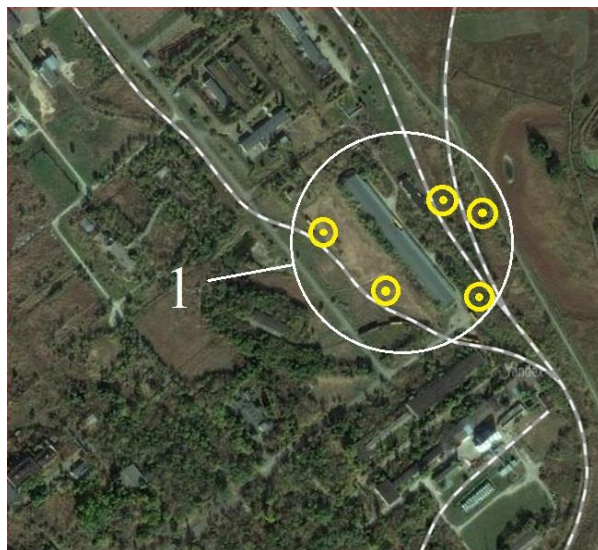


Рисунок 4.19 – Положення виробничого корпусу біля залізничної колії (ПХЗ): 1 – розташування робочих зон біля виробничого корпусу на території ПХЗ

Врахування здійснювалося за допомогою профілю швидкості вітру і вертикального коефіцієнта дифузії по залежностям, які наведені в пункті 2.2. У цьому ж параграфі представлені залежності по визначенню інших коефіцієнтів турбулентної атмосферної дифузії, які використовувалися при прогнозі. Також враховується підняття стовпа продуктів горіння ТРП на висоту h .

Вихідні дані для проведення обчислювального експерименту були такі: тривалість емісії HCl – 15мін; інтенсивність емісії 4000 г/с; швидкість вітру $u_1=4,5$ м/с; довжина розрахункової області 3500 м, ширина розрахункової області 2500 м, висота розрахункової області 500 м; $\sigma = 0$. Для врахування висоти підняття стовпа продуктів горіння ТРП в чисельній моделі використовувалася емпірична залежність наведена в параграфі 2.2. У дискретній моделі висота струменя задавалася за допомогою маркерів i , в кожній різницевій комірці, зазначеної маркером, знаходилося точкове джерело, що вводиться в модель за допомогою дельта-функції.

На рис.4.20а представлена зона забруднення повітря робочих зон і території ПХЗ для моменту часу $t = 550$ с після початку горіння палива.

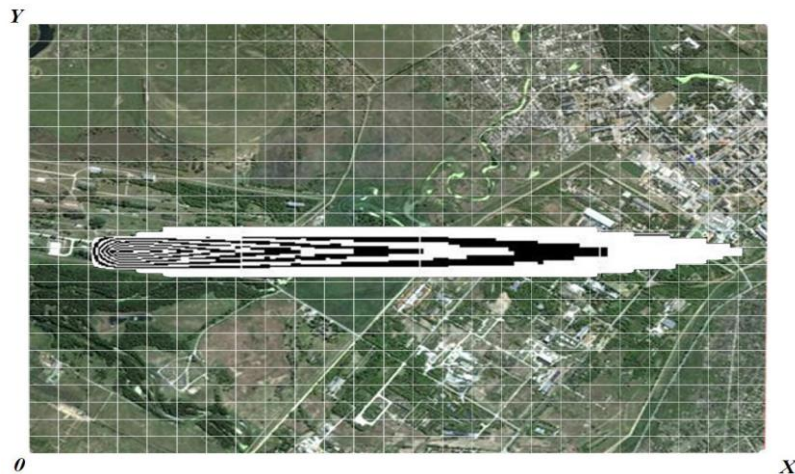


Рисунок 4.20а – Зона забруднення для моменту часу $t = 550$ с
(рівень $z=12$ м)

З представленого рисунка видно, що через короткий проміжок часу після початку горіння ТРП шлейф забрудненого повітря швидко досягає

розташування виробничих будівель на території заводу і виникає загроза масштабного забруднення навколишнього середовища.

Для оцінки ризику ураження людей на території підприємства була розрахована концентрація HCl біля робочих зон промислового корпусу на території заводу (рис.4.18, позиція 2). Будівля знаходиться на відстані 1600 м від місця емісії хімічно небезпечних речовин (друге сховище). Результати розрахунку наведені на рис.4.20б. На цьому рисунку також показано перевищення значення прогнозованої концентрації над $ГДК = 5 \text{ мг/м}^3$.

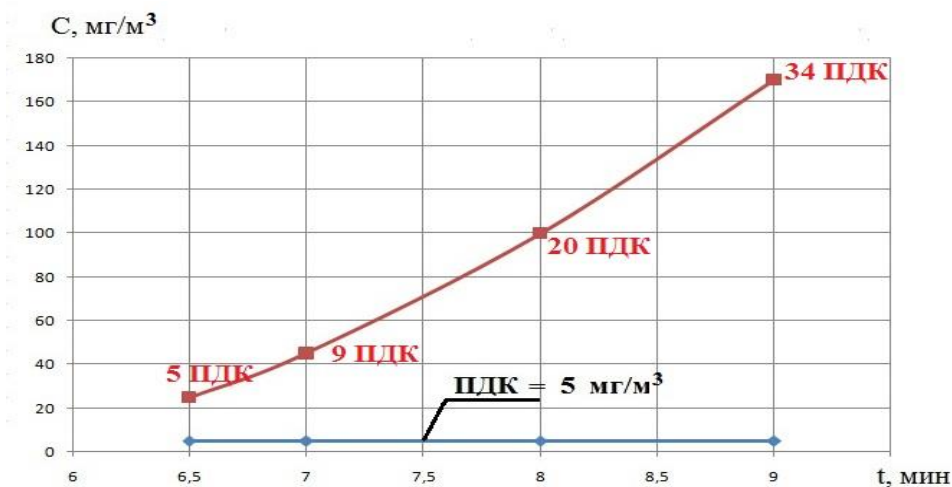


Рисунок 4.20б – Зміна концентрації HCl перед будівлею з плином часу (рівень $z=12\text{м}$)

Як видно з даного рисунка за короткий проміжок часу після аварії рівень забруднення повітря різко перевищить допустиме значення, що створить загрозу токсичного ураження персоналу в робочих зонах на території ПХЗ.

Відзначимо, що на отримання рішення задачі потрібно близько 10с комп'ютерного часу.

Задача 2. Розглядається прогноз рівня забруднення повітряного середовища біля промислового корпусу, показаного позицією 1 на рис.4.21. Моделюється екстремальна ситуація, що виникла в сховищі №2 (рис. 4.21). Прогноз виконується не тільки для відкритої місцевості, а й для виробничого

приміщення, що знаходиться в цьому корпусі. Для прогнозу використовується код «WALL-1». Вихідні дані для проведення обчислювального експерименту були такі: тривалість емісії HCl – 15мін; інтенсивність емісії 4000 г/с; швидкість вітру $u=5$ м/с; довжина розрахункової області 2000 м, ширина розрахункової області 2700 м, висота осереднення 500 м; $\sigma = 0$. Для моделювання процесу забруднення повітряного середовища в приміщенні при інфільтрації в нього забрудненого повітря використовуються рівняння (2.7), (2.8). Значення коефіцієнтів атмосферної дифузії по обох напрямках – $7 \text{ м}^2/\text{с}$; об'єм приміщення – 51 м^3 ; кратність повітрообміну $n \approx 4$; площа щілин в кімнаті, через які відбувається інфільтрація забрудненого зовнішнього повітря – 0.0055 м^2 ; різниця в температурі зовнішнього атмосферного повітря і повітря всередині приміщення – 5°C .

На наступних рисунках показано формування зони забруднення для різних моментів часу після загоряння ТРП. Добре видно, що шлейф, який формується, має форму «язика» і витягується за напрямком вітру.



Рисунок 4.21 – Схема розрахункової області:

- 1 – сховище з ТРП (джерело емісії токсичної речовини);
- 2 – розташування рецептора (робочі зони біля виробничого корпусу на території заводу); 3 – напрямок вітру

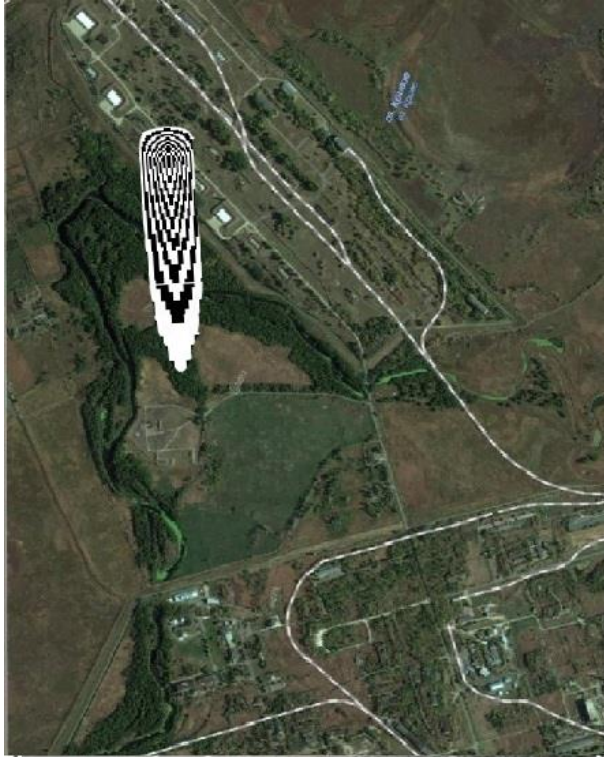


Рисунок 4.22 – Зона забруднення для моменту часу $t=96\text{с}$



Рисунок 4.23 – Зона забруднення для моменту часу $t=420\text{с}$

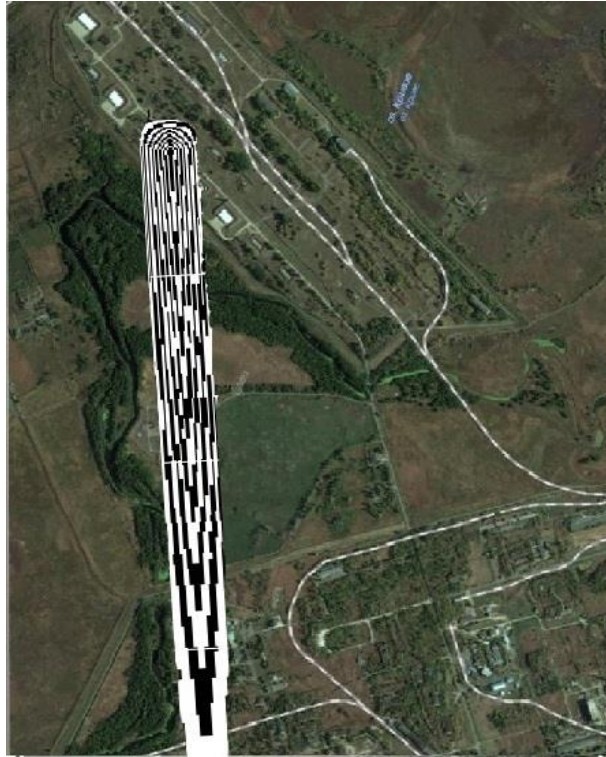


Рисунок 4.24 – Зона забруднення для моменту часу $t=820\text{с}$

На наведених нижче рисунках показано як змінюється концентрація *HCl* біля промислового корпусу і всередині виробничої будівлі.

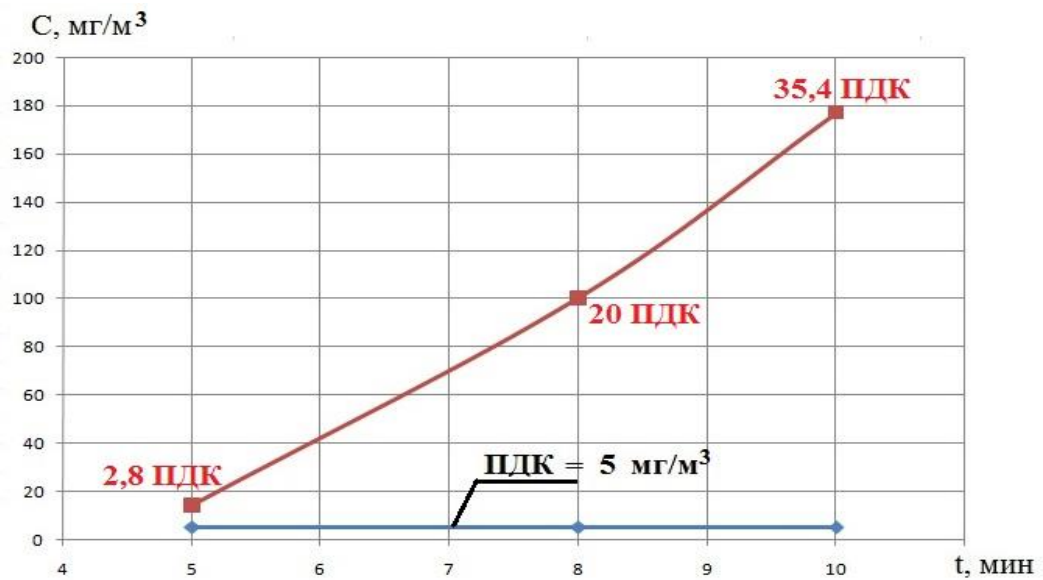


Рисунок 4.25 – Зміна концентрації *HCl* біля промислового корпусу з плином часу

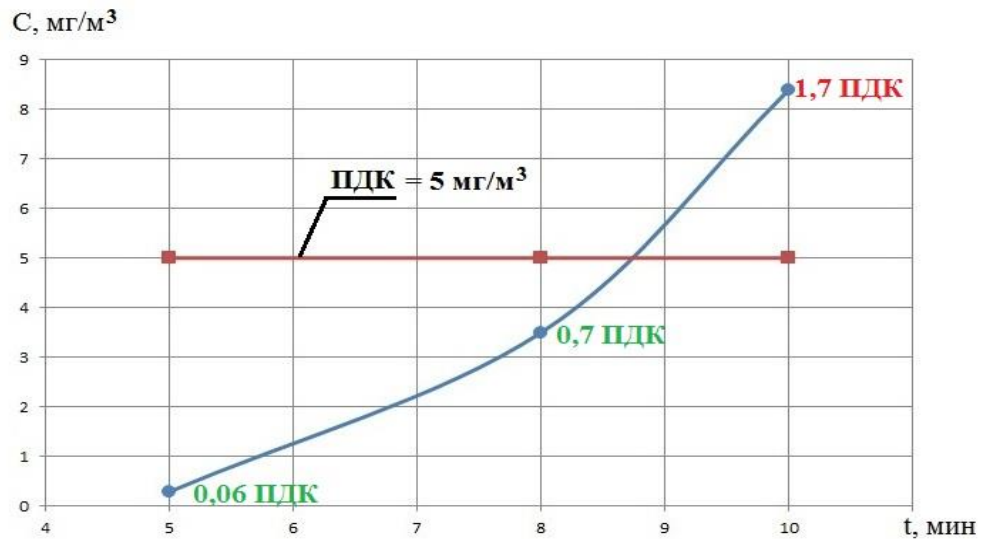


Рисунок 4.26 – Зміна концентрації HCl всередині виробничої будівлі з плином часу

Аналізуючи дані, представлені на рис.4.25, 4.26, можна зробити висновок про те, що протягом малого проміжку часу після виникнення екстремальної ситуації в сховищі, концентрація HCl значно перевищить ГДК, що призведе до смертельного ураження виробничого персоналу, як на відкритій місцевості, так і всередині виробничої будівлі. У зв'язку з цим необхідно рекомендувати наступне:

1. Забезпечити виробничий персонал індивідуальними засобами захисту.
2. Створити кімнати безпеки «save room» для швидкого укриття персоналу.
3. Активізувати роботу по утилізації ТРП на території ПХЗ.

4.3 Оцінка промислової безпеки при екстремальній ситуації на етапі транспортування ТРП

Розглянемо результати вирішення задачі з оцінки рівня промислової безпеки в разі екстремальної ситуації на залізничному транспорті під час перевезення ТРП (рис.4.27). Відбувається емісія продуктів горіння з вагона.

Поруч з палаючим вантажем знаходиться будівля «Укрзалізниці» (станція «Павлоград-1» рис.4.28). Поруч з будівлею знаходяться монтери колії, оглядачі-ремонтники вагонів.



Рисунок 4.27 – Транспортування ТРП в спеціальних вагонах

Розрахунок виконувався при наступних вихідних даних: значення швидкості вітру на фіксованій висоті Y_1 дорівнює 8м/с. Розміри розрахункової області 75м*26м; висота будівлі – 12 м; $\sigma = 0$. Відстань від вагона з ТРП до будівлі «Укрзалізниці» – порядку 55 м (рис.4.28).

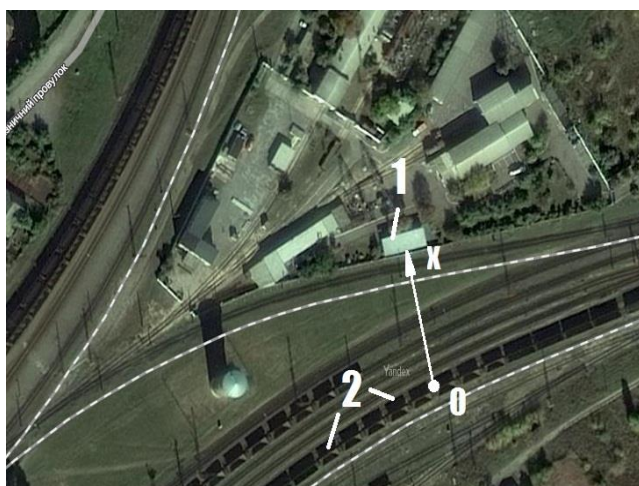


Рисунок 4.28 – Загальний вигляд розрахункової зони: 1 – будівля «Укрзалізниці» на території станції «Павлоград-1», 2 – залізничний склад

Маркерами формується положення залізничного вагона, його форма, місце виходу з нього потоку продуктів горіння зі швидкістю V_{gas} . Розрахунок проводиться для викиду HCl в кількості 4000 г/с, час емісії – 15 мін.

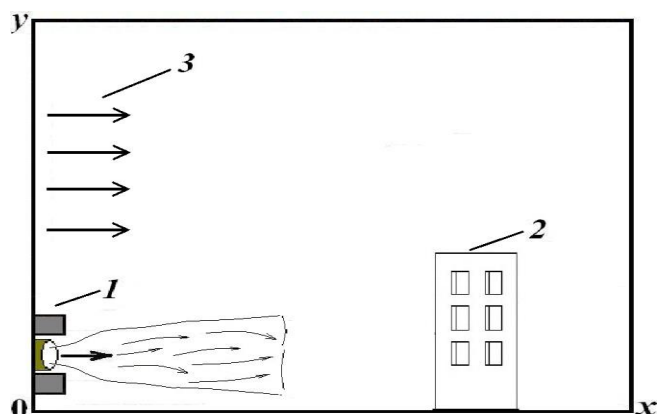


Рисунок 4.29 – Схема розрахункової області: 1 – залізничний вагон;
2 – будівля; 3 – напрямок вітру

Швидкість струменя газового потоку, що виходить з вагона – продуктів згоряння, прийнята рівною $V_{gas} = 20 \text{ м/с}$ (рис.4.31). Розглянемо результати моделювання, отримані на базі розробленої чисельної моделі (код «WALL-2»). На рисунку 4.30 показана зона забруднення возле вагона и здания при возникновении экстремальной ситуации. На рисунку 4.30 показана зона забруднення біля вагона і будівлі при виникненні екстремальної ситуації.

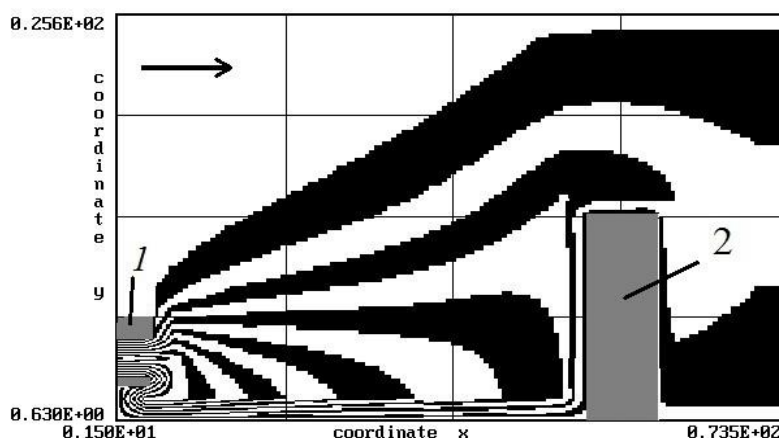


Рисунок 4.30 – Забруднення повітря робочої зони для моменту часу $t=20\text{с}$:
1 – залізничний вагон, 2 – будівля

Як видно з рисунка 4.30, біля вагона формується підзона забруднення, що характеризується великим градієнтом концентрації домішки. Добре видно як струмінь продуктів горіння поширюється уздовж земної поверхні (нижня межа струменю), а верхня межа струменю огинає будівлю, що знаходиться біля залізничного полотна; перед будівлею і за будівлею формується інтенсивна зона забруднення.

Для оцінки ризику ураження персоналу, що знаходиться біля будівлі була визначена динаміка зміни концентрації *HCl* за будівлею. Ця залежність показана на рисунку 4.31.

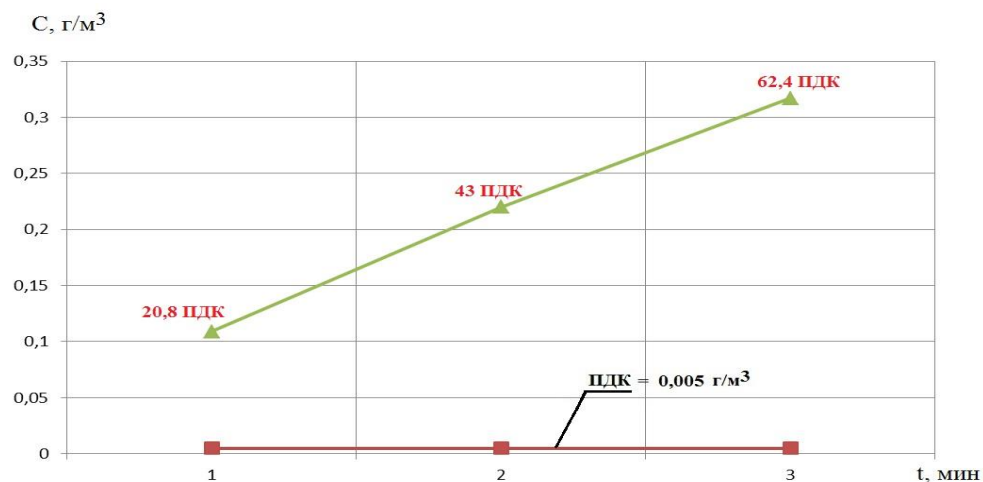


Рисунок 4.31 – Концентрація *HCl* за будівлею

При екстремальній ситуації відбудеться токсичне ураження персоналу в робочих зонах на території промислового майданчика, що науково обґрунтовує необхідність розробки заходів, спрямованих на зниження небезпеки при виникненні екстремальних ситуацій при транспортуванні ТРП.

Висновки до розділу 4

1. За допомогою розроблених чисельних моделей проведені дослідження з оцінки рівня промислової небезпеки в разі загоряння ТРП в сховищі або в залізничному вагоні. Дослідження, проведені для декількох

масштабів перенесення небезпечних речовин в повітрі, відповідно прийнятим в даний час підходам до вирішення задач розсіювання забруднюючих речовин в повітряному середовищі.

2. Результати проведених обчислювальних експериментів показали, що вал, що знаходиться біля сховища дозволяє локально знизити рівень забруднення повітря. Додатковий захисний ефект може бути отриманий за рахунок застосування екрану, встановленого на валу.

3. Результати обчислювальних експериментів показують, що в разі загоряння тільки одного твердопаливного ракетного двигуна в сховищі відбудеться швидке формування масштабної зони хімічного зараження і токсичне ураження персоналу на території ПХЗ. У зв'язку з цим необхідне створення технологій з мінімізації рівня забруднення повітря при горінні ТРП і персонального захисту працівників на підприємстві ПХЗ.

4. На основі даних проведеного обчислювального експерименту можна зробити висновок про те, що утилізація даного ракетного палива шляхом його підриву або організованого горіння призведе до потужного викиду хімічно небезпечних речовин в атмосферу, інтенсивного забруднення повітряного середовища, що створить загрозу життю працівників.

5. Побудована чисельна модель дозволила вперше науково-обґрунтовано виконати прогноз наслідків екстремальної ситуації при горінні ТРП.

6. Результати проведених розрахунків показують, що розроблені методики прогнозу істотно перевершують за своїми можливостями нормативну методику, яка застосовується в Україні для прогнозу наслідків на хімічно небезпечних об'єктах і транспорті, а також інші методики (ОНД-86 і РД 52.04.253-90), які також використовуються в Україні для прогнозу аварійного забруднення повітряного середовища.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА ЗАХОДІВ СПРЯМОВАНИХ НА ЗНИЖЕННЯ НЕБЕЗПЕКИ ПРИ ВИНИКНЕННІ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ СИТУАЦІЙ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ ТРП

У разі виникнення екстремальної ситуації під час транспортування ТРП (рис.5.1) може відбутися горіння палива, яке супроводжується емісією хімічно небезпечних речовин в повітря. У зв'язку з цим виникає необхідність по розробці заходів спрямованих на зниження небезпеки і захист персоналу (працівники на території ПХЗ; персонал, який супроводжує ТРП в поїзді).



Рисунок 5.1 – Споряджений корпус двигуна ТРП в залізничному вагоні

Серед запропонованих заходів зниження небезпеки нижче розглядається спосіб такого захисту, заснований на подачі нейтралізуючого розчину в шлейф продуктів горіння ТРП. Дослідження ефективності даного засобу захисту проведено за допомогою методу обчислювального експерименту на базі розроблених кодів «WALL-1», «WALL-2».

5.1 Оцінка ефективності застосування нейтралізатора для захисту повітря робочих зон і прилеглої території від забруднення при емісії продуктів горіння ТРП біля сховища

Розглянемо емісію продуктів горіння ТРП із вагона, який розташовується біля сховища. Така екстремальна ситуація може мати місце при навантаженні, розвантаженні ТРП (рис.5.2).



Рисунок 5.2 – Навантаження ТРП в залізничний вагон

Для підвищення промислової безпеки в разі загоряння ТРП в вагоні рекомендується подавати нейтралізатор в шлейф продуктів горіння. Зрозуміло, що при подачі нейтралізації для ефективної локалізації джерела емісії продуктів горіння ТРП необхідно дві основні умови:

1. Максимально швидко, після початку горіння ТРП, подача нейтралізатора в шлейф.

2. Забезпечення ефективної нейтралізації, за рахунок правильного підбору кількості реагенту і місця його подачі.

Реалізація першої умови може бути досягнута за рахунок застосування установки (що пропонується в даній роботі), розміщеної на залізничній платформі, яка включається до складу пожежного поїзда. До складу поїзда також включена ємність з реагентом (рис.5.3).

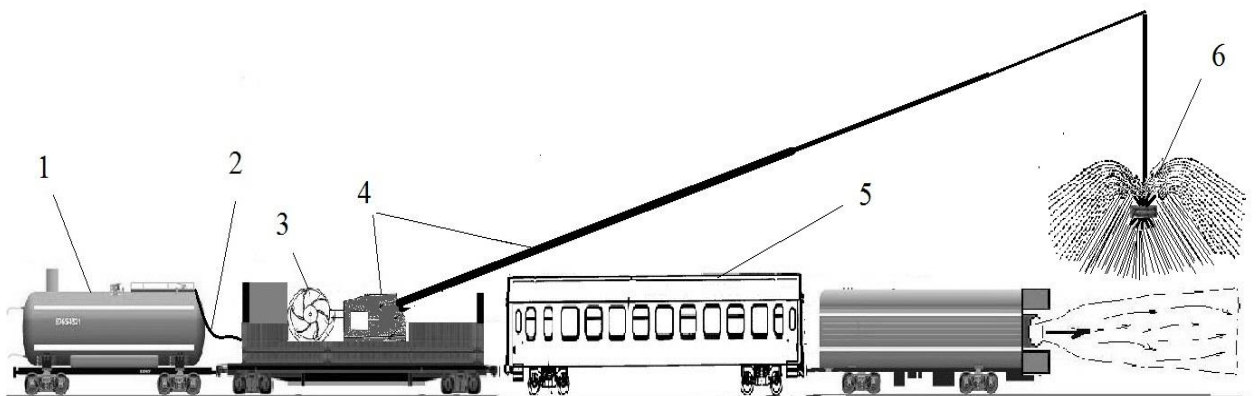


Рисунок 5.3 – Схема подачі нейтралізатора в струмінь продуктів горіння ТРП (пропонований варіант подачі від висувної стріли зі спринклером):

1 – ємність з реагентом, 2 – трубопровід, 3 – насосна установка,
4 – висувна стріла, 5 – пасажирський (буферний) вагон, 6 – спринклер

У пропонованому способі захисту повітря від забруднення, до складу пожежного поїзда, включається буферний вагон (рекомендується рефрижераторний вагон, тому що час згоряння пасажирського вагона становить близько 20 хв.) Між вагоном, де транспортується ТРП і вагоном з насосною установкою. Цей буферний вагон буде служити «екраном» для захисту вагона з насосною установкою від теплового впливу при горінні ТРП.

При такому способі захисту організовується швидка подача нейтралізуючого розчину в шлейф продуктів горіння і тим самим мінімізується час вільного надходження продуктів горіння ТРП в повітря.

Крім цього, на відміну від традиційної схеми подачі нейтралізатора у вигляді струменя пропонується подача через спринклер, який розміщений на висувній штанзі (рис.5.3, 5.4). Це пов'язано з тим, що температура продуктів горіння ТРП в повітрі – висока і якщо використовується традиційна подача у вигляді струменя, то відбудеться швидке випаровування крапель реагенту на шляху його руху від струменевої установки до шлейфу.

При подачі реагенту через спринклер, встановлений на висувній штанзі, такі втрати можна уникнути. Це досягається шляхом розміщення на голівці спринклера набору трубок, через які відбувається подача нейтралізатора в шлейф продуктів горіння (рис.5.4).

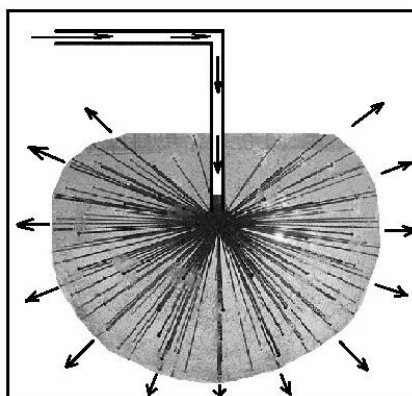


Рисунок 5.4 – Схема роботи пропонованого спринклера при подачі реагенту для нейтралізації небезпечних речовин

Реалізація другої умови ефективного захисту повітряного середовища від забруднення – тобто визначення оптимальної кількості нейтралізатора і місця його подачі, вимагає проведення обчислювального експерименту, оскільки постановка і проведення фізичного експерименту практично не реалізується через наступні причини:

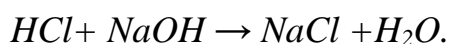
1. неможливо забезпечити горіння реального твердопаливного заряду (47 тонн в першій ступені);
2. немає обладнання, яке дозволяє вимірювати, в режимі «on-line», концентрацію небезпечної речовини в повітрі (наприклад, HCl) і

реагенту (нейтралізатора) в різних точках повітря, з урахуванням розсіювання реагенту і небезпечної речовини під дією вітрового потоку, на різній висоті і для різних моментів часу.

Таким чином, єдиним засобом вирішення задачі з оцінки ефективності методу нейтралізації та обґрунтування раціональних параметрів нейтралізації може бути обчислювальний експеримент.

В дисертаційній роботі буде розглядатися питання нейтралізації *HCl*. Для моделювання процесу нейтралізації *HCl* використовувалися наступні рівняння:

1. рівняння Нав'є-Стокса для визначення поля швидкості вітрового потоку при обтіканні вагона, сховища і виходу з них струменю продуктів горіння;
2. рівняння масопереносу *HCl* в повітрі (рівняння (2.4)), усереднення проводиться по ширині розрахункової області;
3. рівняння масопереносу *NaOH* в повітряному середовищі (рівняння (2.4));
4. рівняння хімічної взаємодії хлористого водню з *NaOH*:



Дане рівняння дозволяє розрахувати стехіометричне співвідношення: скільки лугу взаємодіє з якою кількістю небезпечної домішки.

Алгоритм розрахунку розв'язання задачі по нейтралізації продуктів горіння ТРП полягає в наступному:

1. вирішується аеродинамічна задача по визначенню поля швидкості вітрового потоку;
2. розраховується перенесення *HCl* в повітрі;
3. розраховується перенесення нейтралізатора в повітрі;
4. розраховується процес хімічної взаємодії (*HCl*+нейтралізатор);
5. розрахунок повторюється, починаючи з пункту 2.

Розроблений алгоритм був використаний для оцінки ефективності процесу нейтралізації *HCl* при різній інтенсивності подачі реагенту.

Розрахунок виконувався при наступних вихідних даних. Інтенсивність викиду HCl з вагона становить $7,8 \text{ кг/с}$; викид відбувається протягом 15 хвилин. Розміри розрахункової області $75\text{м} \times 26\text{м}$. Швидкість осідання крапель реагенту $0,5 \text{ см/с}$. Швидкість вітру 7 м/с . Вагон з палаючим ТРП – не рухається. Це можна розглядати, як екстремальну ситуацію під час навантаження (розвантаження) ТРП. Ставиться задача – оцінити ефективність процесу нейтралізації при різній інтенсивності подачі реагенту і місця розміщення спринклера щодо джерела емісії небезпечної речовини.

Розрахунок виконувався для таких варіантів задачі:

1. подача реагенту здійснюється на висоті $13,5 \text{ м}$ і на відстані 20 м від джерела емісії. Ця відстань у всіх варіантах постійна. У першому варіанті – інтенсивність подачі нейтралізатора 1 кг/с ;
2. подача реагенту здійснюється на висоті $13,5 \text{ м}$, інтенсивність подачі нейтралізатора 8 кг/с ;
3. подача реагенту здійснюється на висоті $3,5 \text{ м}$, інтенсивність подачі нейтралізатора 8 кг/с ;
4. подача реагенту здійснюється на висоті $3,5 \text{ м}$, інтенсивність подачі нейтралізатора 2 кг/с .

При проведенні обчислювального експерименту приймалося, що процес нейтралізації починається в момент часу $t=15\text{с}$, а до цього моменту часу струмись продуктів горіння ТРП вільно розвивається в повітрі.

На наступних рисунках показана зона забруднення повітря для робочих зон в разі розглянутих варіантів.

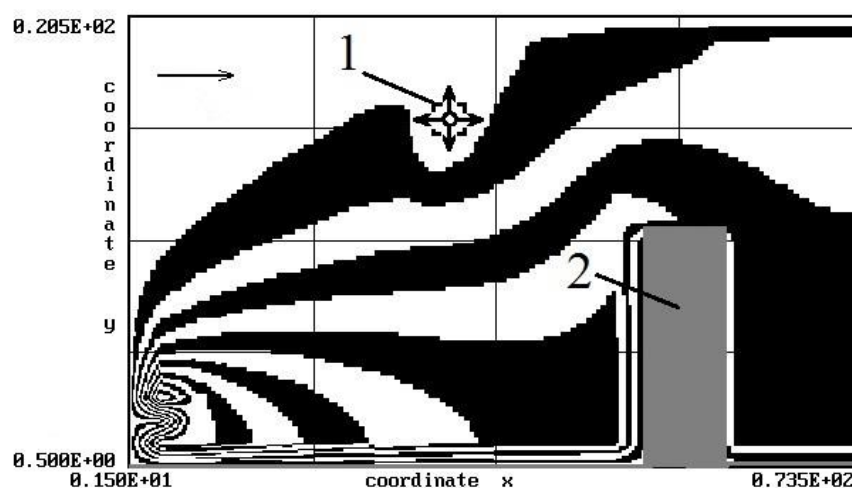


Рисунок 5.5 – Зона забруднення повітря під час подачі реагенту ($t = 120\text{с}$, висота подачі нейтралізатора 13,5 м, інтенсивність подачі 1 кг/с):

1 – спринклер, 2 – будівля

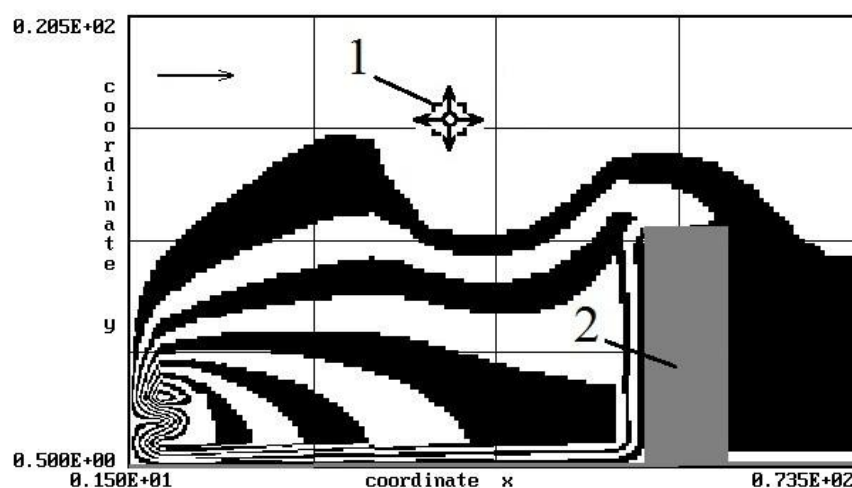


Рисунок 5.6 – Зона забруднення повітря під час подачі реагенту ($t = 120\text{с}$, висота подачі нейтралізатора 13,5 м, інтенсивність подачі 8 кг/с):

1 – спринклер, 2 – будівля

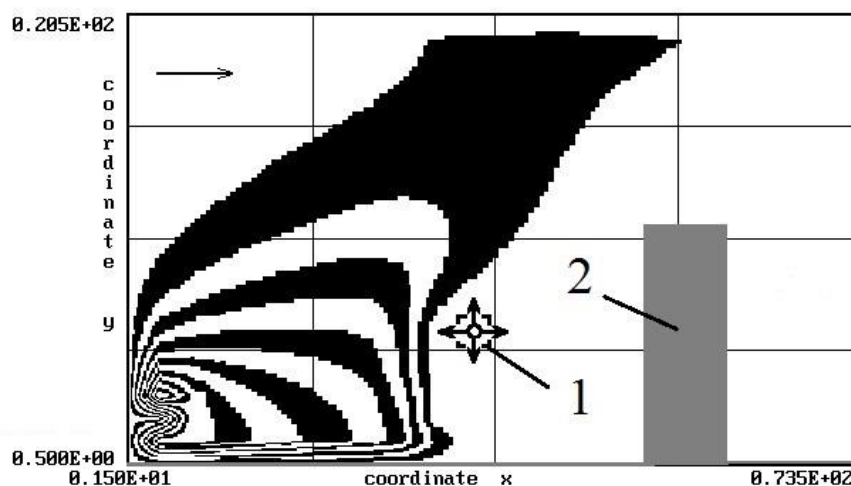


Рисунок 5.7 – Зона забруднення повітря під час подачі реагенту ($t = 120\text{с}$, висота подачі нейтралізатора 3,5 м, інтенсивність подачі 8 кг/с):

1 – спринклер, 2 – будівля

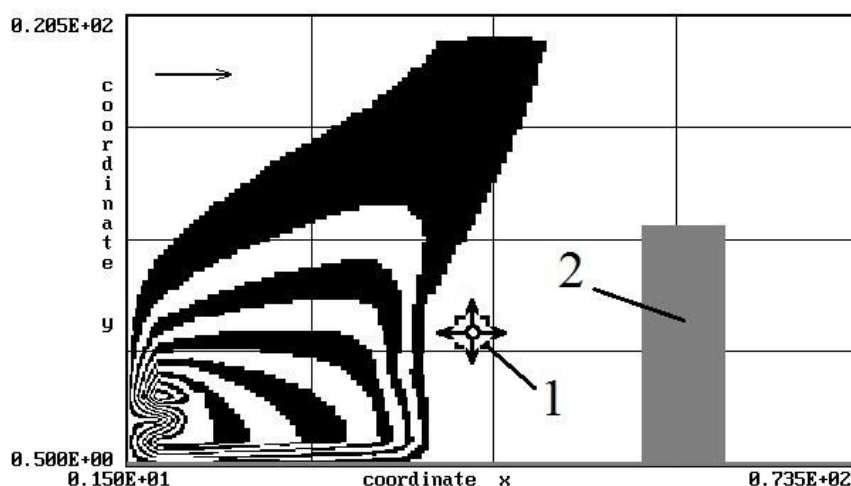


Рисунок 5.8 – Зона забруднення повітря під час подачі реагенту ($t = 120\text{с}$, висота подачі нейтралізатора 3,5 м, інтенсивність подачі 12 кг/с):

1 – спринклер, 2 – будівля

У наведених нижче таблицях представлені дані щодо ефективності процесу нейтралізації. Ефективність нейтралізації оцінювалася за формулою:

$$\Xi = (M_H / M_B) * 100\%,$$

де M_H – маса нейтралізованого HCl ; M_B – маса емітованого HCl .

Таблиця 5.1

Ефективність нейтралізації (варіант 1)

t	45 сек	75 сек	120 сек
Ефективність нейтралізації	6,8%	8,2%	8,9%

Таблиця 5.2

Ефективність нейтралізації (варіант 2)

t	45 сек	75 сек	120 сек
Ефективність нейтралізації	50%	62%	69%

Таблиця 5.3

Ефективність нейтралізації (варіант 3)

t	45 сек	75 сек	120 сек
Ефективність нейтралізації	44%	56%	62%

Таблиця 5.4

Ефективність нейтралізації (варіант 4)

t	45 сек	75 сек	120 сек
Ефективність нейтралізації	56%	68%	73%

Як видно з аналізу даних представлених в таблицях 5.1-5.4 на ефективність нейтралізації сильно впливає як інтенсивність подачі реагенту, так і положення спринклера щодо шлейфу продуктів горіння ТРП. Наприклад, в разі четвертого варіанту досягається висока ефективність процесу нейтралізації, особливо це наочно видно з рис.5.8 – зона

забруднення відсунулася від будівлі і різко зменшилася по довжині. Для першого варіанту задачі (рис.5.5) – зона впливу нейтралізації проявляється локально, що говорить про невелике розміщення спринклера і недостатній подачі реагенту.

З представлених рисунків видно, що подача нейтралізатора дає можливість зменшити розміри зони забруднення повітря і тим самим сприяє захисту примігстральної території.

Якщо покласти, що для локалізації зони забруднення використовувався 8 відсотковий розчин $NaOH$, то необхідно забезпечити подачу нейтралізатора в кількості близько 100 л/с. Для забезпечення такої подачі пропонується використовувати насоси для перекачування агресивних рідин марки X200-150-315.

Напір даного насоса 32 м, подача 315 м³/ч. Для забезпечення необхідної витрати нейтралізатора необхідна паралельна робота двох таких насосів і, при необхідності, більше.

Подача реагенту від ємності (цистерни) до насоса і від насоса до спринклерів здійснюється за допомогою металорукавів, розроблених для перекачування агресивних рідин. Діаметр рукава визначимо за формулою гідравліки:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}}, \quad (5.1)$$

де Q – подача, v – середня швидкість течії (порядку 3 м/с).

Приймаються два напірних трубопроводи (металорукава), кожен забезпечує проходження 50 л/с. Діаметр одного трубопроводу складе:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,05}{3,14 \cdot 3}} = 0,021 \text{ м.}$$

Приймаємо діаметр одного трубопроводу 250 мм.

Таким чином, на основі запропонованого методу локалізації джерела емісії продуктів горіння ТРП, можна уникнути значного надходження небезпечних речовин в повітряне середовище при екстремальній ситуації.

5.2 Оцінка ефективності процесу нейтралізації при русі поїзда з палаючим ТРП

Розглянутий вище метод нейтралізації продуктів горіння ТРП, може бути вдосконалений для проведення такої нейтралізації в разі руху складу, що транспортує цей вантаж. В цьому випадку, в вагоні, в якому знаходиться насосне обладнання, знаходяться два висувних напірних трубопроводу з насадками (рис.5.9). Ці трубопроводи можуть, в процесі руху складу, піднятися вгору, під кутом близько 45° , уздовж складу по напрямку до джерела емісії – палаючого ТРП. Вертикальне підняття труб – непотрібно, тому що в цьому випадку буде відбуватися знесення крапель реагенту при русі складу від струменя продуктів горіння, яка також зноситься повітряним потоком. При піднятті труб під кутом буде емісія реагенту назустріч шлейфу продуктів горіння. Труби покриваються електроізолюючим матеріалом. Висота підняття труб може регулюватися, але – нижче контактного проводу на величину порядку 1-1,5 м. Струмień реагенту «зустрічає» шлейф продуктів горіння (рис.5.9). Пропонується платформу, де знаходиться основа напірних труб, зробити типу турелі, яка може обертатися. На платформі вагона розміщуються три насоса: два робочих + один резервний.

Для створення віялоподібного струменю реагенту пропонується використовувати на напірних трубопроводах насадки в формі дифузора (рис.5.10). При таких насадках створюється широкий фронт струменю реагенту і можна забезпечити взаємне перекриття струменів за допомогою двох насадків, тобто створити суцільний фронт подачі реагенту.

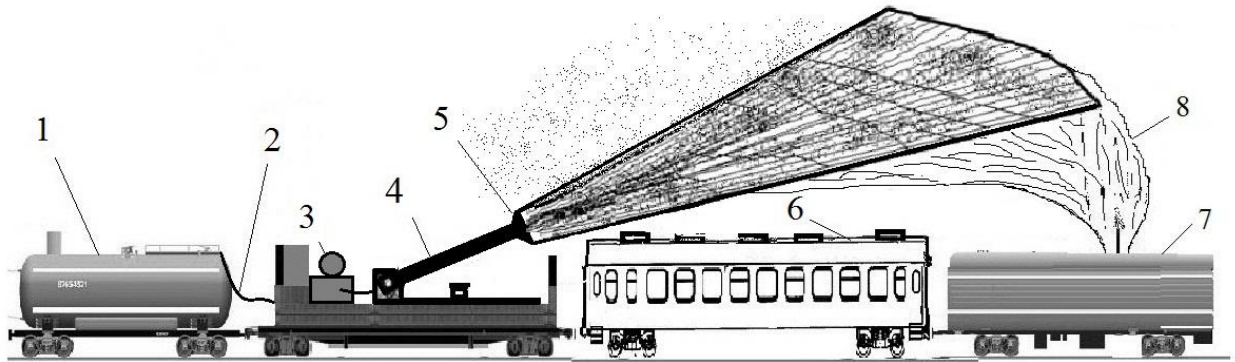


Рисунок 5.9 – Схема подачі нейтралізатора в струмінь продуктів горіння ТРП при русі складу: 1 – ємність з реагентом; 2 – трубопровід; 3 – насосна установка; 4 – підйомні щогли з напірними трубопроводами; 5 – насадок; 6 – вагон (буфер); 7 – залізничний вагон з палаючим ТРП; 8 – шлейф продуктів горіння ТРП

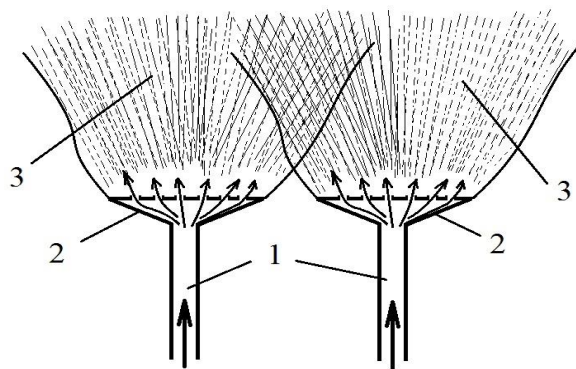


Рисунок 5.10 – Схема роботи насадок при подачі реагенту: 1 – трубопровід для подачі реагенту, 2 – насадок, 3 – шлейф реагенту

Для пропуску витрати кожного напірного трубопроводу (рис.5.10, позиція 1) в кількості 12,5 л/с розчину реагенту рекомендується діаметр труб 150 мм.

На першому етапі досліджень було проведено фізичний експеримент для підтвердження робочої гіпотези про те, що в процесі руху можна забезпечити взаємодію струменя реагенту зі шлейфом продуктів горіння на основі запропонованого способу. Схема експериментальної установки представлена на рисунку 5.11.

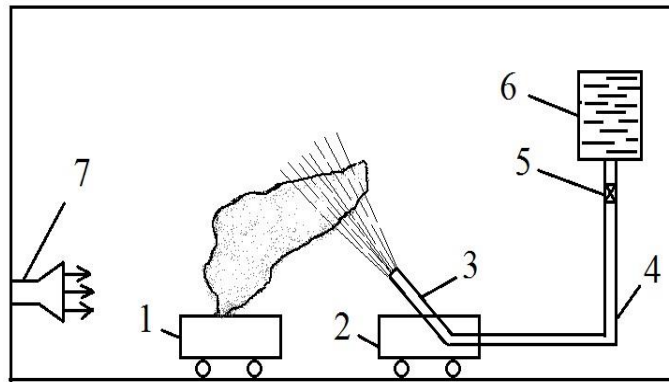


Рисунок 5.11 – Схема експериментальної установки: 1 – модель вагона з палаючим вантажем; 2 – модель вагона з струменевою установкою; 3 – насадок, що подає реагент в шлейф забруднювача; 4 – напірний трубопровід; 5 – засувка на напірному трубопроводі; 6 – ємність з водою; 7 – повітродувка

Як видно з рис.5.11 суть експерименту полягала в створенні джерела горіння в першій моделі вагона і подачі реагенту з другої моделі вагона. Довжина моделі кожного вагона становила 15 см, ширина і висота 3 см, тобто моделі вагонів були відтворені в масштабі 1:100. Перед моделюванням було розраховано число Рейнольдса:

$$Re = \frac{v \cdot h}{\nu}$$

де v – швидкість руху вагона, ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря (при 20°C – $\nu = 1,51 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с}$), h – висота кузова вагона ($h \approx 3 \text{ м}$).

Число Рейнольдса (для натур) при швидкості руху вагона $v = 2 \text{ м/с}$ і

$$v = 5,2 \text{ м/с} \text{ становить: } v = 2 \text{ м/с} \quad Re = \frac{v \cdot h}{\nu} = \frac{2 \cdot 3}{1,51 \cdot 10^{-5}} \approx 4 \cdot 10^5, \quad v = 5,2 \text{ м/с}$$

$$Re = \frac{v \cdot h}{\nu} = \frac{5,2 \cdot 3}{1,51 \cdot 10^{-5}} = 10,33 \cdot 10^5.$$

Таблиця 5.5

Число Рейнольдса (для натур) при різній швидкості руху вагона

$v = 2 \text{ м/с}$	$Re = 4 \cdot 10^5$
$v = 5,2 \text{ м/с}$	$Re = 10,33 \cdot 10^5$

Для моделі при такій же швидкості руху число Рейнольдса дорівнюватиме:

$$\text{Re} = \frac{v \cdot h}{\nu} = \frac{2 \cdot 0,03}{1,51 \cdot 10^{-5}} \approx 0,4 \cdot 10^4, \quad \text{Re} = \frac{v \cdot h}{\nu} = \frac{5,2 \cdot 0,03}{1,51 \cdot 10^{-5}} \approx 0,1 \cdot 10^5.$$

Таблиця 5.6

Число Рейнольдса (для моделі) при різній швидкості руху вагона

$v = 2 \text{ м/с}$	$\text{Re} = 0,4 \cdot 10^4$
$v = 5,2 \text{ м/с}$	$\text{Re} = 0,1 \cdot 10^5$

Як видно, значення числа Re перебуває в діапазоні для турбулентної течії. Однак, як відомо, на практиці практично неможливо домогтися збігу числа Рейнольдса для натурі і моделі, якщо розглядаються рухомі об'єкти типу вагон. Для забезпечення рівності чисел Рейнольдса на натурі і моделі необхідно використовувати унікальні, великі аеродинамічні труби.

Для створення ефекту руху вагонів і відповідного знесення вітровим потоком шлейфу продуктів горіння і реагенту здійснювалася подача повітря від повітродувки на вагони (принцип оборотності руху). Швидкість повітряного потоку біля верхньої кромки моделі першого вагона вимірювалася за допомогою анемометра GM8908. Швидкість струменю реагенту становила близько 2,3-4,7 м/с (ця швидкість була розрахована за допомогою даних про витрату потоку і розміру отвору в насадці). Результати експерименту показані на рис.5.12.

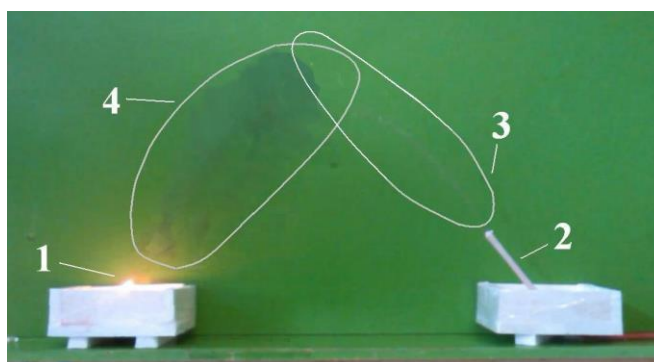


Рисунок 5.12а – Фото проведення експерименту: 1 – модель вагона з палаючим вантажем, 2 – модель вагона з струменевою установкою, 3 – струмінь реагенту, 4 – шлейф продуктів горіння (швидкість повітряного потоку 2 м/с – що відповідає швидкості поїзда 7 км/год)

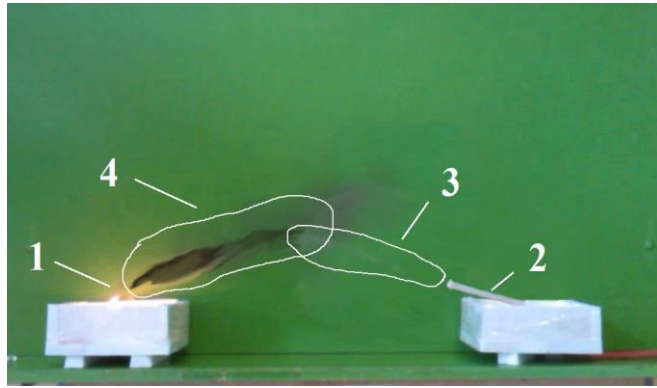


Рисунок 5.12б – Фото проведення експерименту: 1 – модель вагона з палаючим вантажем, 2 – модель вагона з струменевою установкою, 3 – струмінь реагенту, 4 – шлейф продуктів горіння (швидкість повітряного потоку 5,2 м/с – що відповідає швидкості поїзда 19 км/год)

Як видно з рисунку 5.12 відбувається перетин шлейфу продуктів горіння (лінія 4) зі струменем реагенту (лінія 3). Таким чином, результати проведеного фізичного експерименту підтверджують висунуту робочу гіпотезу про можливість нейтралізації продуктів горіння під час руху поїзда.

На другому етапі для підтвердження висунутої робочої гіпотези було проведено обчислювальний експеримент. Нижче приведені результати обчислювального експерименту при нейтралізації HCl в процесі руху складу. Тут використана двомірна (планова) модель масопереносу, в якій враховано, що точкове джерело емісії HCl – рухається і одночасно відбувається подача нейтралізатора з розташованого в тому ж складі вагона. Модель відповідає ситуації прямолінійного руху джерела емісії забруднювача і реагенту, без урахування швидкості виходу струменя реагенту з вагона і швидкості виходу продуктів горіння.

Розрахунок виконувався при наступних даних: розміри розрахункової області 400*100 м (розрахункова область обрана поблизу станції Павлоград-1; швидкість руху складу 30 км/год, швидкість осідання крапель реагенту 0,1 см/с. Швидкість вітру – 2 м/с, вітер – східний. Чисельне моделювання проводилося при інтенсивності емісії HCl 7,8 кг/с. При моделюванні

покладається, що подача реагенту починається через 8 секунд після початку загоряння ТРП. Моменту часу $t=0$ відповідає початок емісії.

Нижче на рисунках зображено динаміку зміни зони забруднення (HCl) при відсутності подачі реагенту. Ця інформація дозволяє оцінити характер формування зони забруднення при викиді HCl з вагона, що рухається.



Рисунок 5.13а – Розрахункова область: 1 – поїзд з ТРП

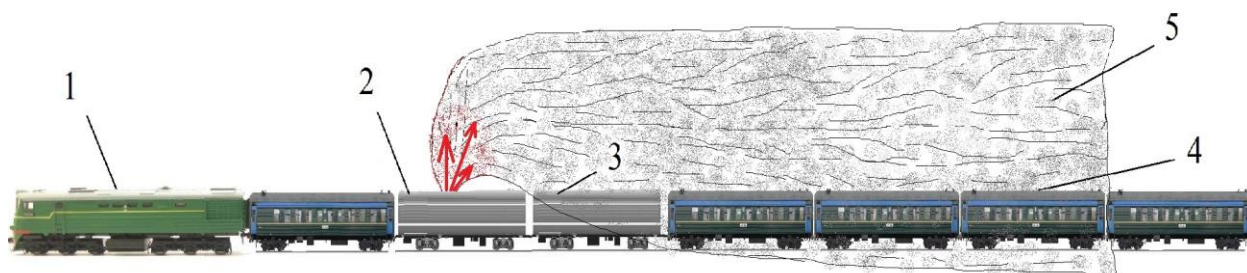



Рисунок 5.13б – Схематичне розташування вагона з супроводжуючим персоналом: 1 – локомотив; 2 – вагон з палаючим ТРП; 3 – буферний вагон; 4 – вагон з супроводжуючим персоналом; 5 – продукти горіння ТРП



а)



б)

Рисунок 5.14 – Зона забруднення повітря для моменту часу: а) $t = 2\text{с}$; б) $t = 5\text{с}$
(немає подачі реагенту,  – джерело емісії продуктів горіння ТРП)

Як видно з рис.5.14-5.17, при русі вагона з палаючим ТРП, над магістраллю формується шлейф забруднювача, що розширюється під дією атмосферної дифузії і покриває повністю магістраль.

Якщо припустити, що в четвертому вагоні складу (відлік йде від вагона з ТРП) знаходиться супроводжуючий персонал, то цей вагон, як і інші, що знаходяться за палаючим вагоном, потрапляють в шлейф продуктів горіння. Було виконано розрахунок динаміки забруднення повітряного середовища в вагоні з супроводжуючим персоналом. Розрахунок виконувався при наступних вихідних даних: об'єм вагона 120 м^3 , кратність повітрообміну 20. Динаміка зміни концентрації HCl в вагоні представлена на рис.5.14в.

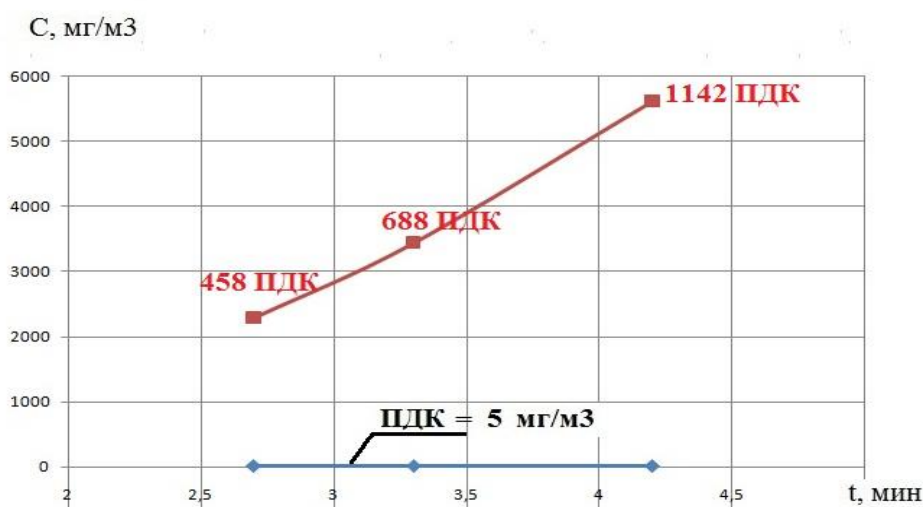


Рисунок 5.14в – Концентрація HCl всередині залізничного вагона

Аналізуючи дані, наведені на рис.5.14в, видно, що при виникненні екстремальної ситуації під час транспортування ТРП, протягом перших хвилин (2-5 хвилин) після загоряння ТРП, відбудеться небезпечне забруднення повітряного середовища в вагоні з супроводжуючим персоналом. Це означає, що необхідно, з одного боку, забезпечити супроводжуючий персонал індивідуальними засобами захисту, а з іншого боку мати спосіб мінімізації рівня забруднення повітряного середовища при загорянні ТРП в вагоні, без зупинки поїзда. Крім цього, супроводжуючий персонал повинен перебувати в вагоні, розташованим перед вагоном з ТРП.

У зв'язку з цим, вкрай важливо оцінити ефективність запропонованого методу нейтралізації. На рис.5.16-5.19 представлені результати моделювання для іншого варіанту задачі – коли відбувається подача реагенту (нейтралізатора) під час руху складу. На рис.5.16а, 5.17а, 5.18а, 5.19а показана зона забруднення повітряного середовища під час подачі реагенту в кількості 12 кг/с. Як видно з даних рисунків, таке подання є недостатнім і біля вагона з ТРП, що димить, зберігається зона забруднення *HCl*.

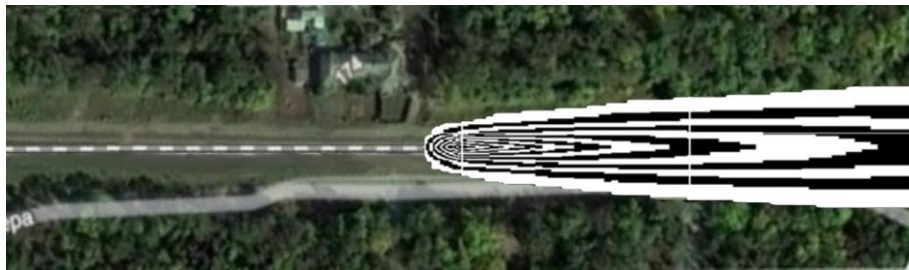


Рисунок 5.15а – Зона забруднення повітряного середовища для моменту часу
 $t = 10\text{с}$ (немає подачі реагенту)

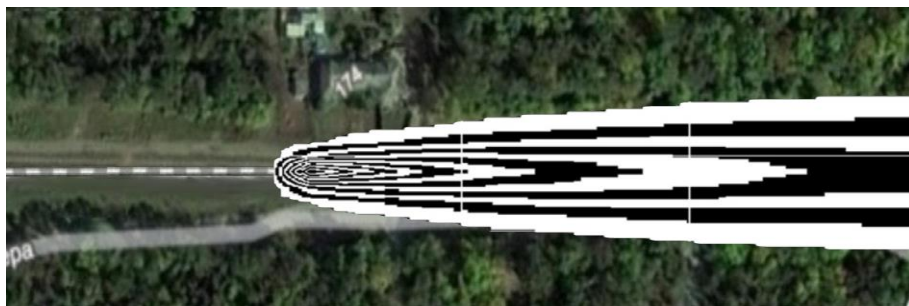


Рисунок 5.15б – Зона забруднення повітряного середовища для моменту часу
 $t = 15\text{с}$ (немає подачі реагенту)

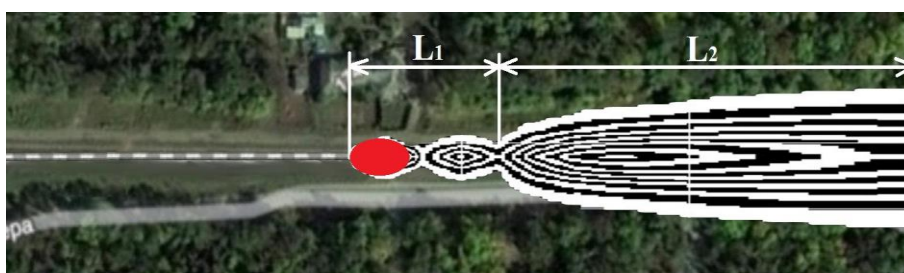


а)



б)

Рисунок 5.16 – Зона забруднення повітряного середовища для моменту часу $t = 9\text{с}$ (йде подача реагенту): а) $Q=12\text{кг/с}$; б) $Q=25\text{кг/с}$

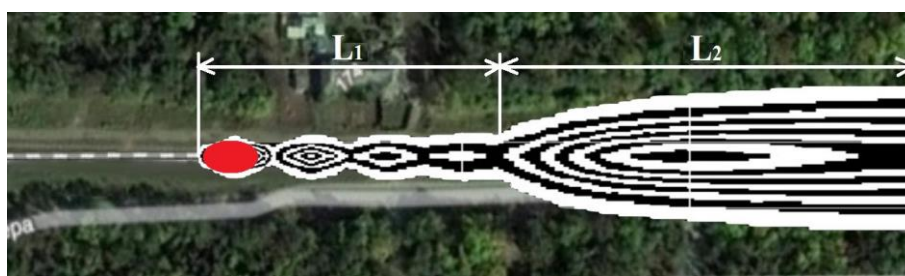


а)



б)

Рисунок 5.17 – Зона забруднення повітряного середовища для моменту часу $t = 11\text{с}$ (йде подача реагенту): а) $Q=12\text{кг/с}$, L_1 – зона забруднення потрапила під вплив нейтралізатора, L_2 – зона забруднення не потрапила під вплив нейтралізатора; б) $Q=25\text{кг/с}$

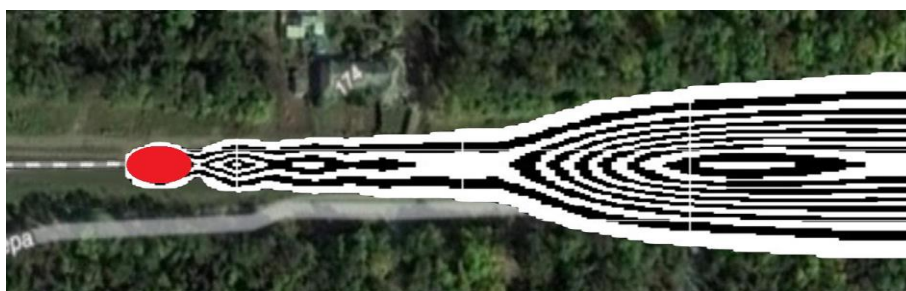


а)



б)

Рисунок 5.18 – Зона забруднення повітряного середовища для моменту часу $t = 13\text{с}$ (йде подача реагенту): а) $Q=12\text{кг/с}$, L_1 – зона забруднення потрапила під вплив нейтралізатора, L_2 – зона забруднення не потрапила під вплив нейтралізатора; б) $Q=25\text{кг/с}$



а)



б)

Рисунок 5.19 – Зона забруднення повітряного середовища для моменту часу $t = 13\text{с}$ (йде подача реагенту): а) $Q=12\text{кг/с}$; б) $Q=25\text{кг/с}$

На рис.5.16б, 5.17б, 5.18б, 5.19б показана зона забруднення повітряного середовища при збільшеній подачі реагенту – 25 кг/с. Як видно з даних рисунків, таке подання є цілком достатнім і забезпечує повну «ліквідацію» шлейфу забруднювача біля джерела емісії – вагона з ТРП, що рухається. При використанні подачі реагенту в кількості 25 кг/с, основний вплив на забруднення повітря, здійснює «хвіст» – тобто та частина HCl , яка потрапила в повітря до початку подачі нейтралізатора. Оскільки склад рухається, то реагент, що викидається, не потрапляє у цей «хвіст». Звідси видно, що для забезпечення необхідного рівня промислової безпеки, необхідно якомога швидше почати подачу реагенту в шлейф продуктів горіння ТРП або забезпечити додаткову струминну установку для нейтралізації даного «хвоста».

У таблиці 5.7 представлені дані щодо ефективності процесу нейтралізації при подачі реагенту в кількості 25 кг/с. При розрахунку ефективності процесу нейтралізації враховувалася маса емітованого HCl з моменту часу $t=0$ – тобто з початку загоряння вантажу і початку емісії HCl .

Таблиця 5.7

Ефективність нейтралізації при русі складу

t	10 сек	13 сек	15 сек
Ефективність нейтралізації	14%	37%	47%

Аналізуючи дані, представлені в табл.5.5, можна зробити висновок про те, що запропонований метод нейтралізації HCl при русі складу дає можливість підвищити рівень промислової безпеки при виникненні даної екстремальній ситуації, але подачу реагенту треба починати якомога швидше.

5.3 Оцінка ефективності застосування нейтралізатора при загорянні ТРП в сховищі

Як показують результати моделювання, представлені в розділі 4, при виникненні екстремальної ситуації в сховищі ТРП, в зону ураження потрапляють виробничі корпуси, розташовані на території ПХЗ. Для мінімізації наслідків даної екстремальної ситуації пропонується розмістити (на постійне чергування) пожежний поїзд із запропонованими насосними установками і цистернами з нейтралізатором, на залізничній гілці, яка знаходиться близько до сховищ.

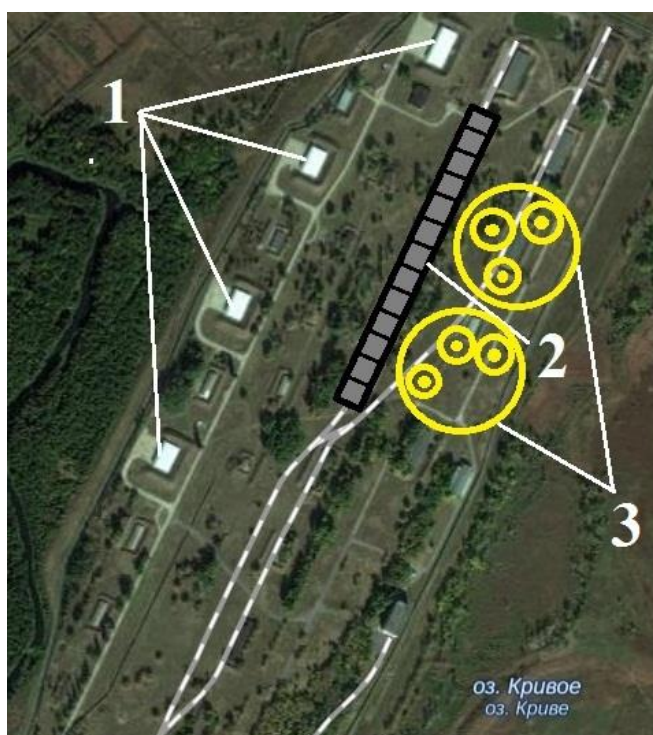


Рисунок 5.20 – Схема розміщення пожежного потягу поблизу сховищ з ТРП:

1 – сховище ТРП; 2 – пожежний потяг; 3 – розташування робочих зон

Таке розташування пожежного поїзда дозволяє здійснити швидке пересування його навпроти того сховища, де сталася екстремальна ситуація. Це дає можливість з мінімальними витратами часу створити «фронт» нейтралізуючого розчину на шляху руху хмари токсичного газу, тим самим забезпечити захист робочих зон і прилеглої території, розташованих в

безпосередній близькості від джерела емісії небезпечних речовин (рис.5.20, позиція 3) і убезпечити територію промислового об'єкта в цілому. На основі розробленої двовимірної чисельної моделі був проведений обчислювальний експеримент по оцінці ефективності застосування запропонованого методу нейтралізації для мінімізації наслідків екстремальної ситуації в сховищі ТРП. Схема розрахункової області показана на рис.5.20, де схематично показано розміщення пожежного поїзда. Розміри розрахункової області 320*221м; швидкість вітру – 7 м/с; інтенсивність емісії HCl – 7,8 кг/с; ширина «фронту» завіси, що нейтралізує – 100 м. Розрахунок виконаний для двох варіантів: подача нейтралізатора 12 кг/сек і 24 кг/сек. Подача нейтралізатора починається через 15 сек після виникнення надзвичайної ситуації.

На наступних рисунках показані результати обчислювального експерименту.

На рисунку 5.21а, 5.21б показана зона забруднення при відсутності подачі нейтралізатора. На рисунку 5.21в, 5.21г представлена зона забруднення в разі подачі нейтралізатора.

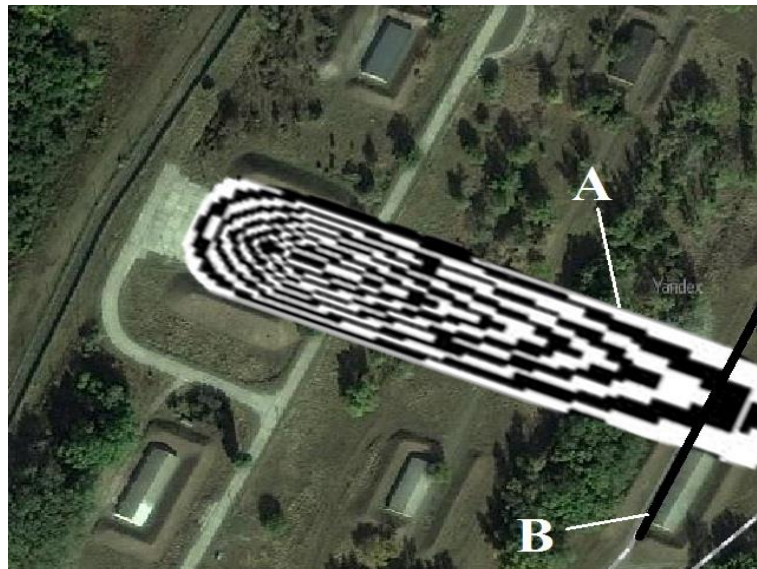


Рисунок 5.21а – Зона забруднення при відсутності подачі нейтралізатора для моменту часу $t = 5$ с: А – шлейф продуктів горіння ТРП; В – розташування поїзда з нейтралізатором

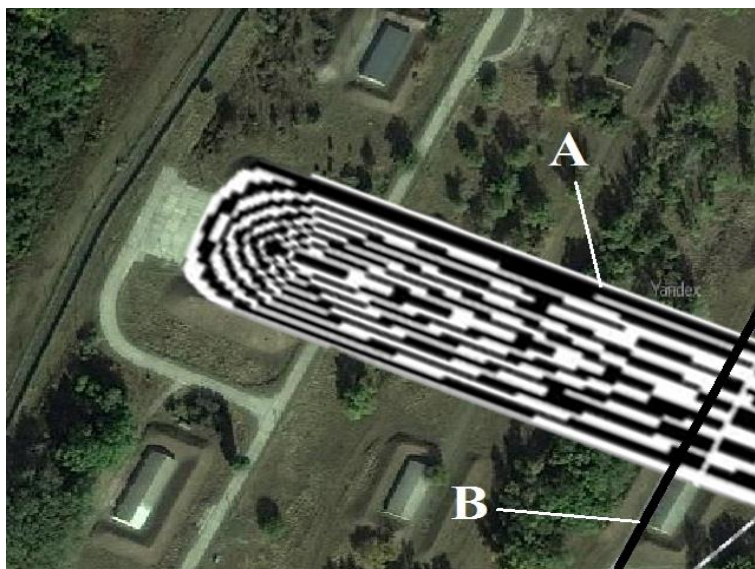


Рисунок 5.21б – Зона забруднення при відсутності подачі нейтралізатора для моменту часу $t = 9$ с: А – шлейф продуктів горіння ТРП; Б – розташування поїзда з нейтралізатором

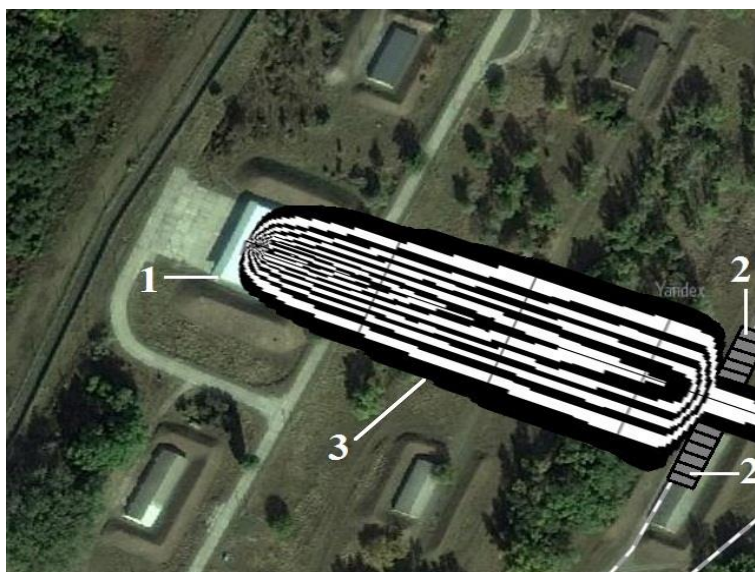


Рисунок 5.21в – Зона забруднення при недостатній подачі нейтралізатора: 1 – сховище ТРП; 2 – пожежний поїзд; 3 – шлейф продуктів горіння ТРП

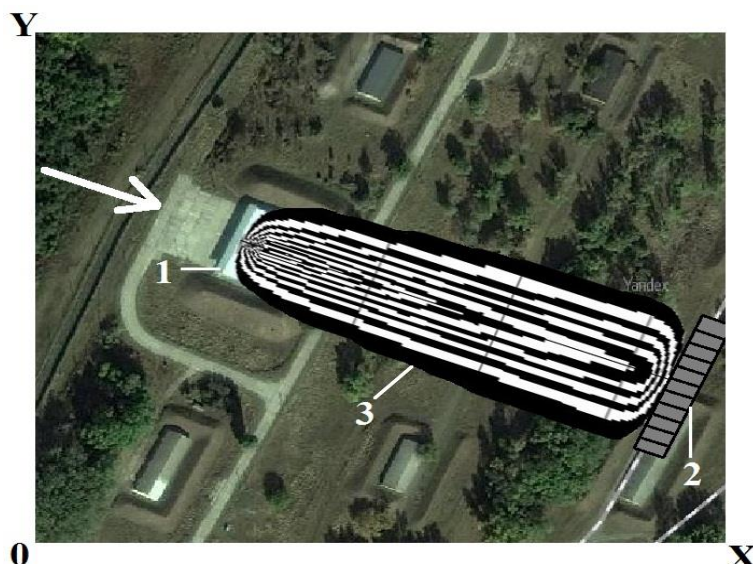


Рисунок 5.21г – Зона забруднення при достатній подачі нейтралізатора:
1 – сховище ТРП; 2 – пожежний поїзд; 3 – шлейф продуктів горіння ТРП

З наведених рисунків видно, що наявність завіси дозволяє локалізувати джерело емісії і його вплив на забруднення повітряного середовища. Тим самим знижується ризик токсичного ураження персоналу на території ПХЗ. Наприклад, концентрація HCl за пожежним потягом різко знижується, як показано на рисунку 5.21.

На рисунку 5.22 представлені дані по оцінці маси HCl (у відсотках), яка нейтралізується при роботі установок.

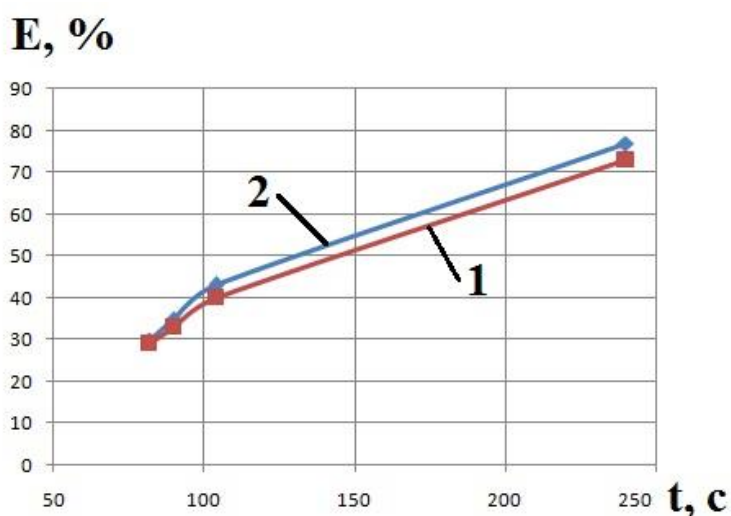


Рисунок 5.22 – Ефективність нейтралізації (E) HCl від часу при різній подачі реагенту: 1 – 12 кг/сек; 2 – 24 кг/сек

Як видно з даного рисунка, застосування нейтралізатора дозволяє значно знизити (порядку на 70%) кількість небезпечної речовини, яка потрапляє на територію ПХЗ.

На наступній діаграмі показана залежність середньої концентрації HCl за пожежним потягом при відсутності нейтралізації і при обраних режимах нейтралізації.

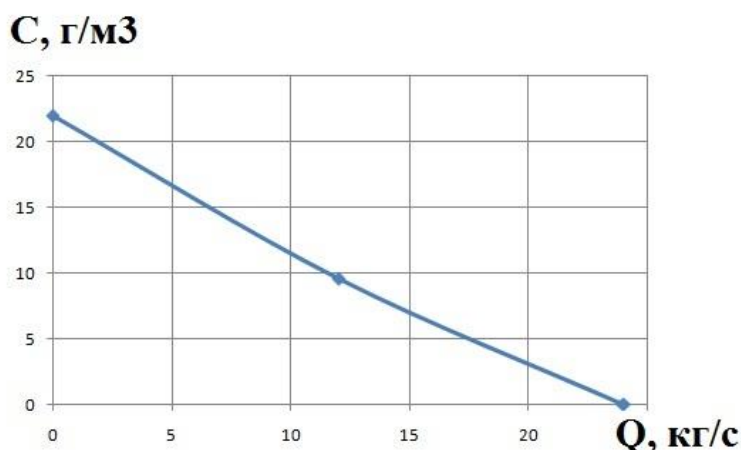


Рисунок 5.23 – Зміна середньої концентрації HCl за пожежним потягом при різній подачі реагенту

Аналізуючи графік, можна зробити висновок, що застосування нейтралізатора дозволяє істотно знизити концентрацію HCl в повітряному середовищі. Таким чином, для мінімізації наслідків екстремальної ситуації в сховищі з ТРП слід рекомендувати подачу нейтралізатора від мобільної установки.

5.4 Оцінка вразливості ТРП в залізничному вагоні до зовнішнього ініційованого впливу

При транспортуванні ТРП може бути здійснена диверсія, зокрема шляхом застосування вогнепальної зброї. На першому етапі досліджень, вивчалася ступінь захищеності вагона при ініційованому впливі в разі пострілу. Розглядається постріл з автомата АК-47 (рис.5.27).



Рисунок 5.24 – Пробиття кулею сталевго листа

[http://d21221701.samgtu.ru/sites/d21221701.samgtu.ru/files/aleksentseva_avt.pdf]

Стінка залізничного вагона складається з двох сталевих пластин. Для оцінки рівня вразливості вагона з вантажем ТРП необхідно розрахувати заперешкодну швидкість кулі за другою стінкою вагона. Якщо ця швидкість досить висока, то куля зашкодить корпус ТРП і викличе його загоряння. Для розрахунку заперешкодної швидкості використовується залежність [72]:

$$v_{over} = \alpha \left(v^p - v_{min}^p \right)^{1/p},$$

де розрахунку параметра v_{min} використана формула Жакоб-де-Марра:

$$v_{min} = 141 \frac{d_c^{0,75} b^{0,5}}{m_c^{0,5}}.$$

У наведених вище залежностях використані такі позначення: d_c і m_c – характеристики сердечника кулі; b – товщина перешкоди; p – функція, залежить від кута обстрілу Θ , $p = 1,5 + z/3$, $z = \frac{b}{R} (\sec \Theta)^{0,75}$; R – калібр кулі; α – параметр, що залежить від механізму руйнування броні при пробитті по типу проколювання ($\alpha = 1$ для конічної форми кулі).

Розрахункова схема задачі представляє собою два сталевих листа розташованих на відстані близько 5 мм (рис.5.25).

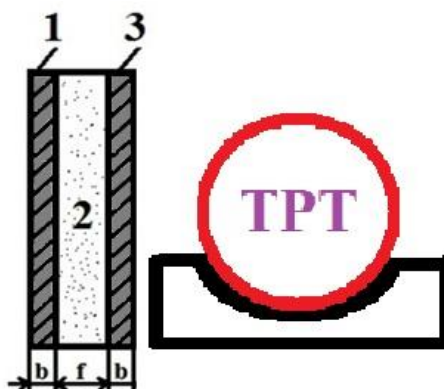


Рисунок 5.25 – Розрахункова схема задачі: 1,3 – сталеві стінки корпусу залізничного вагона товщиною b ; 2 – внутрішній простір між листами сталі товщиною f

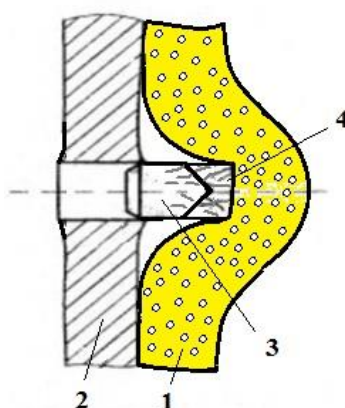


Рисунок 5.26а – Модель гальмування кулі в шарі бронекераміки: 1 – шар бронекераміки; 2 – сталевий лист стінки вагона; 3 – сердечник кулі; 4 – осколки сердечника кулі

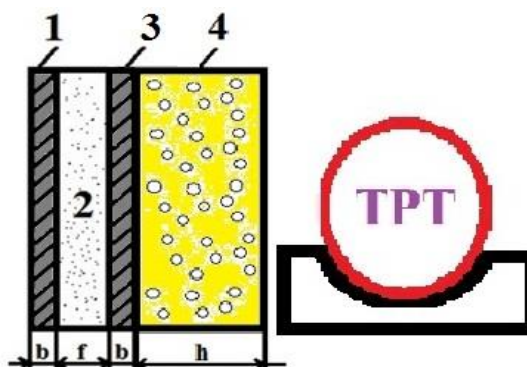


Рисунок 5.26б – Пропонований варіант захисту ТРП в вагоні: 1,3 – сталеві стінки корпусу залізничного вагона товщиною b ; 2 – внутрішній простір між листами сталі товщиною f ; 4 – шар бронекераміки товщиною h

Використовуючи наведені вище залежності, був виконаний розрахунок заперешкодної швидкості для кожного сталевого листа. При розрахунку використовувалися наступні вихідні дані: початкова швидкість кулі $v_0 = 715 \text{ м/с}$, маса кулі $m_c = 7,9 \text{ г}$, калібр кулі $R = 0,00762 \text{ м}$, довжина головної частини кулі $L = 12 \text{ мм}$.

Так як стінка залізничного вагона представляє з себе рознесену перешкоду з двох сталевих листів, то розрахункове значення заперешкодної швидкості для першої перешкоди склало – $v_{1over} = 554 \text{ м/с}$; для другої перешкоди – $v_{2over} = 356 \text{ м/с}$.

Таблиця 5.8

Розрахункове значення заперешкодної швидкості

для першої перешкоди	$v_{1over} = 554 \text{ м/с}$
для другої перешкоди	$v_{2over} = 356 \text{ м/с}$

Таким чином, при такій швидкості кулі відбудеться механічне пошкодження корпусу з ТРП. Відзначимо, що корпус ТРП є багатошаровий циліндричний кокон: шар матеріалу ЖСВМ-III типу кевлар (це зовнішній шар, товщина 15-25 мм), шар гуми (товщина 5-10 мм), шар капрону (1-3 мм). Очевидно, що дана багатошарова конструкція – вразлива при впливі кулі, що летить.

Тепер оцінимо значення температури кулі, після проходження другої сталевий перешкоди, тобто температури з якою куля впливає на ТРП.

Цю температуру можна розрахувати за такою залежністю [59]:

$$\Delta T = \frac{\Delta E}{c},$$

де ΔE – енергія, яка припадає на 1 г свинцю (маса свинцевою сорочки становить близько 4 г), $c = 0,155 \text{ Дж/(г} \cdot \text{K)}$ – теплоємність свинцю.

Для визначення величини ΔE спочатку необхідно розрахувати величину повної енергії $E = \frac{m_c v_{2over}^2}{2}$. Таким чином, при значеннях $m_c = 7,9 \text{ г}$, $v_{2over} = 356 \text{ м/с}$ отримаємо $E = 500,6 \text{ Дж}$.

Тоді питома енергія, яка припадає на 1 г свинцю складе $\Delta E = \frac{E}{4} \approx 125 \text{ Дж}$. Значення шуканого параметра – температури, складе $\Delta T = 806 \text{ }^\circ\text{C}$. Відзначимо, що загоряння ТРП відбувається при температурі близько $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Це означає, що куля викличе не тільки механічне пошкодження корпусу ТРП, але і такий тепловий вплив, що призведе до спалаху ТРП і емісії небезпечних речовин в повітря. Відзначимо, що результати дослідження процесів нагрівання ТРП при ініційованому зовнішньому тепловому впливі відображені в роботах [8, 10].

Для підвищення ступеня захищеності ТРП в вагоні пропонується всередині, біля другої стінки вагона поставити керамічний захист. Цей захист є шаром кераміки завтовшки h (рис.5.26). В цьому випадку куля, після проходження другої стінки «загрузне» в керамічному захисті. Для забезпечення такого захисту треба визначити необхідну товщину шару бронекераміки.

Мінімальне значення товщини бронекераміки h , що забезпечує зупинку кулі, визначимо використовуючи формулу Томпсона [72]:

$$E = \pi R^2 h \left[\frac{1}{2} \sigma + \rho \left(\frac{v_{2over} \cdot R}{L} \right)^2 \right],$$

де $E = \frac{m_c v_{2over}^2}{2}$, R – калібр кулі, σ – максимальне напруження для середовища (захисний шар бронекераміки), $\sigma = 350 \text{ МПа}$; ρ – щільність середовища (захисний шар бронекераміки), $\rho = 2440 \text{ кг/м}^3$; v_{2over} – заперешкодна швидкість за другою сталевую стінкою обшивки вагона; L – довжина головної частини кулі, $L = 12 \text{ мм}$.

Виходячи з формули Томсона, визначимо товщину h :

$$h = \frac{m_c v_{2over}^2}{2} / \left(\pi R^2 \left[\frac{1}{2} \sigma + \rho \left(\frac{v_{2over} \cdot R}{L} \right)^2 \right] \right).$$

Розрахунки показують, що при прийнятих вихідних даних, мінімальне значення h шару бронекераміки складе близько $h = 22 \text{ мм}$.

Таблиця 5.9

Результати розрахунку необхідного значення шару бронекераміки h для захисту ТРП по отриманій заперешкодній швидкості за другою сталеву стінкою обшивки вагона

друга заперешкодна швидкість	мінімальне значення товщини h шару бронекераміки для захисту ТРП
$v_{2over} = 356 \text{ м/с}$	$h = 22 \text{ мм}$

Застосування бронекераміки дозволяє уникнути установки додаткових сталевих пластин всередині вагона.

Таким чином, запропонований спосіб захисту вагона від кульового пробивання, який дозволяє істотно зменшити вразливість вагона при екстремальній ситуації – теракт, що сприяє підвищенню рівня безпеки при транспортуванні ТРП. Даний спосіб є економічним і не вимагає істотних змін в конструкції вагона.

Висновки до розділу 5

1. Обґрунтовано необхідність проведення обчислювального експерименту, як єдиного засобу вирішення задачі з оцінки ефективності застосування методу нейтралізації для підвищення промислової безпеки при горінні ТРП і наукового обґрунтування параметрів нейтралізації.

2. На основі представлених результатів досліджень можна зробити висновок про те, що застосування методу нейтралізації дозволить підвищити промислову безпеку при загорянні ТРП.

3. Результати численних досліджень показують, що розроблені моделі дозволяють оцінювати ефективність методу нейтралізації з урахуванням практично всіх основних фізичних факторів, що впливають на цей процес: швидкість вітру, інтенсивність емісії реагенту, забруднювача, швидкість руху поїзда і т.д.

4. Запропонований метод нейтралізації нескладно імплементувати в систему заходів по локалізації та ліквідації осередків хімічного зараження, тому що він не вимагає універсального, дорогого обладнання, а заснований на застосуванні стандартної техніки.

5. Проведені дослідження показали високу вразливість вагона з ТРП до зовнішнього впливу при пострілі, що підвищує ризик виникнення екстремальної ситуації – загоряння ТРП під час його транспортування або при зберіганні в вагоні. Запропоновано ефективний метод захисту вагона від кульового пробивання.

6. Результати досліджень, розроблені моделі впроваджені в Головному управлінні Державної служби з надзвичайних ситуацій в Дніпропетровській області при моделюванні різних сценаріїв екстремальних ситуацій на об'єктах ПХЗ, що є основою розробки плану ліквідації аварійних ситуацій. Розроблені моделі та коди використовуються в навчальному процесі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна при підготовці студентів, які навчаються за спеціалізацією «Водопостачання та каналізація», а також кафедри опалення, вентиляції та якості повітряного середовища ДВНЗ «ПДАБА» при читанні навчальних дисциплін і при виконанні дипломних і магістерських робіт.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить отримані автором результати, які в сукупності вирішують науково-практичну задачу підвищення безпеки на об'єктах Павлоградського хімічного заводу при виникненні екстремальних ситуацій. Виконані в роботі дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. На основі проведеного аналізу методів оцінки забруднення повітря при емісії токсичних речовин на хімічно небезпечних об'єктах встановлено, що існуюча нормативна методика прогнозу при аварійних ситуаціях на хімічно небезпечних об'єктах не відповідає сучасним вимогам, так як не враховує важливих фізичних параметрів, які впливають на забруднення робочої зони, що не дозволяє оцінити небезпеку та прийняти попередні засоби захисту працюючих від уражаючих факторів.

2. Проведені дослідження з моделюванням забруднення атмосферного повітря при виникненні екстремальних ситуацій з загорянням ТРП та встановлено закономірності, які показують перевищення значення прогнозованої концентрації над гранично допустимою концентрацією небезпечної речовини в робочих зонах, при викиді продуктів горіння ТРП.

3. Розроблено комплекс чисельних моделей класу «diagnostic models», які дозволили вперше науково обґрунтовано оцінити рівень промислової безпеки в різних масштабах при екстремальних ситуаціях в сховищі ТРП.

4. Розроблена інформаційно-моделююча система для прогнозу наслідків екстремальних ситуацій, що супроводжуються емісією хімічно небезпечних речовин, яка дозволяє в режимі реального часу прогнозувати рівень безпеки на об'єктах ПХЗ шляхом порівняння санітарно-гігієнічних нормативів з результатами розрахунків по забрудненню повітряного середовища робочих зон.

5. На основі розроблених чисельних моделей виконана оцінка ефективності застосування захисного валу біля сховища з ТРП і показана

можливість локального підвищення рівня промислової безпеки за рахунок застосування додаткового екрану біля сховища.

6. Запропоновано спосіб зниження небезпеки при викиді продуктів горіння ТРП, який заснований на методі нейтралізації. Застосування даного способу в разі екстремальних ситуацій з ТРП, дозволяє істотно підвищити рівень промислової безпеки на ПХЗ.

7. Запропонований спосіб захисту вагона від кульового пробивання, який дозволяє істотно зменшити вразливість вагона при екстремальних ситуаціях – теракту, що сприяє підвищенню рівня безпеки при транспортуванні ТРП. Даний спосіб є економічним і не вимагає істотних змін в конструкції вагона.

8. Створений комплекс чисельних моделей, який дозволяє підвищити якість прогнозу інформації по оцінці рівня небезпеки при розробці ПЛАСа для хімічно небезпечних об'єктів.

9. Розроблені чисельні моделі і отримані в дисертаційній роботі результати досліджень використовуються в Головному управлінні Державної служби з надзвичайних ситуацій в Дніпропетровській області та в навчальному процесі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за спеціальністю «Водопостачання та каналізація», а також кафедри опалення, вентиляції та якості повітряного середовища ДВНЗ «ПДАБА» при читанні навчальних дисциплін і при виконанні дипломних і магістерських робіт.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий : учеб. пособие : в 6 кн. / [ред. Котляревский В. А., Забегаева А. В.]. – Москва : Изд-во АСВ, 2001–2005.
2. Аварія з фосфором у Львівській області: факти, проблеми, екологічні наслідки / Е. В. Соботович, Г. В. Лисиченко, Ю. Л. Забулонов та ін. // Вісн. Ін-ту геохімії навколишнього середовища. – Київ, 2007. – Вип. 14. – С. 8–18.
3. Антошкина Л. И. Оценка экологического риска при авариях с химически опасными веществами / Л. И. Антошкина, Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько. – Днепропетровск : Наука и образование, 2008. – 136 с.
4. Аргучинцев В. К. Моделирование мезомасштабных гидротермодинамических процессов и переноса примесей в атмосфере и гидросфере региона оз. Байкал / В. К. Аргучинцев, А. В. Аргучинцев. – Иркутск : Изд-во Иркутского гос. ун-та, 2007. – 255 с.
5. Басманов А. Е. Оценка концентрации опасных химических веществ в воздухе при непрерывной активности источника / А. Е. Басманов, С. С. Говаленков // Проблеми надзвичайних ситуацій : зб. наук. пр. – Харків : Нац. ун-т цивільного захисту України, 2010. – Вип. 12. – С. 21–27.
6. Басманов А. Е. Зонирование местности в районе непрерывно действующего источника опасного химического вещества / А. Е. Басманов, С. С. Говаленков, М. В. Васильев // Проблеми надзвичайних ситуацій : зб. наук. пр. – Харків : Нац. ун-т цивільного захисту України, 2011. – Вип. 13. – С. 20–33.
7. Беляев Н. Н. Загрязнение воздушной среды на промплощадках / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько // Екологічний інтелект 2007: тези доп. Міжнародної науково-практ. конф. студ. та молодих вчених, Дніпропетровськ, квітень, 2007 р. – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2007. – С. 34.

8. Беляев Н. Н. Моделирование нестационарных процессов аварийного загрязнения атмосферы : [монография] / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, П. Б. Машихина. – Днепропетровск : «Акцент ПП», 2014. – 127 с.
9. Беляев Н. Н. Защита атмосферы от загрязнения при миграции токсичных веществ / Н. Н. Беляев, В. М. Лисняк. – Днепропетровск : Инновация, 2006. – 152 с.
10. Беляев Н. Н. Защита атмосферы от загрязнения при эмиссии опасного вещества из движущегося железнодорожного вагона / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, П. С. Кириченко // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. тр. / под общ. ред. В. И. Большакова. – Днепропетровск : ПГАСА, 2016. – Вып. 87. – С. 13–18.
11. Беляев Н. Н. Метод расчета распространения токсичных веществ при залповых выбросах на промплощадку / Н. Н. Беляев, А. В. Полищук, Е. Ю. Гунько // Проблеми природокористування, сталого розвитку та техногенної безпеки регіонів : тези доп. IV Міжнародної науково-практ. конф., Дніпропетровськ, 2–5 жовтня 2007 р. – Дніпропетровськ, 2007. – С. 262.
12. Беляев Н. Н. Моделирование процессов загрязнения атмосферы при чрезвычайных ситуациях / Н. Н. Беляев, Т. Л. Бушина, Е. Ю. Гунько // Интеграция Украины в международную транспортную систему : тез. докл. 2-й Международной научно-практ. конф., Днепропетровск, 27–28 мая 2010 г. – Днепропетровск : ДНУЖТ, 2010. – С. 7–8.
13. Беляев Н. Н. Прогнозирование загрязнения приземного слоя атмосферы при горении твердого ракетного топлива в хранилище / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов // Зб. наук. пр. Нац. гірничого ун-ту. – Дніпропетровськ : Вид-во НГУ, 2013. – № 42. – С.160–167.
14. Беляев Н. Н. Моделирование рассеивания токсичного газа в атмосфере с учетом рельефа местности / Н. Н. Беляев, П. Б. Машихина, О. П. Шакина // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. –

- Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2008. – Вип. 20. – С. 82–86.
- 15.Беляев Н. Н. Моделирование процесса загрязнения воздушной среды на промплощадках при аварийных выбросах токсичных веществ / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, А. Н. Лукашенко // Проблемы обчислювальної механіки і міцності конструкцій. – Дніпропетровськ : ДНУ, 2006. – Вип. 10. – С. 3–10.
- 16.Беляев Н. Н. Оценка уровня безопасности при аварийных выбросах на промышленных объектах / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту : тези доп. 71-ї Міжнародної науково-практ. конф., Дніпропетровськ, 14–15 квітня 2011 р. – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2011. – С. 262.
- 17.Беляев Н. Н. Оценка уровня безопасности при аварийных выбросах химически опасных веществ / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько // Современные информационные технологии на транспорте, промышленности и образовании : тез. докл. Международной научно-практ. конф., Днепропетровск, 12–13 мая 2011 г. – Днепропетровск : ДНУЖТ, 2011. – С. 47.
- 18.Беляев Н. Н. Моделирование загрязнения атмосферы при аварийном выбросе токсичного вещества / Н. Н. Беляев, К. Я. Моисеенко, Е. Ю. Гунько // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. – Днепропетровск : ПГАСА, 2008. – Вып. 46. – С. 41–46.
- 19.Беляев Н. Н. Расчет загрязнения атмосферы при диверсии на железнодорожном транспорте в случае перевозки химически опасного груза / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов // Зб. наук. пр. Нац. гірничого ун-ту. – Дніпропетровськ : Вид-во НГУ, 2015. – № 49. – С. 188–194.
- 20.Беляев Н. Н. Моделирование и анализ загрязнения воздушной среды при аварии в хранилище химически опасных веществ / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов // Тезисы докл. Международной научно-практ. конф. «Современные информационные технологии на транспорте, в

- промышленности и образовании», Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 18–19 апреля 2013 г. – Днепропетровск : Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2013. – С. 54–55.
21. Беляев Н. Н. CFD моделирование загрязнения атмосферы при чрезвычайной ситуации в хранилище твердого ракетного топлива / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов // Материалы Международной науч. конф. по аналитической химии и экологии, посвященной 110-летию со дня рождения академика М. Т. Козловского, Алматы, 9–11 октября 2013 г. / под. ред. М. К. Наурызбаева. – Алматы : Казак университеті, 2013. – С. 51–52.
22. Беляев Н. Н. Прогноз загрязнения атмосферы при аварийных выбросах на промплощадках химически опасных производств / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько // Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу : тези доп. науково-практ. конф., Дніпропетровськ, 13–15 листопада 2008 р. – Дніпропетровськ : ДНУ, 2008. – С. 159–160.
23. Беляев Н. Н. Методы экспресс расчета уровня загрязнения атмосферы / Н. Н. Беляев, Е. Д. Коренюк, В. К. Хрущ. – Днепропетровск : Наука и образование, 2002. – 192 с.
24. Беляев Н. Н. Моделирование аварийного загрязнения атмосферы при чрезвычайной ситуации в хранилище твердого ракетного топлива / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, А. В. Шевченко // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2014. – Вип. 5 (53). – С. 29–38.
25. Беляев Н. Н. Прогноз токсичного поражения людей при авариях на химически опасных объектах / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько // Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании : тез. докл. Международной научно-практ. конф., Днепропетровск, 14–15 мая 2009 г. – Днепропетровск : ДНУЖТ, 2009. – С. 34.

- 26.Беляев Н. Н. Моделирование процесса загрязнения атмосферы при горении твердого ракетного топлива / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Серія «Механіка». – Дніпропетровськ : ДНУ, 2013. – Вип. 17; т. 1; № 5. – С. 179–184.
- 27.Беляев Н. Н. Численное моделирование загрязнения атмосферного воздуха при аварии на химически-опасном объекте / В. В. Беляева, А. В. Берлов // 36. наук. пр. Нац. гірничого ун-ту. – Дніпропетровськ : Вид-во НГУ, 2015. – № 47. – С. 143–148.
- 28.Беляев Н. Н. Анализ загрязнения воздушной среды при авариях на химически опасных объектах / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов // Проблеми природокористування, сталого розвитку та техногенної безпеки регіонів : матеріали сьомої міжнародної науково-практ. конф. (до 95-річчя НАН України), Дніпропетровськ, 8–11 жовтня 2013 р. – Дніпропетровськ : Моноліт, 2013. – С. 192–193.
- 29.Беляев Н. Н. Распространение загрязняющих веществ в атмосфере в условиях застройки / Н. Н. Беляев, Т. М. Пустоварова, Е. Ю. Гунько // Екологія і природокористування. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 10. – С. 169–173.
- 30.Беляев Н. Н. Расчет рассеивания токсичных веществ на промплощадках / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, О. П. Шакина // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту : тези доп. 67-ї Міжнародної науково-практ. конф., Дніпропетровськ, 24–25 травня 2007 р. – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2007. – С. 217–218.
- 31.Беляев Н. Н. Численное моделирование затекания токсичного газа в помещение при аварии на промплощадке химически опасного объекта / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, Т. П. Решетняк // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2011. – Вип. 36. – С. 143–147.
- 32.Беляев Н. Н. Прогнозирование уровня загрязнения атмосферы в случае аварии при транспортировке химически опасного груза / Н. Н. Беляев,

- А. В. Берлов, П. С. Кириченко // Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно небезпечних об'єктах : матеріали Всеукр. науково-практ. конф. студентів та молодих вчених, ХНАДУ, 28–29 жовтня 2015 р. – Харків : ХНАДУ, 2015. – С. 140–142.
33. Берлов А. В. Экспериментальное и теоретическое исследование защиты атмосферы от загрязнения при эмиссии опасного вещества из вагона / А. В. Берлов // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту : тези 76-ї Міжнародної науково-практ. конф., Дніпропетровськ, 19–20 травня 2016 р. – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2016. – С. 265.
34. Берлов А. В. Расчет загрязнения приземного слоя атмосферы при горении твердого ракетного топлива / А. В. Берлов // Науковий вісн. будівництва : зб. наук. пр. – Харків : Харк. нац. ун-т буд-ва та архітектури, 2014. – № 1(75). – С. 185–189.
35. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. – 273 с.
36. Бойченко С. В. Екологічна освіта – основа сталого розвитку суспільства: проблеми і перспективи вищої школи : монографія / С. В. Бойченко, Т. В. Саєнко. – Київ : Україна, 2013. – 502 с.
37. Бесчастнов М. В. Предупреждение аварий в химических производствах / М. В. Бесчастнов, В. М. Соколов. – Москва : Химия, 1979. – 392 с.
38. Бруязцкий Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Е. В. Бруязцкий. – Киев : Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.
39. Букі О. О. Захист населення і територій від екологічної небезпеки в залежності від розташування джерел хімічних надзвичайних ситуацій / О. В. Букі, Ю. В. Квітковський // Науковий вісн. будівництва : зб. наук. пр. – Харків : Харк. нац. ун-т буд-ва та архітектури, 2014. – № 3(77). – С. 211–214.

40. Вельтищева К. С. Вопросы дальнего переноса загрязняющих веществ (обзор) / К. С. Вельтищева. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1979. – 56 с.
41. Генихович Е. Л. К вопросу о применимости гауссовой модели для расчета загрязнения воздуха / Е. Л. Генихович // Тр. ГГО. – Ленинград, 1982. – Вып. 450. – С. 35–40.
42. Глива В. А. Сучасні підходи до моделювання і прогнозування динаміки шкідливих факторів виробничого середовища / В. А. Глива, Л. О. Шевченко // Матеріали XI міжнародної науково-техн. конф. «АВІА-2013», 21.05–23.05.2013 / Міністерство освіти та науки України, НАН України, Національний авіаційний університет. – Київ : НАУ, 2013. – Т. 5. – С. 32.37 – 32.40.
43. Гунько Е. Ю. Оценка риска токсичного поражения людей при аварийном выбросе химически опасного вещества / Е. Ю. Гунько // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2008. – Вип. 20. – С. 87–90.
44. Гусев Н. Г. Радиоактивные выбросы в биосфере / Н. Г. Гусев, В. А. Беляев. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 257 с.
45. Егоров Е. В. Об одном приближенном методе расчета метеорологических полей и поля концентрации загрязняющей примеси в атмосфере / Е. В. Егоров, А. В. Хаминич // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту. Серія: Механіка. – Дніпропетровськ : ДНУ, 2004. – Вип. 8, № 6. – С. 76–88.
46. Едигаров А. С. Численный расчет турбулентного течения холодного тяжелого газа в атмосфере / А. С. Едигаров // Журн. вычислительной математики и мат. физики. – 1991. – Т. 31, № 9. – С. 1369–1380.
47. Емельянов В. М. Защита населения и территорий в чрезвычайных ситуациях / В. М. Емельянов, В. Н. Коханов, П. А. Некрасов. – Москва : Академ. проект «Трикта», 2005. – 480 с.
48. Загрязнение воздушной и водной сред / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, П. Б. Машихина, О. П. Шакина // Безопасность жизнедеятельности в XXI

- веке : тез. докл. VII Международной конф., Днепропетровск, октябрь, 2007 г. – Днепропетровск, 2007. – С. 68.
49. Запорожець О. І. Проект концепції управління ризиками надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру / О. І. Запорожець // Безпека життєдіяльності. – 2007. – № 4. – С. 2–4.
50. Захматов В. Д. Техногенна аварія у Львівській області / В. Д. Захматов // Безпека життєдіяльності. – 2007. – № 8. – С. 13–14.
51. Защита производственного персонала и населения от сильнодействующих ядовитых веществ на химически опасных объектах. – Москва : ВАХЗ, 1991. – 223 с.
52. Зеленько Ю. В. Анализ и оптимизация управления рисками возникновения чрезвычайных ситуаций при транспортировке нефтепродуктов железнодорожным транспортом / Ю. В. Зеленько, С. В. Бойченко, Ю. В. Белокопытов // Залізничний трансп. України. – 2011. – № 3. – С. 26–28.
53. Зберовский А. В. Математическое моделирование загрязнения атмосферы при аварийном выбросе химически опасного вещества / А. В. Зберовский // Зб. наук. пр. Нац. гірничого ун-ту. – Дніпропетровськ : Вид-во НГУ, 2012. – № 37. – С. 305–310.
54. Зберовский А. В. Численное моделирование загрязнения атмосферы при аварийных разливах / А. В. Зберовский // Зб. наук. пр. Нац. гірничого ун-ту. – Дніпропетровськ : Вид-во НГУ, 2012. – № 37. – С. 315–321.
55. Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю. А. Израэль. – Москва : Гидрометеиздат, 1984. – 560 с.
56. Калабин Г. В. Метод расчета аэрогазодинамики камерообразных выработок на основе математического моделирования / Г. В. Калабин, А. А. Бакланов, П. В. Амосов // ФТПРПИ. – 1990. – № 1. – С. 74–88.
57. Карташов Э. М. Метод интегральных преобразований в аналитической теории теплопроводности твердых тел / Э. М. Карташов // Изв. РАН. Энергетика. – 1993. – № 2. – С. 99–108.

58. Калашников А. В. Прогноз уровня загрязнения окружающей среды при аварии на Павлоградском химическом заводе / А. В. Калашников, А. В. Берлов, Н. Н. Беляев // *Екологічний інтелект–2012 : матеріали доп. VII Міжнародної XVIII Традиційної науково-практ. конф., Дніпропетровськ, 24–25 квітня 2012 р. – Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2012. – С. 208–209.*
59. Калашников В. В. Исследование влияния конструкции пули на процесс пробивания стальной преграды / В. В. Калашников, С. Е. Алексенцева // *Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Технические науки. – Самара, 2009. – Вып. 2 (24). – С. 99–105.*
60. Ковалец И. В. Численная гидродинамическая модель атмосферной дисперсии загрязнений вокруг зданий / И. В. Ковалец // *Сб. Ин-та проблем математических машин и систем НАН Украины. – 2010. – Вып. 1 – С. 3–10.*
61. Ковеня В. М. Метод расщепления в задачах газовой динамики / В. М. Ковеня, Н. Н. Яненко. – Новосибирск : Наука, 1981. – 304 с.
62. Концептуальні положення комплексного екологічного моніторингу районів радіаційно небезпечних об'єктів / А. Г. Шапар, М. А. Ємець, О. К. Тяпкін та ін. // *Екологія і природокористування. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 14. – С. 224–233.*
63. Крейт Ф. Основы теплопередачи / Ф. Крейт, У. Блэк. – Москва : Мир, 1983. – 512 с.
64. Кузнецов С. Г. Методы моделирования распределения загрязнения в городской застройке / С. Г. Кузнецов, Г. А. Назаров // *Проблеми архітектури і містобудування. Вісн. Донбаської нац. акад. буд-ва і архітектури. – Макіївка, 2010. – Вип. 2 (82). – С. 158–161.*
65. Купаев В. И. Методы локализации очага аварии и ликвидации ее последствий на химически опасных объектах железнодорожного транспорта / В. И. Купаев, С. В. Рассказов // *Транспорт: наука, техника, управление. – 2003. – № 4. – С. 28–34.*

66. Лаврентьев М. А. Проблемы гидродинамики и их математические модели / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. – Москва : Наука, 1977. – 407 с.
67. Ліквідація пожеж на залізничному транспорті / М. Д. Кацман, Г. Б. Кононов, І. В. Діденко, Н. В. Огороднічук. – Київ : Основа, 2006. – 216 с.
68. Логачев И. Н. Аэродинамические основы аспирации / И. Н. Логачев, К. И. Логачев. – Санкт-Петербург : Химиздат, 2005. – 659 с.
69. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – Москва : Наука, 1978. – 735 с.
70. Лыков А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – Москва : Энергия, 1968. – 471 с.
71. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
72. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования / В. А. Григорян, И. Ф. Кобылкин, В. М. Маринин, Е. Н. Чистяков ; под ред. В. А. Григоряна. – Москва : Изд-во РадиоСофт, 2008. – 406 с.
73. Мацак В. Г. Гигиеническое значение скорости испарения и давления пара токсических веществ, применяемых в производстве / В. Г. Мацак, Л. К. Хоцянов. – Москва : Медгиз, 1959. – 231 с.
74. Машихина П. Б. Моделирование распространения примеси в атмосфере с учетом рельефа местности / П. Б. Машихина // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2009. – Вип. 27. – С. 138–142.
75. Меньшиков В. В. Опасные химические объекты и техногенный риск / В. В. Меньшиков, А. А. Швыряев. – Москва : Изд-во Моск. ун-та, 2003. – 245 с.
76. Методи розрахунку концентрації повітряних забруднень на міській території : навч. посібник / Є. Р. Абрамовський, Ю. Л. Гринчишин,

- Є. В. Єгоров, О. А. Загній. – Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2010. – 223 с.
- 77.Методика прогнозування наслідків виливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті. – Київ, 2001. – 33 с.
- 78.Методика расчета концентрации в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий / Госкомгидромет. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1987.– 93 с.
- 79.Механизация работ в хозяйстве электрификации и электроснабжения железных дорог. Методическое пособие по устройству, эксплуатации автомотрис, автодрезин, специальных машин, механизмов и средств малой механизации, применяемых в хозяйстве электрификации и электроснабжения железных дорог Российской Федерации / Департамент электрификации и электроснабжения ОАО «Российские железные дороги». – Москва : «ТРАНСИЗДАТ», 2004. – 456 с.
- 80.Моделирование аварийных ситуаций на промышленных объектах и безопасность жизнедеятельности / Л. И. Антошкина, Н. Н. Беляев, Л. Ф. Долина, Е. Д. Коренюк. – Днепропетровск : Новая идеология, 2011. – 124 с.
- 81.Несвижский Ф. А. Расчет длины зоны поражения / Ф. А. Несвижский, А. П. Потанин, Н. С. Эвенчик // Тр. ГИАП. – Москва, 1978. – Вып. 51. Магистральные аммиакопроводы. – С. 34–43.
82. Никитенко Н. И. Теория тепломассопереноса / Н. И. Никитенко. – Киев : Наук. думка, 1983. – 352 с.
- 83.Ночвай В. И. Оптимизация эмиссионных параметров численной модели распространения атмосферных загрязнений / В. И. Ночвай, В. И. Панчук // Моделювання та інформаційні технології. – ІПМЕ. – 2010. – Спеціальний вип.,т. 2. – С. 308–314.
- 84.Озмидов Р. В. Горизонтальная турбулентность и турбулентный обмен в океане / Р. В. Озмидов. – Москва : Наука, 1968. – 204 с.

85. Пененко В. В. Модели и методы для задач охраны окружающей среды / В. В. Пененко, А. Е. Алоян. – Новосибирск : Наука, 1985. – 257 с.
86. Пляцук Л. Д. Аналіз методів математичного моделювання розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері / Л. Д. Пляцук, В. В. Бойко // Вісн. КНУ ім. Михайла Остроградського. – Кременчук, 2010. – Вип. 6. – С. 1–4.
87. Павлихин Г. П. Экологическая экспертиза. Программы ликвидации запасов химического оружия армии США / Г. П. Павлихин // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 1991. – № 8. – С. 1–16.
88. Приходько А. А. Компьютерные технологии в аэрогидродинамике и теплообмене / А. А. Приходько. – Київ : Наук. думка, 2003. – 380 с.
89. Прохач Э. Е. Метод расчета параметров рассеяния пара пролитой на грунт жидкости / Э. Е. Прохач, Н. П. Попов // Проблемы надзвичайних ситуацій. – Харків : НУЦЗУ, 2009. – Вип. 10. – С. 133–139.
90. Пшинько А. Н. Моделирование загрязнения атмосферы при техногенных авариях / А. Н. Пшинько, Н. Н. Беляев, П. Б. Машихина. – Днепропетровск : Новая идеология, 2011. – 166 с.
91. Ракетные топлива (по материалам зарубежной печати) / под ред. акад. АН БССР Я. М. Паушкина, д.т.н. А. З. Чулкова. – Москва : Изд-во «МИР», 1975. – 188 с.
92. Рогаль П. До теорії прогнозування наслідків аварії: зони планування та зони реагування / П. Рогаль, В. Кондратюк // Безпека життєдіяльності. – 2008. – № 1–2. – С. 28–30.
93. Роуч П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. – Москва : Мир, 1980. – 616 с.
94. Рудаков Д. В. Модель рассеивания примеси в приземном слое атмосферы над поверхностью со сложным рельефом / Д. В. Рудаков // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту. Серія : Механіка. – Дніпропетровськ : ДНУ, 2004. – Вип. 8, № 6, т. 1. – С. 89–97.

95. Русакова Т. И. Задача численного расчета обтекания зданий воздушным потоком / Т. И. Русакова, В. И. Карплюк // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту. Серія : Механіка.– Дніпропетровськ : ДНУ, 2007. – № 2/1. – С. 53–58.
96. Самарский А. А. Математическое моделирование / А. А. Самарский, А. П. Михайлов. – Москва : Физматлит, 2001. – 320 с.
97. Самарский А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1983. – 616 с.
98. Светличная С. Д. Оценка полученной токсодозы при распространении первичного облака токсического вещества / С. Д. Светличная // Проблеми надзвичайних ситуацій : зб. наук. пр. – Харків : НУЦЗУ, 2011. – Вип. 13. – С. 127–132.
99. Совершенствование системы управления производством и охраной труда / Т. В. Бунько, В. Г. Шевченко, И. А. Ященко, И. Е. Кокоулин // Геотехнічна механіка : міжвід. зб. наук. пр. – Дніпропетровськ, 2016. – Вип. 127. – С. 3–17.
100. Степаненко С. Н. Решение уравнения турбулентной диффузии для стационарного точечного источника / С. Н. Степаненко, В. Г. Волошин, С. В. Типцов // Укр. гідрометеорологічний журн. – 2008. – № 3. – С. 13–24.
101. Теория принятия решений при проведении аварийно-спасательных (АСР) и ремонтно-восстановительных (РВР) работ в условиях обрушения строительных конструкций / А. С. Беликов, А. И. Касьян, С. Ю. Рагимов и др. // Проблеми надзвичайних ситуацій : зб. наук. пр. – Харків : Нац. ун-т цивільного захисту України, 2014. – Вип. 19. – С. 16–23.
102. Устименко Е. Б. К вопросу об экологических последствиях утилизации ракетных двигателей твердого топлива методом взрывания / Е. Б. Устименко // Наук. вісн. Нац. гірничого ун-ту. – Дніпропетровськ : Вид-во НГУ, 2008. – № 5. – С. 78–82.
103. Уорк К. Загрязнение воздуха. Источники и контроль / К. Уорк, С. Уорнер. – Москва : Мир, 1980. – 539 с.

104. Филаретова А. Н. Воздействие продуктов сгорания твердого ракетного топлива на компоненты южно-таежных экосистем : автореф. дис. ... канд. географ. наук : спец. 25.00.36 «Геоэкология» (Науки о земле) / А. Н. Филаретова. – Москва, 2013. – 26 с.
105. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Киев : Наук. думка, 1997. – 368 с.
106. Шереметьева У. М. Моделирование процессов распространения токсичных компонентов топлива при эксплуатации жидкостных ракет : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : спец. 01.02.05 «Механика жидкости газа и плазмы» / У. М. Шереметьева. – Томск, 2006. – 26 с.
107. Швыдько П. В. Экологические последствия утилизации твердого ракетного топлива / П. В. Швыдько // Наук. вісн. Нац. гірничого ун-ту. – Дніпропетровськ : Вид-во НГУ, 2009. – № 8. – С. 87–91.
108. Швыряев А. А. Оценка риска воздействия загрязнения атмосферы в исследуемом регионе / А. А. Швыряев, В. В. Меньшиков. – Москва : Изд-во Моск. ун-та, 2004. – 124 с.
109. Эльтерман В. М. Вентиляция химических производств / В. М. Эльтерман. – 3-е изд., перераб. – Москва : Химия, 1980. – 288 с.
110. A wind tunnel for studying the effects of thermal stratification in the atmosphere / Y. Ogawa, P. G. Dirosev, K. Vehara, H. Veda // Atmos. Environ. – 1981. – № 5. – P. 801–821.
111. Atkinson R. Our present Understanding of the Gas-Phase Atmospheric Degradation of VOCs / R. Atkinson // Simulation and Assessment of Chemical Processes in a Multiphase Environment : Proc. of the NATO Advanced Research Workshop, Air Pollution Research Center, University of California, Alushta, Ukraine, 1–4 October 2007. – Dordrecht : Published by Springer, 2007. – P. 1–19.
112. Berlov O. V. Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo / O. V. Berlov // Наука та прогрес

- транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2016. – Вип. 1 (61). – С. 48–54.
113. Berlov A. V. Atmosphere pollution after the accident at the chemical plant / A. V. Berlov // Доклады международного науч. симп. «Неделя эколога–2015», Днепродзержинск, 13–16 апреля 2015 г. – Днепродзержинск : ДГТУ, 2015. – С. 13.
114. Belayev N. N. Computer simulation of the pollutant dispersion among buildings / N. N. Belayev, M. I. Kazakevitch, V. K. Khrutch // Wind Engineering into 21st Century : Proc. of the Tenth Intern. Conf. on Wind Engineering. – A. A. Balkema/Rotterdam /Brookfield/ Copenhagen (Denmark), 1999. – P. 1217–1220.
115. Belayev N. N. An engineering approach to simulate the 3-d wind flows over buildings / N. N. Belayev, V. K. Khrutch // Proc.of the Fourth Intern. Colloquium on Bluff Body Aerodynamics & Applications, Ruhr-Universitat. Volume of Abstracts. Bochum (Germany), Sept. 11–14, 2000. – Bochum, 2014. – P. 471–475.
116. Belyaev M. Air Pollution Modelling of Technogenic Catastrophes caused by Terrorist Attacks on Rail Transport of Chemical Substances / M. Biliaiev // Simulation and Assessment of Chemical Processes in a Multiphase Environment. NATO Science for Peace and Security. Sub-Series C: Environmental Security / Springer. – 2007. – P. 327–336.
117. Biliaiev M. The Numeric Forecast of Air Pollution Caused by a Blasting Accident in the Enterprise Responsible for Rocket Fuel Utilization in Ukraine / M. Biliaiev, M. Kharitonov // Disposal of Dangerous Chemicals in Urban Areas and Mega Cities : Proc. of the NATO Advanced Research Workshop/ Springer. – 2013. – P. 313–327.
118. Biliaiev M. M. Numerical simulation of the atmosphere pollution after accident at the “Tolliaty-Odessa” ammonia pipe / M.M. Biliaiev, M.M. Kharitonov, L.V. Amelina // NATO Science for peace and security series

- C: Environmental security; Air pollution modeling and its application XXII, 2014. – pp. 391–395.
119. Biliaiev M. M. Numerical simulation of the atmosphere pollution after the accident at the chemical plant / M. M. Biliaiev, A. V. Berlov, A. V. Shevchenko // V International scientific conf. «Applied problems of the fluid mechanics and heat and mass transfer», Dnipropetrovsk national university, Nov. 6–8, 2014. – Dnipropetrovsk : DNU, 2014. – P. 173–174.
120. Chatwin P. C. Quantitative Models of Environmental Pollution: a Review / P. C. Chatwin // College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution Modelling, 16 May–3 June 1994. – № SMR / 760–18.
121. Cosemans Guido J. J. A new approach to building downwash modelling / J. J. Cosemans Guido // Conf. Abstracts of 31st NATO / SPS Intern. Technical Meeting on Air Pollution Modelling and it's Application, 27 September – 01 October, 2010, Torino, Italy. – Torino, 2010. – № P.1.6.
122. Desiato F. Arco: a practical Model for the study of the Atmospheric Dispersion Under Complex Conditions / F. Desiato // College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution Modelling, 16 May–3 June 1994. – № SMR / 760–46.
123. Development of building resolving atmospheric CFD code taking into account atmospheric radiation in complex geometric / Y. Qu, M. Millez, L. Musson-Genon, B. Carrissimo // Conf. Abstracts of 31st NATO / SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and it's Application, 27 September–01 October, 2010, Torino, Italy. – Torino, 2010. – № P.1.5.
124. Effectiveness of Urban Shelter-in-Place II: Residential Districts / Wanyu R. Chan, William W. Nazaroff, Phillip N. Price, Ashok J. Gadgil // Atmospheric Environment . – 2007. – Vol. 41, iss.33. – P. 7082–7085.
125. Graziani G. Long-range dispersion models and their applications: ATMES and ETEX / G. Graziani // College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution Modelling, 16 May – 3 June 1994. – № SMR / 760–1.

126. Gross A. Theoretical determination of reaction parameters for atmosphere chemical reactions / A. Gross, S. Jorgensen // Simulation and Assessment of Chemical Processes in a Multiphase Environment : Proc of the NATO Advanced Research Workshop. Department of Chemistry, University of Copenhagen. Alushta, Ukraine, 1–4 October, 2007. – Dordrecht : Published by Springer, 2007. – P. 31–45.
127. Guidance for Conducting Risk Assessments and Related Risk Activities for the DOE-ORO Environmental Management program / The University of Tennessee. U.S. Department of Energy Office of Environmental Management, April, 1999. – 232 p.
128. Hanna S. Hybrid Plume Dispersion Model (HPDM) Improvements and Testing / S. Hanna, J. Chang // College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution Modelling, 16 May–3 June 1994. – № SMR/760–4. – P.1491 – 1508.
129. KEVLAR® Aramid fiber / Technical guide. – Dupont registered trademark. Power of performance. – H-77848 4/00. Printed in U.S.A.
130. Kim M. S. Experimental investigation of the ground effect on the flow around some two-dimensional bluff bodies with moving-belt technique / M. S. Kim, D. Geropp // J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1998. – Vol. 74–76. – P. 511–519.
131. Kong L. A 3-D tolerant wind tunnel for general wind engineering tests / L. Kong, G.V. Parkinson // Proc. of the 3-rd Intern. Colloquium in bluff body Aerodynamics and Applications, Blacksburg, USA, 28 July–1 August, 1996. – Blacksburg, 1996. – P.975 – 985.
132. Leitl B. Cedval-compilation of experimental data for validation of microscale numerical dispersion models / Bernd Leitl, Michael Schatzmann // 2nd EECWE. Prague, Sept. 7–11, 1998. – Prague, 1998. – P. 323–327.
133. Louka P. Modified street canyon flow / P. Louka, S. E. Belcher, R. G. Harrison // J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1998. – Vol. 74–76. – P. 485–483.

134. Mahfound Kadja Computation of Wind Flow and Air Pollution for Regions Having a Complex Topography / Mahfound Kadja, Anagnostopoulos et al. // Proc. of 3rd European & African Conf. on Wind Engineering. Eindhoven University of Technology, Netherlands, July 2–6, 2001. – P. 355–358.
135. Maria de Lurdes Dinis. Simulation of liberation and dispersion of radon from a waste disposal / Maria de Lurdes Dinis, Antonia Fluza // Advances in Air Pollution Modeling for Environment Security. NATO Science Series / Springer. – 2004. – Vol. 54. – P. 133–142.
136. Measuring and modeling wet deposition fluxes in the Netherlands and Europe / Eric van der Swaluw et al. // Conf. Abstracts of 31st NATO / SPS Intern. Technical Meeting on Air Pollution Modelling and it's Application, 27 September – 01 October, 2010, Torino, Italy. – Torino, 2010. – № 2.8.
137. Meroney R. N. Perspectives on air pollution aerodynamics / R. N. Meroney // Wind Engineering into the 21st Century. – A. A. Balkema/Rotterdam, 1999. – P. 79–90.
138. Model Evaluation Report on UDM Version 6.0. / Cambridge Research Consultants Ltd., Cambridge CB2 1SJ UK, Ref. No. SMEGIS/00/9/E, 2002. – P. 51.
139. Modeling of Air Pollution Dispersion in Street Canyons in Cross-Wind / Ibrahim A. M. Gad, Mofreh. M. Nasief, Salem S. Abdel Aaziz, Alaa A. Osman // 13th Intern. Conf. on Aerospace Sciences & Aviation Technology, ASAT-13, Cairo, May 26-28, 2009 // ASAT-13–MO-15. – P. 1–13.
140. Montavon C. Validation of non-hydrostatic numerical model to simulate stratified wind fields over complex topography / C. Montavon // 2 EACWE. – Genova (Italy), 1997. – P. 357–362.
141. Murakami S. Comparison of “ $k-\varepsilon$ ” model, ASM and LES with wind tunnel test for flow field around cubic model / S. Murakami, A. Mochida, H. Yoshihiko // 8th Intern. Conf. on Wind Engineering, Western Ontario, July 8–11, 1991. – № 12–3.

142. Murakami S. Overview of turbulence models applied in CWE – 1997 / S. Murakami // *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 1998. – № 74–76. – P. 1–24.
143. Nozawa K. Large eddy simulation of the flow around a low-rise building immersed in a rough – wall turbulent boundary layer / Kojiro Nozawa, Tetsuro Tamura // *Proc. of 3rd European & African Conf. on Wind Engineering*. Eindhoven University of Technology. The Netherlands, July 2–6, 2001. – P. 185–192.
144. Numerical Modeling Study of Wind Flow for the Salt Lake City Region Using the Integrated WRF-Noah-UCM Model at Meso-Gamma Scale / Mukul Tewari, Fei Chen, Thomas T. Warner et al. // *WRF/MM5 Users' Workshop*. June, 2005. – № 4.3.
145. Partha P. Sarcar. Flow visualization and measurement on roof of the Texas Tech building / Partha P. Sarcar, Zhongshan Zhao, Kishor C. Mehta // *Proc. of the 3-rd Intern. Colloquium in bluff body Aerodynamics and Applications*, Blacksburg, USA, 28 July–1 August. – Blacksburg, 1996. – P. 597–606.
146. Puttok J. S. Maplin sands experiments 1980: dispersion results from continuous releases of refrigerated liquid propane / J. S. Puttok, G. W. Colenbrander, D. R. Blackmore // *Heavy Gas and Risk Assessment*. – 1983. – № 11. – P. 147–161.
147. Saathoff P. Dispersion of pollutants around buildings – Are current models adequate / P. Saathoff, T. Stathopoulo, W. Xuan // *Wind Engineering into the 21st Century*. – A. A. Balkema/Rotterdam, 1999. – P. 787–790.
148. Seedorf J. Outdoor measurements of airborne emission of staphylococci from a broiler barn and its predictability by dispersion models / J. Seedorf, J. Schulz & J. Hartung // *Environmental Exposure and Health. WIT Transactions on Ecology and the Environment*. – 2005. – Vol. 85. – P. 33–42.
149. Thomas B. C. Comparison of Numerical Modelling Techniques for Complex, Two - Dimensional Transient Heat-Conduction Problems / B. C. Thomas,

- I. V. Samarasekera, J. K. Brimacombe // Metallurgical Transactions. Proc. Metallurgic. – 1984. – Vol. 15, No. 2. – P. 12.
150. Tirabashi T. Analytical Air Pollution Advection and Diffusion Models / T. Tirabashi // College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution Modeling, 16 May–3 June 1994. – № SMR / 760–9.
151. Tirabashi T. Applied dispersion modeling for ground-level concentrations from elevated sources / T. Tirabashi, V. Rizza // Atmospheric Environment. – 1994. – Vol. 28, № 4. – P. 611–615.
152. Tracking and predicting the atmospheric dispersion of hazardous material releases. Implications for Homeland Security / National research council. Committee on the Atmospheric Dispersion of Hazardous Material Releases Board on Atmospheric Sciences and Climate Division on Earth and Life Studies. – Washington, 2003. – 101 p.
153. Vivien Bianca Bright. Street canyon atmospheric composition: Coupling dynamics and Chemistry / Vivien Bianca Bright, William Bioss, Xiaoming Cai // Conf. Abstracts of 31st NATO / SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and it's Application, 27 September–01 October, 2010, Torino, Italy. – Torino, 2010. – № P.1.1.
154. Werner K. Graber. Real time modelling as an emergency decision support system for accidental release of air pollutants / Werner K. Graber, Fritz Gassmann // Mathematics and Computers in Simulation (MATCOM). – 2000. – Vol. 52, iss. 5. – P. 413–426.
155. Wind – tunnel test of gaseous diffusion in street canyon with thermal stratification / R. Ooka, S. Murakami, S. Iizuka, K. Vehara // Wind Engeneering into the 21st Century. – A. A. Balkema/Rotterdam, 1999. – Vol. 2. – P. 781–786.

ДОДАТКИ

Додаток А

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Начальник Головного управління
 ДСНС України у Дніпропетровській області
 _____ А.А. Кульбач

_____ 12 _____ 2016 р.



АКТ
про впровадження результатів дисертаційної роботи

В дисертаційній роботі здобувача Берлова Олександра Вікторовича (Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна) розроблено нові чисельні моделі та програми розрахунку, які дозволяють шляхом обчислювального експерименту визначати розміри, інтенсивність та форму зони забруднення в атмосфері при аварійному викиді хімічно небезпечних речовин. Розроблені моделі базуються на чисельному інтегруванні рівнянь гідродинаміки та рівняння переносу домішки в атмосфері. Чисельне інтегрування рівнянь моделей здійснюється за допомогою неявних різницевих схем.

Використання розроблених математичних моделей та створених на їх базі програм дозволяє науково обґрунтовано визначити динаміку забруднення атмосфери при екстремальних ситуаціях різного типу, наприклад: емісія небезпечних речовин при їх горінні в сховищах, або при їх горінні в залізничних вагонах, емісія токсичних речовин в атмосферу при аварійних розливах. Моделі дозволяють оцінювати ефективність використання методу нейтралізації для локалізації зон хімічного забруднення при екстремальних ситуаціях техногенного характеру.

Розроблені автором чисельні моделі та пакети програм використовуються в Головному управлінні ДСНС у Дніпропетровській області для оцінки наслідків екстремальних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах регіону та прогнозуванні зон хімічного забруднення.

Представники університету
 Проректор з наукової роботи
 _____ С.В. Мямлін
 Зав. кафедрою «Гідравліка та
 водопостачання»
 _____ М.М. Біляєв
 Здобувач каф. «Гідравліка та
 водопостачання»
 _____ О.В. Берлов



Заступник начальника Головного
 управління з реагування на НС
 полковник служби цивільного захисту
 _____ О.В. Шевченко

Додаток Б

Міністерство освіти і науки України
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи
д.т.н., проф. С.В. Мямлін



2016 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи здобувача Берлова Олександра Вікторовича

Чинним актом підтверджується те, що результати дисертаційної роботи здобувача Берлова О.В. використовуються в навчальному процесі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна при підготовці студентів, які навчаються за спеціальністю «Водопостачання та водовідведення». Матеріали дисертаційної роботи, пакет програм використовуються при проведенні практичних занять та при виконанні курсової роботи з дисципліни «Екологічна безпека».

Заст. начальника Навчального відділу

Л.Є. Андрашко

Зав. каф. «Гідравліка та
водопостачання», д.т.н., проф.

М.М. Біляєв

Додаток В

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи
ДВНЗ «Придніпровська
державна академія
будівництва та архітектури»
д.т.н., проф. Савицький М. В.



01 / 02 2017 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Берлова Олександра Вікторовича
«Підвищення безпеки на об'єктах Павлоградського хімічного заводу при
виникненні екстремальних ситуацій»

Ми, що підписалися нижче, начальник навчального відділу д.т.н., доц. Тріфонов І. В., декан факультету цивільної інженерії та екології к.т.н., доц. Петренко В. О., завідувач кафедри опалення, вентиляції і якості повітряного середовища д.т.н., проф. Поліщук С. З. склали цей акт про те, що результати досліджень Берлова О. В. були використані в навчальному процесі при викладанні курсів «Охорона повітряного басейну», «Моніторинг довкілля та інші методи охорони біосфери» на випускаючій кафедрі факультету цивільної інженерії та екології.

Начальник навчального відділу,
д.т.н., доц.

Тріфонов І.В.

Декан факультету
цивільної інженерії та екології
к.т.н., доц.

Петренко В.О.

Завідувач кафедри опалення,
вентиляції і якості
повітряного середовища
д.т.н., проф.

Поліщук С.З.

Додаток Д

Приклад програм (кодів)

(призначення пакету програм (кодів) і його функціональні особливості
приведено в розділі 3)

Пакет програм «WALL-3».

B2 – чисельний розрахунок розсіювання небезпечної речовини в
повітрі на першому і четвертому кроці розщеплення;

```

SUBROUTINE B2 (F,DT,I,IV,MASF,r0,zmas)
  DIMENSION F(N11,N21,N31), MASF(N11,N21,N31)
  COMMON /BI/ N11,N21,N31,HX,HY,HZ
  COMMON /VV/ N1,N2,N3
  COMMON /NFILE/ NW
  cmol=zmas
  RS=8314.2/ZMAS
  Do 1 i=2, n11-1
  Do 1 J = 2, n21-1
  DO 1 K=2,N31-1
  IND=MASF(I,J,K)
  I=MASF(i,j,K-1)
  IV=MASF(i,j,K+1)
  pcl=f(i,j,k+1)/cmol
  vcl=pcl*hx*hy*hz/101000.0
  rcm=vcl*rs/hx/hy/hz
  plot=101000.0/rcm/te
  ss=plot-1.2
  continue
  SS=ABS(SS)
  VB=SQRT(2.0*9.81*HZ*SS/1.2)

```

```

pcl=f(i,j,k)*ru*te/cmol
vcl=pcl*hx*hy*hz/101000.0
rcm=vcl*rs/hx/hy/hz
plot=101000.0/rcm
ss=plot-1.2
SS=ABS(SS)
VN=SQRT(2.0*9.81*HZ*SS/1.2)
F(I,J,K)=F(I,J,K)+DT*F(I+1,J,K+1)/HZ/HX/HY-
*DT*VN*FN(I-1,J,K)/HX/HY/HZ
RETURN
END

```

В3 – чисельний розрахунок розсіювання небезпечної речовини в повітрі на другому і третьому кроці розщеплення;

SUBROUTINE B3 (MAP,N11,N21,ИП,ИИ, F,U,V,W, DT, MASF, F1,D, AMD, DX,DY,dz)

```

N12=N11-1
N22=N21-1
Do 1 i=2, n12
Do 1 J = 2, n22
IND=MAP (I,J)
ИИ=ИИ
MAP (ИИ,ИИ)=6
MAP(ИИ+1,ИИ)=8
GO TO 80
MAP (ИИ,ИИ-1)=6
MAP(ИИ-1,ИИ)=8
MAP (ИИ,ИИ+1)=6
MAP(ИИ,ИИ+1)=8
MAP (ИИ,ИИ+1)=6

```

```

MAP(IIP,JJP-1)=8
UM=(U(i,J,K)-ABS(U(I,J,K)))/2.0
UC=(U(i+,j,K)-ABS(U(i-1,j,K)))/2.0
VM=(V(i-1,j,K)-ABS(V(i,j+1,K)))/2.0
VC=(V(i,j,K)-ABS(V(i,j,K)))/2.0
WII=(W(i,j,K+1)-ABS(W(i,j,K+1)))/2.0
WIII=(W(i,j,K)-ABS(W(i,j,K)))/2.0
RETURN
END

```

B4 – реалізація граничних умов (для рівняння масопереносу);

```

SUBROUTINE B4 (F,H,ZMAS,MASF,VKON)

```

```

    DIMENSION MASF(N11,N21,N31),H(N11,N21,N31),

```

```

    * F(N11,N21,N31)

```

```

    COMMON /BI/ N11,N21,N31,HX,HY,HZ

```

```

    COMMON /VV/ N1,N2,N3

```

```

    W=HX*HY*HZ

```

```

    DO 1 I=2,N11-1

```

```

    DO 1 J=2,N21-1

```

```

    DO 1 K=2,N31-1

```

```

    IND=MASF(I,J,K)

```

```

    H(I,J,K)=F(I,J,K)*W

```

```

    H(I,J,K)=H(I,J,K)*22.4/ZMAS/1000.0

```

```

    H(I,J,K)=H(I,J,K)*100.0/W

```

```

    DO 100 I=2,N11-1

```

```

    DO 100 J=2,N21-1

```

```

    DO 100 K=2,N31-1

```

```

    H(I,J,K)=H(I,J,K)

```

```

    RETURN

```

```

    END

```


B5 – розрахунок висоти підняття стовпа забруднювача в силу теплового підйому продуктів горіння;

```

SUBROUTINE B5 (X,N11,N21,N31)
  DIMENSION X(N11,N21,N31)
  COMMON /NFILE/ NW
  XMA=0.0
  XMI=0.0
  DO 1 I=1,N11
  DO 1 J=1,N21
  DO 1 K=1,N31
  X1=X(I,J,K)
  WRITE (NW, 2) XMA,XMI
  FORMAT(2X,'MAX=',G15.6,'MIN=',G15.6)
  RETURN
  END

```

B6 – розрахунок концентрації в точці розташування рецептора;

```

SUBROUTINE B6 (FK,FS,COEF,N11,N21,N31,MASF)
  DIMENSION FK(N11,N21,N31),FS(N11,N21,N31),
  *MASF(N11,N21,N31)
  DO 1 I=2,N11-1
  DO 1 J=2,N21-1
  DO 1 K=2,N31-1
  IND=MASF(I,J,K)
  FK(I,J,K)=F(I,J,K)-FK(i,j,K)
  FS(I,J,K)=0.0
  go to 1
2  FS(I,J,K)=F(I+1,J,K)-F(I-1,J,K)
  FK(i,j,K)=0.0
1  CONTINUE

```

RETURN

END

B7 – розрахунок зміни концентрації небезпечної речовини в повітрі під дією джерела емісії;

```

SUBROUTINE B7 (H,U,V,W,MASF)
DIMENSION MASF(N11,N21,N31),H(N11,N21,N31),
*U(N1,N21,N31),V(N11,N2,N31),W(N11,N21,N3)
COMMON /BI/ N11,N21,N31,HX,HY,HZ
COMMON /VV/ N1,N2,N3
DO 1 K=1,N31
DO 1 J=1,N21
DO 1 I=1,N11-1
IND=MASF(I,J,K)
CONTINUE
U(I,J,K)=0.0
U(I+1,J,K)=0.0
CONTINUE
IP=MASF(I+1,J,K)
GO TO 111
U(I+1,J,K)=0.0
GO TO 1
111 U(I+1,J,K)=(H(I+1,J,K)-H(I,J,K))/HX
GO TO 1
1 CONTINUE
DO 20 J=1,N21
DO 20 K=1,N31
U(1,J,K)=U(2,J,K)
CONTINUE
DO 30 J=1,N21

```

```
DO 30 K=1,N31
U(N1,J,K)=U(N1-1,J,K)
CONTINUE
DO 50 J=1,N21-1
DO 50 I=1,N11
DO 50 K=1,N31
IND=MASF(I,J,K)
V(I+1,J,K)=0.0
V(I,J+1,K)=0.0
GO TO 50
IV=MASF(I,J,K+1)
V(I,J+1,K)=0.0
GO TO 50
V(I,J+1,K)=(H(I,J+1,K)-H(I,J,K))/HY
GO TO 50
50 CONTINUE
DO 770 I=1,N11
DO 770 K=1,N31
V(I+1,1,K)=V(I+1,2,K)
CONTINUE
DO 880 I=1,N11
DO 880 K=1,N31
V(I,N2,K)=V(I,N2-1,K)
880 CONTINUE
DO 450 J=1,N21
DO 450 I=1,N11
DO 450 K=1,N31-1
IND=MASF(I,J,K)
CONTINUE
W(I,J,K)=0.0
```

```
W(I,J,K+1)=0.0
GO TO 450
IV=MASF(I,J,K+1)
W(I,J,K+1)=0.0
GO TO 450
W(I,J,K+1)=(H(I,J,K+1)-H(I+1,J,K))/HZ
    GO TO 450
DO 1 I=1,N11
DO 1 J=1,N21
    DO 1 K=1,N31
        A=(U(I+1,J,K)-U(I,J,K))/HX
        B=(V(I,J+1,K)-V(I,J,K))/HY
        C=(W(I,J,K+1)-W(I,J,K))/HZ
        D(I+1,J,K)=A+B+C
1    CONTINUE
RETURN
450 CONTINUE
DO 44770 I=1,N11
DO 44770 J=1,N21
W(I,J,1)=W(I,J+1,2)
CONTINUE
DO 4880 I=1,N11
DO 4880 J=1,N21
W(I,J,N3)=W(I,J,N3-1)
4880 CONTINUE
RETURN
END
```