

Міністерство освіти і науки України

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет літакобудування

Кафедра хімії, екології та експертних технологій

**Пояснювальна записка
до дипломної роботи
магістра**

на тему «Спрощена модель розповсюдження
шкідливих викидів в атмосфері»

XAI.106.169.101._____.200

Виконав: студент 2 курсу, групи 169
Спеціальність: 101 «Екологія»
Освітня програма: «Екологія та охорона
навколишнього середовища»

Шевченко С.М.

Керівник: к.т.н., доцент І.М. Берешко

Рецензент: к.т.н., с.н.с. Квасов В.А.

Харків – 2020

Міністерство освіти і науки України
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет _____
(повне найменування)

Кафедра _____
(повне найменування)

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність _____
(код та найменування)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

_____ (підпис) _____ (ініціали та прізвище)
« ____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ

_____ (прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема дипломного проекту (роботи) _____

керівник дипломного проекту (роботи) _____

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету від « ____ » _____ року № _____

2. Термін подання студентом дипломного проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до роботи _____

4. Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розв'язати) _____

5. Перелік графічного матеріалу _____

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

Нормоконтроль _____ « ____ » _____ 20__ р.
(підпис) (ініціали та прізвище)

7. Дата видачі завдання « ____ » _____ р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка

Студент _____ (підпис) _____ (ініціали та прізвище)
Керівник проекту (роботи) _____ (підпис) _____ (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Спрощена модель розповсюдження шкідливих викидів в атмосфері: дипломна робота магістра за спеціальністю 101 Екологія. Стор. 80, рис. 23, табл.. 7, джерел 11.

У дипломному проекті розглядаються такі питання: постановка проблеми, огляд існуючих методів розрахунків, якісне моделювання розповсюдження викидів по стохастичній моделі, кількісне моделювання розповсюдження викидів по стохастичній моделі і перевірка адекватності моделі.

У розділі постановка проблеми були розглянуті задачі екології, ряд проблем, котрі виникають при проектуванні нового підприємства, путі вирішення таких проблем, а також використання ЕОМ при їх вирішенні. Були виявлені основні проблеми в обчислювальній газовій динаміки.

У розділі огляд існуючих методів розрахунків розглядаються основні методи моделювання екологічних процесів, такі як: якісні, статистичні та імітаційні. Зазначені основні процеси і фактори, визначаючі розповсюдження домішок в атмосфері. Проаналізовані моделі турбулентної дифузії, модель Гауссової течії. А також були приведені нормативні розрахунки на основі властивості течій.

У розділі якісне моделювання розповсюдження викидів по стохастичній моделі були розроблені двомірна та трьохмірна моделі розповсюдження шкідливих домішок. Розглядані функції, котрі вони реалізують, та їх базисні задачі.

У розділі кількісне моделювання розповсюдження викидів по стохастичній моделі були зроблені оцінні розрахунки викидів шкідливих речовин по моделі розповсюдження Гауса, установлені відповідності між розрахунками адвекції, дифузійного розповсюдження та гравітаційного осадження.

Ключові слова: викиди, дифузія, стохастична модель, математичне моделювання, розповсюдження

ABSTRACT

Simplified the model for the pollution spreading in the atmosphere: a master's diploma speciality 101 Ecology. Pp. 80, fig. 23, tab. 7, bibl. 11.

In the degree project questions are considered: statement of a problem, the review of existing methods of calculation, qualitative modeling of distribution of emissions on stochastic model, quantitative modeling of distribution of emissions on stochastic model and check of adequacy of model.

In section statement of a problem tasks of ecology, a line of problems which arise at designing the new enterprise, ways of the decision of such problems, and also use of the computer have been considered at their decision. The basic problems in computing gas dynamics have been revealed.

In section the review of existing methods of calculation the basic methods of modeling of ecological processes, such as are considered: qualitative, statistical and imitating. The basic processes and the factors defining distribution of impurity in an atmosphere are specified. Models of turbulent diffusion, model Gaussian of a jet are analysed. And also normative calculations on the basis of properties of currents have been resulted.

In section qualitative modelling of distribution of emissions on stochastic model bidimensional and three-dimensional models of distribution of harmful impurity have been developed. Functions which they realize, and their basic problems are considered.

In section quantitative modelling of distribution of emissions on stochastic model estimated calculations of emissions of harmful substances on model of dispersion Gauss have been made, conformity between calculations of advection, диффузионного dispersion and gravitational sedimentation are established.

Key words: emissions, diffusion, stochastic model, mathematical modeling, propagation

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ.....	11
2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ.....	13
3 ЯКІСНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ВИКИДІВ ЗА СТОХАСТИЧНОЮ МОДЕЛЛЮ.....	42
3.1 Двовимірна модель.....	42
3.1.1 Дифузійне розсіювання.....	43
3.1.2 Урахування вітру.....	45
3.1.3 Врахування обтікання об'єктів.....	46
3.2 Тривимірна модель.....	48
3.2.1 Дифузійне розсіювання.....	48
3.2.2 Врахування вітру.....	49
3.2.3 Врахування обтікання об'єктів.....	50
3.2.4 Врахування гравітаційної складової.....	51
3.3 Забезпечення масштабованості.....	52
3.4 Перевірка адекватності якісної моделі.....	52
4 КІЛЬКІСНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ВИКИДІВ ЗА СТОХАСТИЧНОЮ МОДЕЛЛЮ.....	58
4.1 Визначення коефіцієнта масштабування для обліку вітру.....	58
4.2 Визначення коефіцієнта масштабування для обліку гравітаційного осадження.....	60
4.3 Визначення коефіцієнта масштабування для дифузійного розсіювання.....	61
ВИСНОВКИ.....	63
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	65
ДОДАТКИ.....	67

ВСТУП

Екологія, як наука про навколишнє середовище, є одним з найбільш молодих наукових напрямків. Проте, формування і становлення екології як науки відбувалося на базі інших, старіших і більш розвинених напрямків досліджень, таких як біологія, географія, фізика, хімія і т.д. Виростаючи з інших наук, екологія природним чином увібрала в себе прийоми і методи наукових досліджень, прийняті в «батьківських» науках. Сказане повною мірою відноситься і до використання математичних методів в теоретичних дослідженнях.

Розвиток комп'ютерної техніки, з одного боку, і наявність добре розроблених чисельних методів, з іншого боку, багато в чому сприяє прогресу в використанні математичних методів в теоретичних дослідженнях. До теперішнього часу найбільші успіхи у використанні комп'ютерів для проведення досліджень досягнуті у фізиці так, що вже практично сформувався цілий напрямок - комп'ютерна фізика. В інших науках, таких як хімія, біологія і т.д., також спостерігається розширення сфер використання комп'ютерів, для теоретичних досліджень і при цьому широке застосування знаходять прийоми і методи комп'ютерної фізики. Не є винятком і екологічні дослідження, в яких спостерігається явно виражена тенденція до розширення використання комп'ютерної техніки в усіх напрямках досліджень.

Шляхи використання комп'ютерів в екології можуть бути самими різними. Це — обробка результатів спостережень і експериментів, побудова баз даних екологічної інформації, комп'ютерна картографія і так далі. Процес впровадження комп'ютерної техніки в екологію, в даний час, знаходиться в стані розвитку тому навряд чи представляється можливим перерахувати всі відомі напрямки використання комп'ютерів в екології.

Комп'ютерне моделювання є одним з методів теоретичних досліджень. В основі комп'ютерного моделювання лежить чисельний експеримент, що проводиться за допомогою комп'ютера.

Процес проведення комп'ютерного моделювання можна розбити на кілька етапів:

- вибір об'єкта дослідження і формулювання проблеми, яка підлягає аналізу;
- побудова теоретичної моделі, що складається в формулюванні припущень про закони, що діють в аналізованій системі. У переважній більшості випадків формулювання законів доводиться до рівня математичних співвідношень;
- розробка (або вибір вже відомого) алгоритму розв'язання задачі;
- реалізація алгоритму за допомогою будь-якої мови програмування, тобто написання комп'ютерної програми;
- тестування програми, що складається в проведенні розрахунків для тих випадків, коли достовірний відповідь відома заздалегідь;
- проведення розрахунків для ситуацій, що підлягають аналізу.

Найбільш часто необхідність в проведенні комп'ютерного моделювання виникає в двох ситуаціях: при вирішенні дослідницьких завдань і при розробці прогнозів на базі відомих теоретичних положень.

При вирішенні дослідницьких завдань основна увага приділяється розробці або уточнення існуючих теоретичних положень. У цій ситуації комп'ютерне моделювання можна розглядати як успішне тоді, коли результат проведення розрахунків збігається з експериментальними результатами. До тих пір, поки не буде досягнутий зазначений результат, потрібно проводити уточнення теоретичних положень і алгоритмів їх реалізації.

Істотно більше практичне значення має місце в другій ситуації, коли результатом комп'ютерного моделювання є прогноз тій чи іншій мірі достовірності.

У кожній із зазначених ситуацій виникає необхідність у використанні специфічних методів комп'ютерного моделювання. В цій роботі увагу, в основному, буде зосереджено на методах комп'ютерного моделювання в екології.

Кожен випадок в розвитку навколишнього середовища має неповторні особливості, проте більшість екологічних систем схильне природним різним зовнішніх впливів, а всі організми стикаються з деякими загальними проблемами. Екологічна наука накопичила багату літературу описового та функціонального характеру що, як мінімум, робить зайвими деякі дослідження і можливими певні передбачення.

Грунтуючись на існуючих знаннях іноді можна заощадити величезну кількість сил, засобів і часу на дослідження даного конкретного завдання, а спробувати змоделювати її і вивчити можливу поведінку за допомогою математичного апарату. Однак до недавнього часу такі дослідження були надзвичайно утруднені через величезну числа змінних і складного виду залежностей між ними. І тільки з широким розповсюдженням комп'ютерів, що володіють достатньою обчислювальною потужністю моделювання природних процесів як цілий напрям екологічної науки стало активно розвиватися.

Обчислювальний експеримент грає все більш важливу роль при вирішенні проблем екології атмосфери через відносно низьку собівартість порівняно з фізичним експериментом, можливості промоделювати найнеймовірніші сценарії розвитку аварійних ситуацій і використовувати ЕОМ для прогнозування екологічних процесів в часі і просторі. Обчислювальний експеримент включає в себе серію розрахунків з використанням програмних засобів, що реалізують математичну модель

розглянутого фізичного явища. Тому побудова математичної моделі, адекватної реальному фізичному процесу, що протікає в атмосфері, відіграє вирішальну роль.

Математичне моделювання екологічних процесів включає в себе кілька основних етапів:

- формулювання мети, предмета і об'єкта дослідження;
- побудова фізичної моделі екологічного процесу;
- розробка математичної моделі явища і формулювання постановки задачі;
- вибір методу розрахунку поставленого завдання;
- розробка алгоритму розрахунку;
- реалізація математичної моделі у вигляді комп'ютерних засобів;
- верифікація математичної моделі на основі наявних експериментальних даних або результатів, отриманих з використанням інших математичних моделей;
- проведення серії розрахунків — обчислювальний експеримент.

У даній роботі розглядаються питання математичного моделювання процесів миттєвого розсіювання газоподібної домішки в атмосфері.

1 ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Однією з найважливіших завдань екології є прогноз наслідків аварій на промислових підприємствах, зокрема передбачення поширення забруднення в атмосфері після аварійного викиду забруднюючої речовини. Навіть якщо аварійних викидів не відбувається, практично будь-яке промислове підприємство є джерелом шкідливих для здоров'я людини речовин, які, незважаючи на малі концентрації, можуть накопичуватися в організмі і впливати на здоров'я населення. Природно при проектуванні нового підприємства необхідно враховувати не тільки потреби виробництва, а й його можливий вплив на навколишнє середовище.

Для вирішення цих проблем пропонується використовувати якісні моделі, прообразом яких є клітинні автомати. Такі моделі не мають аналітичного запису і є чисто алгоритмічними.

В атмосфері постійно відбувається рух. На глобальні переміщення повітряних мас накладається циркуляція місцевих масштабів, нагріте повітря піднімається від поверхні землі, нерівності рельєфу викликають завихрення повітря поряд з ними і т.д. Все це призводить до того, що будь-яка домішка, що потрапила в атмосферу, розсіюється.

Реальне вирішення такого завдання набагато складніше наведеного нижче. Для нього зазвичай використовується повна система рівнянь гідротермодинаміки, рішення якої в тривимірному випадку вимагає значних обчислювальних ресурсів і навряд чи може бути реалізовано на персональному комп'ютері навіть для невеликих областей.

Розвиток обчислювальної математики і створення високопродуктивних ЕОМ сприяли широкому їх застосуванню в науці і техніці, і зокрема для аналізу і оптимізації різних газодинамічних процесів. В даний час в газовій динаміці сформувався новий науковий напрям — обчислювальна газова динаміка, метою якої є моделювання реальних

газодинамічних процесів і отримання нових знань в цій області. Швидкий розвиток обчислювальної газової динаміки обумовлено рядом причин, головними з яких можна назвати неможливість отримання характеристик течії в газодинамічних процесах на моделях для деяких режимів роботи, великі енергетичні витрати на проведення експериментів, велика вартість їх створення. Разом з тим ефективність чисельних алгоритмів постійно зростає, що поряд з удосконаленням ЕОМ призводить до зменшення вартості моделювання і розширення класів досліджуваних задач.

Сформувавшись як новий науковий напрям, обчислювальна газова динаміка висунула ряд проблем. З цього ряду проблем можна виділити основні [3]:

- необхідність розробки все більш повних фізико-математичних моделей, справедливих для опису реальних течій в широкому діапазоні режимних параметрів;
- побудова ефективних чисельних алгоритмів з урахуванням нових структур і архітектур ЕОМ;
- створення нових високопродуктивних ЕОМ;
- розробка математичного забезпечення і на його основі об'єктно-орієнтованих інформаційних систем.

2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ

Як зазначалося у вступі, широке поширення в екології отримали методи комп'ютерного моделювання, розроблені і використовувані в інших науках. Крім того, розвиток екології призвело до формування і розвитку деяких нових методів комп'ютерного моделювання. Перш, ніж приступати до детального аналізу окремих методів, дамо коротку характеристику методів, використовуваних для моделювання екологічних процесів.

Існують наступні методи моделювання:

1. Якісні методи.
2. Кількісні методи (статистичні).
3. Імітаційні.

Якісне моделювання найменш вимоглива до наявності інформації. Для його використання необхідно лише ввести необхідні змінні і вирішити, чи є відношення між ними позитивним (збільшення A спричиняє збільшення B), негативним (збільшення A спричиняє зменшення B) або нейтральним (збільшення A безпосередньо не впливає на B). Можна удосконалити цей метод ввівши дані про амплітуді ефектів взаємодії (подвоєння величини A спричиняє зменшення вдвічі величини B і т.д.) Метод допускає також існування факторів різної важливості і можливість того, що, перебуваючи, наприклад, поблизу максимуму, фактори будуть діяти сильніше, ніж поблизу мінімуму. Метод можна пристосувати до обліку величезного числа кількісних деталей, однак тоді він стає швидше імітаційним, ніж якісним.

Важлива перевага цього методу полягає в тому, що він дозволяє простежити зв'язок між динамікою системи, з одного боку, і характером взаємодії між змінними - з іншого, коли інформація є недостатньою для побудови імітаційної моделі.

Модель цього типу може дати лише грубе якісне опис тенденцій в динаміці змінних і непридатна для повсякденно зустрічаються випадків, чутливих до точному кількісному балансу між змінними.

Статистичні моделі будуються на припущенні, про те, що моделюється випадковий за своєю природою. Для дослідження використовуються статистичні методи, зокрема, так званими методами Монте-Карло. В основі методів Монте-Карло лежить використання випадкових чисел. Є точка зору, згідно з якою закономірності функціонування складних систем (а саме такими є об'єкти біосфери і геосистеми взагалі) «істотно імовірнісних». Таким чином, можна очікувати, що методи Монте-Карло виявляться високоефективними методами комп'ютерного моделювання в екології.

Крім того, статистичні моделі успішно застосовуються при неповній інформації про модельованих об'єктах. Дослідження такими методами, як правило, дає лише імовірнісні оцінки поведінки екосистеми, що не завжди прийнятно. Статистичні моделі, хоч і не є основним методом моделювання, проте можуть з успіхом застосовуватися в якості складових частин більш складних моделей, вносячи в них елемент випадковості.

Імітаційні моделі використовуються в тих випадках, коли можна скористатися великою кількістю теоретичних і експериментальних робіт в досліджуваній області та дати тверде обґрунтування функціональному поданням співвідношень між змінними, що використовуються при моделюванні. У більшості випадків, співвідношення між цими змінними є результатом вивчення статистичних залежностей між ними.

Суть імітаційного моделювання полягає в спробі формалізації за допомогою комп'ютера будь-яких емпіричних знань про даному об'єкті. Імітаційна модель являє собою повне формалізоване опис досліджуваного

явища «на грані нашого розуміння». Слова «на грані нашого розуміння» тут означають розуміння причинно-наслідкових зв'язків між подіями.

Для створення оптимальної моделі повинен бути точно схема причинно-наслідкових зв'язків. Однак прагнення до реалізму в моделі не повинно призводити до зайвої деталізації. Вихід полягає в тому, щоб обмежитися мінімумом чинників, що враховуються, при якому модель залишається точним і працездатним поданням ключових ефектів. У цих умовах математичний апарат грає підлеглу роль. Набагато більшої уваги потребує змістовна частина моделювання.

При моделюванні складних систем їх розбивають на підсистеми і тому модель, постає як якийсь комплекс підмоделей. Останні часто зручніше будувати, використовуючи в кожній з них різний математичний апарат. Характер деяких процесів нам відомий з джерел, про інших нам невідомо практично нічого; деякі взаємозв'язки можна адекватно описати за допомогою простих функцій, аналіз інших вимагає більш складного математичного апарату. Саме ця обставина призводить до використання імітаційного моделювання як методу аналізу. Завдяки імітаційним моделям ми маємо можливість гнучкого маніпулювання з широким розмаїттям функцій і відносин, і, таким чином, повного використання наявних знань.

Розглянемо основні процеси та фактори, що визначають поширення домішок в атмосфері.

Поширення забруднюючих речовин, що надходять в атмосферне повітря від промислових викидів, обумовлено наступними основними процесами:

- 1) інерційним рухом газів;
- 2) конвекцією (вертикальний перенесення речовин, обумовлений різницею температур повітряних мас);

- 3) турбулентної дифузії речовин;
- 4) адвекцією (горизонтальний перенос речовин вітром);
- 5) гравітаційним осіданням аерозольних і пилових частинок.

Інерційний рух газів при викиді їх в атмосферне повітря з труб і конвекція газів, пов'язана з різницею температур газу і атмосферного повітря, обумовлюють підйом газів і зважених часток на деяку висоту, що перевищує висоту труби. Ці процеси визначаються такими факторами, як швидкість виходу газів з труби, швидкість вітру на рівні горловини труби, стійкість атмосфери, швидкість емісії тепла з труби. Швидкість виходу газів з труби, в свою чергу, визначається витратою викидаються газів (обсяг газу, що викидається через вихідний отвір за одиницю часу) і діаметром вихідного отвору. Емісія тепла з труби залежить від різниці температур газу і атмосферного повітря і від масової витрати газу. Збільшення швидкості вітру приводить до зменшення висоти підйому газового струменя, а збільшення різниці температур до збільшення цієї висоти.

Процеси турбулентної дифузії визначаються двома основними факторами: середньою швидкістю вітру і атмосферної турбулентністю. Атмосферна турбулентність, в свою чергу, є результатом двох процесів: конвективної турбулентності, зумовленої нагріванням атмосфери, що призводить до виникнення вертикального температурного градієнта, і механічної турбулентності, обумовленої зміною швидкості вітру з висотою (вітрової зрушення). При різних атмосферних умовах може переважати та чи інша форма турбулентності. Конвективна турбулентність зазвичай переважає в сонячні дні, коли швидкість вітру невелика. Механічна турбулентність переважає в вітряні ночі; істотний вплив на механічну турбулентність надає шорсткість підстильної поверхні і розміщення будівель.

Процеси адвекції залежать від таких факторів, як швидкість вітру, розміщення труби щодо перешкод руху повітря, характеру рельєфу місцевості в напрямку вітру, стійкість атмосфери і деяких інших чинників. Зі збільшенням швидкості вітру внаслідок адвекції збільшується відстань від джерела забруднення, на якому спостерігається максимальна приземна концентрація забруднюючих речовин.

Викиди з труб можуть бути чисто газові або містити суміш газів і зважених часток. При наявності у викидах зважених часток необхідно враховувати процеси їх осідання під дією сили тяжіння. Швидкість осідання частинок залежить від щільності речовини частинок і їх розмірів. Якщо частинки мають малі розміри, швидкість їх осідання настільки низька, що вони рухаються практично так само, як і газ. Великі частинки мають значну швидкість осідання, що призводить до підвищених концентрацій таких частинок поблизу поверхні землі в порівнянні з концентраціями одночасно викидаються газів.

Як видно з вище викладеного, одним з найбільш істотних факторів, що впливають практично на всі процеси, що обумовлюють поширення забруднюючих речовин в атмосферному повітрі, є стійкість атмосфери. Під стійкістю атмосфери розуміється її здатність перешкоджати вертикальним рухам газів і зважених часток. Ця характеристика атмосфери визначається вертикальним температурним градієнтом атмосферного повітря.

Тиск атмосферного повітря падає зі збільшенням висоти z . Тому, коли невеликий об'єм повітря піднімається в атмосфері, він виявляється в шарах з більш низьким тиском і розширюється. Це розширення відбувається досить швидко, так що можна знехтувати процесом теплопередачі між розглянутим обсягом повітря і навколишнього атмосферою, тобто процес розширення можна вважати адіабатичним. Як

впливає з законів термодинаміки, при адіабатичному розширенні газу його температура T зменшується. Це призводить до зменшення температури атмосферного повітря з висотою. Якби вертикальний температурний градієнт атмосфери визначався тільки розглянутим вище процесом, його величина для сухого повітря була б постійною і дорівнювала $-0,0098$ град / м. Ця величина називається сухоадіабатическим вертикальним градієнтом атмосфери і зазвичай позначається через Γ .

Стійкість атмосфери визначається, в основному, співвідношенням між реальним вертикальним градієнтом температури і сухоадіабатическим вертикальним градієнтом. Якщо реальний вертикальний температурний градієнт негативний, а за абсолютною величиною більше сухоадіабатического (рис.2.1), така атмосфера називається сверхадіабатической. Нехай невеликий об'єм повітря на висоті, що відповідає точці А на діаграмі, в результаті турбулентного обурення швидко перемістився вгору. В цьому випадку відбудеться його адіабатичне розширення, і нового стану на діаграмі буде відповідати точка Б на прямій сухоадіабатического градієнта. Температура повітря в точці Б вище, ніж навколишнього повітря на цій же висоті (точка В). Отже, розглянутий обсяг повітря буде мати щільність, меншу, ніж навколишнє повітря, і буде продовжувати підніматися. Якщо ж внаслідок турбулентного обурення відбудеться рух повітря вниз з адіабатичним стиском (точка Д на діаграмі), температура неохайного обсягу повітря буде нижче температури навколишнього повітря (точка Е), що призведе до подальшого його руху вниз. Таким чином, в сверхадіабатической атмосфері будь обурення, що приводить до вертикального руху повітря, буде посилюватися, тобто рівноважний стан є нестійким. Атмосфера в цьому випадку називається нестійкою.

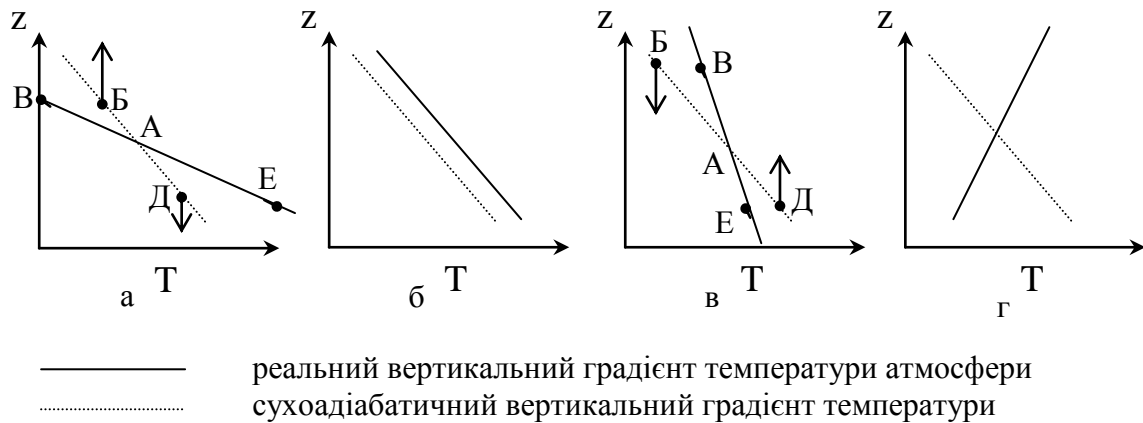


Рисунок 2.1 — Різні типи стійкості атмосфери

Коли реальний вертикальний градієнт температури приблизно дорівнює сухоадиабатическому (рис.2.1б), будь-який обсяг повітря, випадково перемістився в вертикальному напрямку, буде мати таку ж температуру, як і навколишнє повітря і буде залишатися на новій висоті, тобто рівновагу атмосфери є байдужим. Атмосфера в цьому випадку називається байдужою.

Якщо ж реальний вертикальний градієнт температури, хоча і негативний, але по абсолютній величині менше сухоадиабатического або позитивний, рівновагу атмосфери є стійким, тому що при будь-якому вертикальному відхиленні деякого об'єму повітря він буде прагнути повернутися на колишню висоту. У першому випадку (рис.2.1в) атмосфера є слабо стійкою, а в другому випадку (рис.2.1г) - сильно стійкою.

Атмосферні умови, коли реальний вертикальний градієнт температури позитивний і досить високий, називаються інверсією. Наявність інверсії перешкоджає вертикальному переміщенню забруднюючих речовин і приводить до збільшення їх концентрації в приземному шарі. Серед різних видів інверсій найбільш часто зустрічаються радіаційна інверсія і інверсія осідання.

Радіаційна інверсія обумовлена втратою тепла земною поверхнею в нічний час. Якщо слідом за теплим днем слід ясна ніч, земна поверхня

інтенсивно випромінює тепло і може швидко охолонути. Внаслідок цього прилегли до земної поверхні шари повітря охолоджуються, і їх температура стає нижче температури повітряних шарів, розташованих вище. Радіаційна інверсія зазвичай спостерігається в ранні ранкові години при ясному небі і слабких вітрах.

Інверсія осідання утворюється при опусканні повітря в повітряну масу з більш високим тиском. У процесі такого опускання відбувається адіабатичне стиснення повітря і, отже, його нагрівання до температури, що перевищує температуру повітряних шарів, розташованих нижче. Інверсійний шар в цьому випадку зазвичай розташовується на деякій висоті над земною поверхнею. Тому інверсія осідання, як правило, не впливає на короткоперіодної забруднення повітря. Однак, інверсія осідання може, на відміну від радіаційної інверсії, проіснувати кілька днів, що позначається на накопиченні забруднюючих речовин в приземному шарі.

Модель турбулентної дифузії

Для опису процесів поширення забруднюючих речовин в атмосферному повітрі використовуються різні моделі, більшість з яких є модифікаціями моделі турбулентної дифузії.

Нехай викид забруднюючих речовин в атмосферу здійснюється через трубу висоти h . Прийmemo за початок координат підставу труби. Тоді точкове джерело забруднення атмосфери має координати $(0; 0; h)$. У цьому випадку рівняння турбулентної дифузії речовин в атмосферному повітрі в разі, коли через трубу викидається газ, який не містить зважених часток, набуває вигляду:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{u} \frac{\partial C}{\partial \vec{r}} = D_r \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + D_B \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + m \cdot \delta(x) \cdot \delta(y) \cdot \delta(z - h), \quad (2.1)$$

де \vec{u} – швидкість вітру,

m – витрата забруднюючої речовини (маса речовини, що викидається з труби за одиницю часу).

Вважаючи процес стаціонарним $\left(\frac{\partial C}{\partial t} = 0\right)$ та вважаючи, що перенос забруднюючих речовин по вітру у значній мірі перевищує дифузію вздовж напрямку вітру $\left(u \frac{\partial C}{\partial x} \gg D_r \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\right)$, переходимо до стаціонарного рівняння турбулентної дифузії в атмосферному повітрі:

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = D_r \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_B \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + m \cdot \delta(x) \cdot \delta(y) \cdot \delta(z - h). \quad (2.2)$$

Відомо наближене аналітичне рішення рівняння (2.2), запропоноване Лаурі і Бобела:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi r \sqrt{D_r D_B}} \exp\left(-\frac{u}{4x} \left(\frac{y^2}{D_r} + \frac{(z-h)^2}{D_B}\right)\right), \quad (2.3)$$

де $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ – відстань від викиду до точки, в якій визначається концентрація.

Це рішення може бути використано для наближених оцінок концентрацій на значних відстанях від викиду. На невеликих відстанях від джерела забруднення результати розрахунків по формулі (2.3) можуть значно розходитися з спостерігаються концентраціями.

Зокрема, для концентрацій на рівні землі вздовж лінії, рапсоложенної під віссю шлейфу викиду (вісь x) формула (2.3) зводиться до вираження:

$$C(x, 0, 0) = \frac{Q}{4\pi x \sqrt{D_r D_B}}, \quad (2.4)$$

з якого випливає, що концентрація не залежить від швидкості вітру і обернено пропорційна x .

У той же час експериментальні спостереження показують, що концентрація обернено пропорційна твору $ux^{1.76}$. Для більш точних прогнозів концентрацій використовують рішення рівняння (2.2) чисельними методами або різні модифікації рівняння турбулентної дифузії.

Однією з найбільш поширених модифікацій моделі турбулентної дифузії є модель гаусова струменя. Зауважимо, що залежність концентрації від координат, описувана формулою (2.3) з точністю до коефіцієнта перед експоненціальним множником збігається з двовимірним розподілом Гауса, в якому горизонтальна і вертикальна дисперсії є функціями від координати x і визначаються виразами: $\sigma_y^2 = \frac{4xD_\Gamma}{u}$ и $\sigma_z^2 = \frac{4xD_B}{u}$. У моделі гаусова струменя залежність концентрації від координат в разі досить високих труб також описується залежністю, яка з точністю до коефіцієнта перед експоненціальним множником збігається з двовимірним розподілом Гауса (формула Сеттона):

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z-h)^2}{\sigma_z^2}\right)\right), \quad (2.5)$$

в якому просторові дисперсії зростають зі збільшенням відстані від джерела забруднення x , однак ці залежності є нелінійними.

Крім того, характер залежностей просторових дисперсій концентрацій від x визначається класом стійкості атмосфери. Із зростанням нестійкості атмосфери значення дисперсій збільшується і збільшується швидкість зростання дисперсій в міру віддалення від джерела забруднення. Значення величин просторових дисперсій при різних відстанях для різних класів стійкості атмосфери визначаються зі спеціальних діаграм, побудованих на основі експериментальних досліджень. Запропоновано

також аналітичні формули для оцінки величин σ_y , σ_z . Наприклад, згідно з Бріггсу, для відстаней від 100м до 10км в разі рівній відкритій місцевості

$$\sigma_y = \frac{\alpha_y x}{\sqrt{1 + 10^{-4} x}}, \quad \sigma_z = \frac{\alpha_z x}{s_z(x)}, \quad (2.6)$$

де коефіцієнти α_y , α_z и функція $s_z(x)$ залежать від класу стійкості атмосфери (табл.2.1).

Таблиця 2.1 — Значення коефіцієнтів α_y , α_z и функції $s_z(x)$

Клас стійкості атмосфери	α_y	α_z	$s_z(x)$
1	0,22	0,20	1
2	0,16	0,12	1
3	0,11	0,08	$\sqrt{1 + 2 \cdot 10^{-4} x}$
4	0,08	0,06	$\sqrt{1 + 1,5 \cdot 10^{-4} x}$
5	0,06	0,03	$1 + 3 \cdot 10^{-4} x$
6	0,04	0,02	$1 + 3 \cdot 10^{-4} x$

Класи стійкості атмосфери в табл.2.1 прийняті відповідно до класифікації Песквілла (табл.2.2):

Таблиця 2.2 — Класи стійкості атмосфери по Песквіллу

u, м/с	Ступінь інсоляції вдень			Хмарність вночі	
	сильна	помірна	слабка	хмарно	ясно
<2	1	1-2	2	5	6
2-3	1-2	2	3	5	6
3-5	2	2-3	3	4	5
5-6	3	3-4	4	4	4
>6	3	4	4	4	4

Клас 1 відповідає найбільшою нестійкості; клас 6 - найбільшої стійкості; клас 4 - байдужою атмосфері.

Якщо висота труби, через яку виробляється викид в атмосферу, невелика, при розрахунку просторового розподілу концентрацій необхідно враховувати ефект відображення поширюються в атмосфері газів від земної поверхні. Ефект віддзеркалення можна врахувати, застосовуючи метод віртуального джерела забруднення. Відповідно до даного методу концентрація в деякій точці визначається сумою двох концентрацій, одна з яких виходить при розгляді реального джерела в припущенні відсутності ефекту віддзеркалення, а інша - при розгляді віртуального джерела, розташованого на висоті $(-h)$. В результаті вираз для концентрації з урахуванням ефекту віддзеркалення набуває вигляду:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \left[\exp\left(-\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z-h)^2}{\sigma_z^2}\right)\right) + \exp\left(-\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z+h)^2}{\sigma_z^2}\right)\right) \right]. \quad (2.7)$$

Для концентрації на рівні землі при підстановки в (2.7) $z = 0$ отримуємо:

$$C(x, y, 0) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{h^2}{\sigma_z^2}\right)\right). \quad (2.8)$$

Типові профілі зміни приземної концентрації уздовж лінії, розташованої під віссю шлейфу викиду (за напрямком вітру) при 2-х різних швидкостях вітру, наведені на рис.2.2. Відзначимо, що приземному концентрація на початку зростає в міру віддалення від джерела забруднення, досягаючи максимуму на деякому віддаленні від джерела, і тільки потім починає зменшуватися з подальшим збільшенням x .

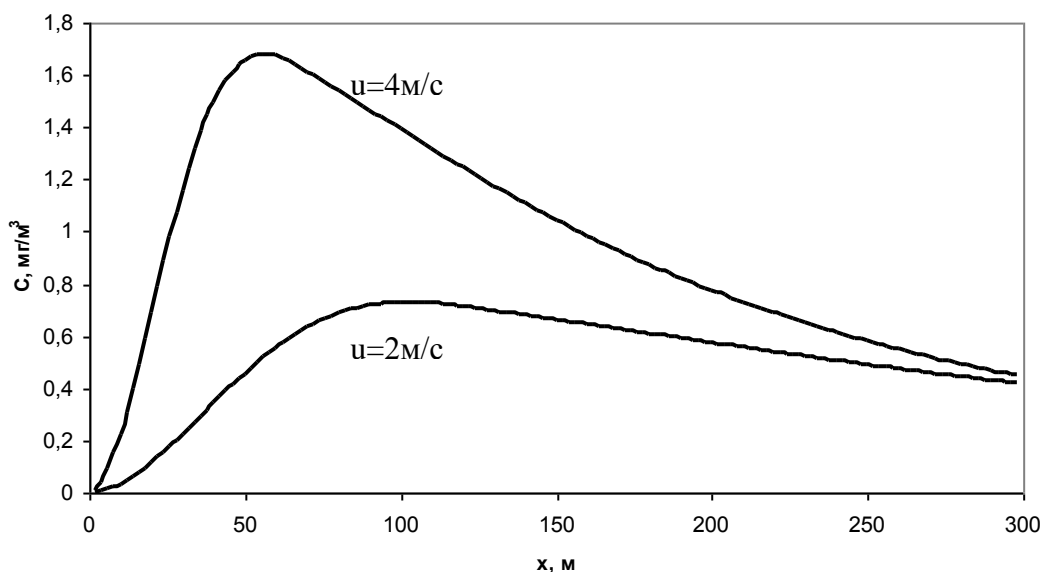


Рисунок 2.2 — Характерні профілі приземної концентрації уздовж осі шлейфу при різних швидкостях вітру (u)

Урахування явищ інерції і конвекції

У більшості моделей поширення забруднюючих речовин в атмосфері процеси інерційного руху газів при викиді з труби і конвекції, зумовленої різницею температур викидається газу і атмосферного повітря, враховуються методом віртуального джерела забруднення. Відповідно до даного методу реальне джерело забруднення замінюється деяким віртуальним джерелом, розташованим на деякій висоті (рис.2.3). Збільшення висоти віртуального джерела в порівнянні з реальним залежить від чинників, що визначають процеси інерційного і конвективного підйому газів, розглянутих в 2.1.

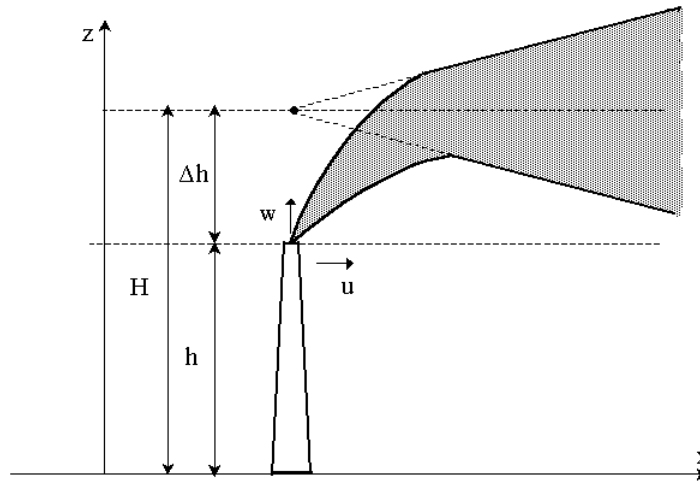


Рисунок 2.3 – Схема моделі віртуального джерела, піднесеного над трубою

Існують різні формули для розрахунку величини Δh . У більшості з цих формул висота підйому газового струменя розраховується як сума двох членів, один з яких описує підйом струменя, обумовлений інерцією, а інший - конвекцією. Перший доданок залежить від швидкості виходу газів з труби, а другий доданок - від швидкості емісії тепла. Наприклад, у формулі, запропонованої Карсоном і Мозесом, величина підйому струменя визначається першого з доданків визначається величиною $\frac{wd}{u}$, а другого

доданку — величиною $\frac{\sqrt{q_T}}{u}$,

де w — швидкість виходу газів з труби,

q_T — швидкість емісії тепла з труби;

а і b — коефіцієнти, значення яких залежать від типу стійкості атмосфери.

Швидкість емісії тепла залежить від різниці температур газу в викиді T_T і атмосферного повітря T_a і визначається виразом $q_T = m'c_p(T_T - T_a)$, де m' — масова швидкість потоку газу з труби,

c_p — питома теплоємність газу при постійному тиску.

Значення коефіцієнтів при доданків залежать від типу стійкості атмосфери:

стійкість атмосфери	Формула для визначення висоти підйому струменя
нестійка	$\Delta h = 3,47 \frac{wd}{u} + 5,15 \frac{\sqrt{q_T}}{u} \quad (1.9a)$
проміжна	$\Delta h = 0,35 \frac{wd}{u} + 2,64 \frac{\sqrt{q_T}}{u} \quad (1.9б)$
стійка	$\Delta h = -1,04 \frac{wd}{u} + 2,24 \frac{\sqrt{q_T}}{u} \quad (1.9в)$

Урахування гравітаційного осідання частинок

Хоча частка зважених часток в загальній масі викидів забруднюючих речовин в атмосферу не перевищує 10%, потенційний збиток від цього виду забруднюючих речовин є дуже суттєвим. Частинки завдають шкоди здоров'ю, вражаючи легені; осідаючи на листі рослин, ускладнюють процеси фотосинтезу; зменшують прозорість атмосфери і знижують потік сонячної радіації, що призводить до змін клімату; збільшують ймовірність опадів, туманів і хмар і т.д.

У загальному випадку розміри частинок лежать в межах від 0,001 до 500 мкм. Якщо розміри частинок перевищують 20 мкм, характер їх поширення в атмосферному повітрі значно відрізняється від поширення газів внаслідок істотної швидкості осідання частинок під дією сили тяжіння. На зважені в атмосферному повітрі частинки, крім сили тяжіння, діє також сила плавучості, аналогічна сили Архімеда, що діє на тіло, занурене в рідину, а в разі руху частки також і сила опору повітря. Сила плавучості визначається значеннями щільності частинок ρ_q щільності газу

$$\rho_\Gamma \text{ і маси частинок } m_q: F_\Pi = m_q \frac{\rho_\Gamma}{\rho_q}.$$

Щільність частинок більша за густину газу, тому сила плавучості менше сили тяжіння $F_T = m_q g$. Внаслідок цього частка починає рух вниз з прискоренням; в швидкості руху частинки з'являється вертикальна складова, спрямована вниз. При осіданні частки виникає сила опору повітря F_C , спрямована проти руху, що призводить до зменшення прискорення. Сила опору залежить від швидкості осідання v : $F_C = \frac{\beta \rho_r S v^2}{2}$,

де S – фронтальна площа поперечного перерізу частинки,

β – коефіцієнт опору.

Зі збільшенням швидкості осідання частинки сила опору зростає. При деякому значенні швидкості сила опору і сила плавучості врівноважують силу тяжіння, і далі частинка рухається вниз з постійною швидкістю, званої швидкістю витання.

Величина швидкості витання визначається з умови рівноваги частинки:

$$F_T = F_C + F_{II}. \quad (2.10)$$

Підставляючи в (2.10) вираження для сил тяжкості, плавучості і опору повітря, приходимо до рівняння:

$$m_q g = \frac{\beta \rho_r S v^2}{2} + m_q \frac{\rho_r}{\rho_q}, \quad (2.11)$$

з якого отримуємо вираз для швидкості витання:

$$v = \sqrt{\frac{2m_q g (\rho_q - \rho_r)}{\beta S \rho_q \rho_r}}. \quad (2.12)$$

Коефіцієнт опору повітря в значній мірі залежить від форми частинок. Сферичний значення коефіцієнта опору визначаються числом Рейнольдса $Re = \frac{\rho_r v d}{\mu}$,

де d – характерний лінійний розмір, наприклад, діаметр частинки,

μ – динамічна в'язкість газу.

Для області чисел Рейнольдса, що характеризує ламінарний режим руху повітряного потоку, залежність коефіцієнта опору від числа Рейнольдса є обернено пропорційною: $\beta = \frac{24}{Re}$. Підставляючи в (2.12) вираз для β , а також висловивши масу частинок і площа фронтального перетину через діаметр: $m_q = \rho_q \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3$, $S = 4\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2$, і враховуючи, що щільність частинок значно перевищує щільність повітря, приходимо до виразу для швидкості витання, відомому як закон Стокса:

$$v = \frac{gd_q^2 \rho_q}{18\mu}. \quad (2.13)$$

Якщо швидкість витання відома, для прогнозу концентрацій частинок в атмосферному повітрі на різних відстанях від джерела забруднення можна використовувати модифіковані рівняння для прогнозу концентрації забруднюючих речовин, отримані для випадку газової емісії без урахування ефекту віддзеркалення від земної поверхні.

Перейдемо від нерухомої системи координат до системи рухається вертикально вниз з постійною швидкістю, яка дорівнює швидкості витання. Нова система координат є інерціальній, і відповідно до принципу відносності фізичні закони в ній матимуть той же вид, що і в нерухомій системі. Оскільки в обраній рухомій системі частинки є нерухомими, для розрахунку їх концентрацій можна застосовувати формулу Сеттона (2.5) із заміною координати z на координату z' . Вертикальні координати в нерухомій і рухомій системах координат пов'язані співвідношенням $z' = z + vt$, де t – час руху частинки після викиду з труби. Оскільки для переміщення на відстань x від джерела забруднення за напрямком вітру частці потрібен час $t = \frac{x}{u}$, вертикальна координата частинки, що знаходиться на відстані x від джерела в нерухомій системі координат буде

дорівнювати $z = h - \frac{vx}{u}$. Таким чином, повертаючись до нерухокої системи координат, отримаємо такий вираз для оцінки концентрації частинок в довільній точці простору:

$$C(x, y, z) = \frac{Q_q}{2\pi i \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z - (h - vx/u))^2}{\sigma_z^2}\right)\right), \quad (2.14)$$

де Q_q – інтенсивність викиду частинок з труби.

Поряд з прогнозом концентрації частинок в атмосферному повітрі значний інтерес з точки зору оцінки стану навколишнього середовища представляє прогноз швидкості випадання частинок на підстилаючої поверхню w , тобто маси частинок, які випадають за одиницю часу на поверхню одиничної площі. За довільне час t земної поверхні досягнутий тільки ті частинки, які знаходяться на висоті, що не перевищує значення tv . Якщо знехтувати горизонтальним рухом частинок, підстильної поверхні площею S досягнутий частки, що знаходилися в повітряному циліндрі над поверхнею, обсяг якого дорівнює Stv . Маса частинок в цьому циліндрі дорівнює C_0Stv , где $C_0 = C(x, y, 0)$ – приземному концентрація частинок. Звідси для швидкості випадання частинок отримуємо вираз:

$$w = C_0 v. \quad (2.15)$$

Формула (2.15) справедлива для оцінки швидкості випадання частинок, незалежно від застосовуваної моделі поширення забруднюючих речовин в атмосферному повітрі. Підставляючи в (2.15) вираз для приземної концентрації частинок з модифікованої формули Сеттона (2.14), отримаємо вираз для швидкості випадання частинок в моделі гауссова струменя:

$$w = \frac{Q_q v}{2\pi i \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z - (h - vx/u))^2}{\sigma_z^2}\right)\right). \quad (2.16)$$

Для оцінки маси частинок, що випадають на підстилаючої поверхню за тривалий період, необхідно, з урахуванням рози вітрів, підсумувати маси частинок, що випадають на поверхню за різні періоди, які характеризуються швидкістю вітру, постійної по силі та напрямку.

Розрахункові формули для нормативних прогнозів

При проектуванні промислових підприємств і при оцінці впливу на навколишнє середовище діючих підприємств важливо визначити найбільші можливі величини приземних концентрацій забруднюючих речовин, так як з метою задоволення гігієнічних вимог саме ці величини не повинні перевищувати допустимих значень. Для знаходження максимальних приземних концентрацій при найбільш несприятливих умовах розроблені розрахункові формули, більш зручні для обчислень, ніж рівняння розглянуті вище.

Максимальні приземні концентрації залежать від безлічі факторів. Одним з найбільш істотних факторів є швидкість вітру. З одного боку, зі зменшенням швидкості вітру внаслідок зменшення відстані від джерела забруднення, на якому досягається максимальна концентрація, і зменшення процесів розсіювання максимальна приземна концентрація збільшується. З іншого боку, зменшення швидкості вітру призводить до збільшення початкового підйому газового струменя (збільшення висоти віртуального джерела), що зумовлює зменшення максимальної приземної концентрації. Таким чином, існує так звана небезпечна швидкість вітру u_m , при якій досягається найбільше значення приземної концентрації забруднюючих речовин.

Величина небезпечної швидкості вітру визначається з умови

$$\frac{\partial C_m}{\partial u} = 0, \text{ де } C_m \text{ – максимальна приземна концентрація, значення якої}$$

залежить від швидкості вітру та інших факторів.

Аналіз різних наближених аналітичних рішень рівняння турбулентної дифузії показує, що величина um залежить від двох параметрів: $v_m = 0,653 \sqrt{\frac{V_1 \Delta T}{H}}$ і $f = 1000 \frac{w_0^2 D}{H^2 \Delta T}$,

де w_0 (м/сек) – середня швидкість виходу газоповітряної суміші з гирла джерела викиду;

H (м) – висота джерела викиду над рівнем землі;

V_1 – витрата газоповітряної суміші, що визначається за формулою: $V_1 = \frac{\pi d^2 w_0}{4}$,

D (м) – діаметр гирла джерела викиду; ΔT (°C) – різниця між температурою що викидається газоповітряної суміші і температурою атмосферного повітря.

Залежність небезпечної швидкості вітру від зазначених параметрів визначається формулами:

v_m	d
$v_m \leq 0,5$	$d = 2,48(1 + 0,283\sqrt{f})$ (1.17a)
$0,5 < v_m \leq 2$	$d = 4,95v_m(1 + 0,283\sqrt{f})$ (1.17б)
$v_m > 2$	$d = 7\sqrt{v_m}(1 + 0,283\sqrt{f})$ (1.17в)

Відстань x_m (м) від джерела викидів до місця, де приземному концентрація забруднюючих речовин при несприятливих метеорологічних умовах досягає максимального значення, визначається за формулою:

$$x_m = \frac{5 - F}{4} dH, \quad (2.18)$$

де безрозмірний коефіцієнт d визначається за формулами, в залежності від параметра v_m :

v_m	d
$v_m \leq 0,5$	$d = 2,48(1 + 0,28\sqrt[3]{f})$ (2.19a)
$0,5 < v_m \leq 2$	$d = 4,95v_m(1 + 0,28\sqrt[3]{f})$ (2.19б)
$v_m > 2$	$d = 7\sqrt{v_m}(1 + 0,28\sqrt[3]{f})$ (2.19в)

Максимальне значення приземної концентрації шкідливої речовини c_m (мг/м³) при викиді газоповітряної суміші з одиночного точкового джерела з круглим гирлом досягається при несприятливих метеорологічних умовах на відстані x_m (м) від джерела і визначається за формулою:

$$C_m = \frac{AMFm\eta}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}}, \quad (2.20)$$

де А – коефіцієнт, що залежить від температурної стратифікації атмосфери. Значення коефіцієнта А, відповідне несприятливих метеорологічних умов, при яких концентрація шкідливих речовин в атмосферному повітрі максимальна, для території Харківської області приймається рівним 160;

М – маса шкідливої речовини, що викидається в атмосферу в одиницю часу;

F – безрозмірний коефіцієнт, що враховує швидкість осідання шкідливих речовин в атмосферному повітрі і має наступні значення:

Газоподібні речовини, дрібнодисперсні аерозолі, швидкість осідання яких практично дорівнює нулю	Пил при коефіцієнті очищення не менше 90%	Пил при коефіцієнті очищення від 75 до 90%	Пил при коефіцієнті очищення менш за 75%
1	2	2,5	3

m и n – 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, що не перевищує 50 м на 1 км, $\eta=1$).

Коефіцієнт m розраховується за формулами:

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1\sqrt{f} + 0,34\sqrt[3]{f}} \quad \text{при } f < 100; \quad (2.21)$$

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1\sqrt{f} + 0,34\sqrt[3]{f}} \quad \text{при } f \geq 100. \quad (2.21.a)$$

де $f = 1000 \frac{w_0^2 D}{H^2 \Delta T}$. Коефіцієнт n залежить від параметра $v_m = 0,65\sqrt[3]{\frac{V_1 \Delta T}{H}}$

і розраховується за формулами:

v_m	n
$v_m \geq 2$	$n = 1$ (2.22a)
$0.5 \leq v_m < 2$	$n = 0,532v_m^2 - 2,13v_m + 3,13$ (2.22б)
$v_m < 0,5$	$n = 4,4v_m$ (2.22в)

Приземна концентрація забруднюючих речовин C в атмосфері по осі факела на різних відстанях x (м) від джерела викидів при небезпечній швидкості вітру u_m визначається за формулою:

$$C = s_1 C_m \quad (2.23)$$

де s_1 – безрозмірний коефіцієнт, який визначається в залежності від ставлення x/x_m и коефіцієнта F по формулам:

$$s_i = 3(x/x_m)^4 - 8(x/x_m)^3 + 6(x/x_m)^2 \quad \text{при } x/x_m \leq 1; \quad (2.24a)$$

$$s_1 = \frac{1,13}{0,13(x/x_m)^2 + 1} \quad \text{при } 1 < x/x_m \leq 8; \quad (2.24б)$$

$$s_1 = \frac{x/x_m}{3,58(x/x_m)^2 - 35,2(x/x_m) + 120} \quad \text{при } F \leq 1,5 \text{ и } x/x_m > 8; \quad (2.24\text{в})$$

$$s_1 = \frac{1}{0,1(x/x_m)^2 + 2,47(x/x_m) - 17,8} \quad \text{при } F > 1,5 \text{ и } x/x_m > 8. \quad (2.24\text{г})$$

Отримані дані про концентраціях забруднюючих речовин на різних відстанях від джерела викидів використовуються для визначення розмірів розрахункових санітарно захисних зон підприємств. Кордон розрахункової санітарно захисної зони знаходиться на відстані x від джерела викидів, на якому концентрація забруднюючої речовини, визначена за формулою 2.23, дорівнює ГДК, і визначається для кожної забруднюючої речовини. Кордон розрахункової санітарно захисної зони підприємства встановлюється за максимальним значенням, з отриманих для кожного з забруднюючих речовин.

Різноманіття відомих методів моделювання в газовій динаміці обумовлено їх властивостями. На основі системного аналізу:

- системовиділяючих функцій елементів систем, в яких протікають газодинамічні процеси;

- функціонально-значущих відносин між ними, можна виділити наступні істотні класифікаційні ознаки течій:

- а) внутрішнє (зовнішнє обтікання);

- б) розмірність простору;

- в) -нев'язке:

- 1) безвіхреве (вихровий);

- 2) ізоентропічне (неізоентропічне);

- в'язке:

- 1) ламінарне, перехідною режим, турбулентний;

- 2) безвідривне (з локальними зонами відриву));

- г) нестисливої (стискається);

- д) однорідне.

Введення перерахованих вище ознак забезпечило можливість структурного аналізу складних тривимірних течій, розробляти системні фізичні та математичні моделі складних газодинамічних процесів, що дозволяють якісно і кількісно аналізувати досліджувані явища. Зазвичай такі моделі, побудовані відповідно до принципів системного підходу методом декомпозиції, являють собою багаторівневі ієрархічні структури сімейства підсистем з вкладеною багатосаровою ієрархією прийняття рішення для кожної з підсистем. Так, наприклад, в результаті декомпозиції тривимірного в'язкої течії в каналах складної форми прийнято виділяти ряд підсистем:

а) основний потік:

- 1) плоско-паралельний (симетричний) потік;
- 2) каналний вихор;
- 3) перетікання, викликані перепуском;

б) пристінні течії:

1) однорідні течії:

- обтікання нерухомою поверхні;
- протягом у рухомий поверхні;
- закінчення струменя;

2) області взаємодії:

- струменя з потоком, що набігає;
- змішання в сліді;
- кутовий, підковоподібний вихори.

Аналіз експериментальних даних дозволяє висловити припущення про існування постійної взаємодії між представленими підсистемами, що вимагає врахування їх взаємного впливу при побудові системної математичної моделі течії в цілому.

У задачах газової динаміки однієї з найбільш поширених математичних моделей є наближення суцільного середовища, справедливе

для опису течій газу в широкому діапазоні зміни параметрів потоку. Облік різних фізичних ефектів в наближенні, призводить до ланцюжку газодинамічних моделей [3 - 9], найбільш повна серед яких описується рівняннями Нав'є - Стокса, що стискається теплопровідного газу:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \operatorname{div} \overline{q},$$

(2.25)

$$\rho \frac{d\overline{q}}{dt} = \rho \overline{f} - \operatorname{grad} P + \operatorname{Div} P_v,$$

(2.26)

$$\rho \frac{d}{dt} \left(e + \frac{q^2}{2} \right) = (\rho \overline{f}, \overline{q}) - \operatorname{div} (P \overline{q}) + P_v \cdot \nabla \overline{q} + \overline{q} \cdot \operatorname{Div} P_v - \operatorname{div} \overline{h}_T + e_s,$$

(2.27)

$$\frac{d}{dt} (\rho Q_i) = -\rho \operatorname{div} (Q_i \overline{q}) - \operatorname{div} \overline{h}_i + \rho_{si}, \quad i = 1 \dots N,$$

(2.28)

де t – час;

\overline{q} – вектор швидкості потоку;

P, ρ – тиск та щільність;

e – внутрішня енергія одиниці маси газу;

\overline{f} – вектор масових сил,

P_v – тензор поверхневих напружень, обумовлених наявністю в'язкості;

\overline{h}_T – тепловий потік, обумовлений теплопровідністю;

e_s – інтенсивність тепловиділення в одиниці об'єму газу внаслідок хімічних реакцій;

Q_i – відносна масова щільність i - тій компоненти домішки (відношення щільності газоподібної речовини i - тій компоненти домішки до щільності суміші);

\dot{h}_i – потік маси i - тій компоненти домішки;

ρ_{si} – інтенсивність зміни щільності i - тій компоненти домішки внаслідок хімічної реакції;

N – кількість компонент суміші.

Ці рівняння є системою диференціальних рівнянь в приватних похідних, що виражають закони збереження маси, імпульсу, енергії, перенесення компонент суміші, доповнену рівняннями стану.

Тип нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса визначено як неповно-параболічний. Точніше, ця квазілінійну система рівнянь в межі при нескінченному числі Рейнольдса (Re) є гіперболічної, а при будь-якому кінцевому числі Рейнольдса не є ні чисто параболічної, ні чисто еліптичної, ні чисто параболічної. У стаціонарному випадку рівняння Нав'є-Стокса - рівняння еліптичного типу.

Ланцюжок спрощених моделей може бути отриманий із загальної при різних припущеннях про характер перебігу. Таким чином, можна говорити про наближення Нав'є-Стокса яке враховує моделі [3-9].

Серед використовуваних для моделювання широкого класу течій слід виділити кілька основних типів спрощених рівнянь Нав'є-Стокса:

- наближення тонкого шару;
- параболізоване рівняння Нав'є-Стокса;
- рівняння вузького ударного шару;
- наближення граничного шару;
- рівняння Ейлера.

Рівняння в наближенні тонкого шару отримують з нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса відкиданням вузьких членів з похідними у напрямку

поздовжньої (вздовж переважного напрямку потоку) координати на поверхні обтічного тіла. Хоча рівняння Нав'є-Стокса в наближенні тонкого шару істотно простіше повних, їх використовують для визначення параметрів у всій розрахунковій області відривних течій з великими градієнтами тиску в нормальному до обтічної поверхні напрямку.

Параболізоване рівняння отримують з нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса відкиданням нестационарних членів і в'язких членів, що містять похідні по поздовжній координаті. У загальному випадку висновок параболізованих рівнянь Нав'є-Стокса з повних є досить довільним. З цієї причини виникло кілька злегка відрізняються версій параболізованих рівнянь Нав'є-Стокса. Додаткове видозміна вектора конвективного переносу в поздовжньому напрямку робить можливим покрокове інтегрування рівнянь по поздовжній координаті у всій розрахунковій області. Однак, відкидання других похідних в поздовжньому напрямку в основних рівняннях Нав'є-Стокса при наявності в потоці поздовжнього градієнта тиску, викликає при побудові рішення параболізованих рівнянь Нав'є-Стокса ряд труднощів, таких як неприпустимість появи в рішеннях відриву в поздовжньому напрямку і необхідність «відключення» його повністю або частково в дозвуковій частини потоку, що призводить до спотворення отриманої в результаті розрахунків картини перебігу. Параболізоване рівняння Нав'є-Стокса дають коректні результати лише при розрахунку стаціонарних надзвукових і безвідривно в поздовжньому напрямку течій.

Рівняння вузького ударного шару є ще більш спрощеною формою рівнянь Нав'є-Стокса. На відміну від параболізованих рівнянь Нав'є-Стокса, в рівняннях вузького ударного шару закладені додаткові спрощення щодо вузьких членів з похідними не тільки в поздовжньому, а й в поперечному напрямках, завдяки чому їх можна вирішувати маршовим методом в будь-якому з перелічених напрямів. Використовувати рівняння

вузького ударного шару можна лише при побудові рішень задач стаціонарного надзвукового безвідривного обтікання тіл простої форми.

З асимптотичного аналізу рівнянь Нав'є-Стокса слід, що навколо поверхні тіла товщиною порядку $\frac{1}{\sqrt{Re}}$ в'язкість істотно впливає на перебіг. У цій області протягом описується рівняннями прикордонного шару. Принциповою відмінністю цих рівнянь від повних рівнянь є відсутність вузьких членів з похідними в поздовжньому і поперечному напрямках, а також тривіальний вид рівняння кількості руху в проекції на нормаль до обтічної поверхні. Рівняння прикордонного шару для стаціонарного течії є рівняннями параболічного типу і допускають рішення маршовими методами.

Прямий асимптотичний перехід в рівняннях Нав'є-Стокса при $Re \rightarrow \infty$ призводить до рівнянь, що описують плин газу без урахування впливу в'язкості — рівнянням Ейлера. Нестационарні рівняння Ейлера є системою квазілінійних диференціальних рівнянь в приватних похідних першого порядку гіперболічного типу. Для стаціонарних течій рівняння Ейлера є рівняннями еліптичного типу для дозвукових течій і гіперболічного типу для надзвукових. Тому при розрахунку дозвукових течій і течій з локальними дозвуковими зонами стаціонарні рішення, як і для повної системи рівнянь Нав'є-Стокса, отримують методами встановлення. Однак кількість обчислень значно скорочується в зв'язку з більш простим видом рівнянь. Розрахунок стаціонарних надзвукових течій істотно спрощується, так як з'являється можливість отримання рішення в результаті покрокового інтегрування в напрямку надзвукової течії (маршовими методами).

Слід зазначити, що в разі розрахунків зовнішнього обтікання або внутрішніх течій, коли хоча б однієї з меж розрахункової області є обтічна поверхня, доцільно використовувати зонний підхід, запропонований Л. Прандтлем. Цей підхід полягає у використанні для опису основного потоку

далеко від тіла - рівнянь Ейлера, пристінних течій - рівнянь прикордонного шару і зрощувати ці два рішення будь-яким способом в деякій області простору.

Таким чином, на основі аналізу рівнянь Нав'є-Стокса, методів побудови їх рішень і областей їх застосування зроблено висновок, що для значного скорочення обсягу обчислень і зберігається для цих цілей інформації на ЕОМ доцільно використовувати для моделювання екологічних процесів в атмосфері рівняння Ейлера.

3 ЯКІСНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ВИКИДІВ ЗА СТОХАСТИЧНОЮ МОДЕЛЛЮ

3.1 Двовимірна модель

Розроблена модель реалізує наступні функції:

- генерацію вихідних даних;
- редагування файлів даних;
- перегляд файлів даних;
- запуск виконуваних модулів;
- візуалізацію файлів даних.

Модель призначена для прогнозування шляхом чисельного моделювання газодинамічних процесів поширення шкідливих домішок в атмосфері. Для реалізації цієї мети при розробці програмних додатків був використаний мову програмування Delphi, тому що він ідеально підходить для програмування на основі об'єктно-орієнтованого підходу. Цей язык програмування дозволяє зберігати більшу частину програмного коду всередині самостійних об'єктів, що скорочує обсяг програми і полегшує налагодження та супровід.

Структурний аналіз алгоритму розрахунку в цілому дозволяє виділити ряд основних блоків (модулів), встановити між ними зв'язок в сенсі напрямків обміну вхідними - вихідними.

Перевагою запропонованої декомпозиції є наявність тільки прямих зв'язків, що дозволяє легко автоматизувати управління потоками даних і порядком вирішуваних завдань.

Комп'ютерна система інженерного аналізу газодинамічних процесів змішання газів включає в себе кілька виконуваних модулів. В укрупненому вигляді модель розбивається на 2 частини:

- системне наповнення (СН). Воно містить системні засоби, необхідні для експлуатації моделі. СН включає підпрограми формування структурованих завдань для проведення необхідних розрахунків, підпрограми введення / виведення даних, візуалізації;

- функціональне наповнення (ФН). Це комплекс підпрограм для побудови чисельного рішення задач. У свою чергу функціональне наповнення моделі ділиться на 2 частини:

1) базисна частина комплексу (БЧК). Це сукупність базисних програмних модулів (БМ) необхідних для безпосереднього вирішення базисних завдань;

2) функціональна частина комплексу (ФЧК). Це функціональні програмні модулі (ФМ), призначені для розрахунку коефіцієнтів, параметрів і інших даних використовуваних для роботи БМ.

Засадничими завданнями для даної моделі є:

- завдання розрахунку кількості будівель;
- завдання розрахунку дифузійного розсіювання;
- завдання обліку вітру.

3.1.1 Дифузійне розсіювання

При чисельному моделюванні розрахункова область розбивається двома родинами поверхонь на кінцеве число елементарних обсягів (осередків). Визначимо положення будь-якого елемента в межах побудованої розрахункової сітки набором індексів i, j, k ($i = 0 \dots n; j = 0 \dots m$).

Задамо початкове розподіл забруднювача в атмосфері: в тій комірці, в якій знаходиться труба маса забруднювача дорівнює кількості шкідливих домішок одиночного викиду, в інших осередках маса забруднювача дорівнює нулю.

У осередок з трубою на кожному кроці поміщається додаткова порція домішки певної маси, а загальна маса забруднювача, викинутого в атмосферу, на кожному кроці збільшується на цю додаткову порцію домішки.

Параметри суміші газів для фіксованого часу всередині кожної клітинки вважаються постійними, усередненими по її обсягу і мінливими лише при переході від одного осередку до іншого.

Перемішування повітря і розподіл домішок в атмосфері представимо в наступному вигляді: на кожному наступному кроці маса домішок в кожному осередку дорівнює середньому значенню по дев'яти сусідніх осередків.

Концентрація кожного осередку розподіляється на всі сусідні осередки рівномірно, в тому числі перша частина концентрації залишається і в даному осередку. А також до неї приєднуються частини концентрацій з сусідніх осередків. Таким чином, при розрахунку в кожному осередку отримуємо накопичення концентрацій шкідливих речовин.

3.1.2 Урахування вітру

При визначенні вітру необхідно врахувати один з найбільш важливих факторів - швидкість вітру. Тому що існує так звана небезпечна швидкість вітру, при якій досягається найбільше значення приземної концентрації забруднюючих речовин. А також враховується напрямок вітру в даній місцевості.

Вихідними даними є масив, в якому відображається напрямок вітру, а також швидкість вітру. Необхідно переносити вміст кожного осередку на одну клітинку в напрямку вітру. Для обліку швидкості вітру можна зміщувати забруднювач на кілька осередків пропорційно швидкості вітру.

Рисунок 3.2 — Врахування вітру для двовимірної моделі

3.1.3 Урахування обтікання об'єктів

Розглянемо область поширення дімошок (рис.3.3).

Кожна будівля має своє місце розташування в сітці осередків.

Для обліку обтікання об'єктів проводиться підрахунок будівель навколо осередку масиву.

Вихідними даними є масив, в якому відображається місце розташування будівель, що знаходяться в даній розглянутій території.

Необхідно провести перевірку всіх осередків, які знаходяться в зіткненні з даною, на наявність в них будівлі. Кількість будівель підсумовується. Створюється новий масив, в якому відображаються результати розрахунків.

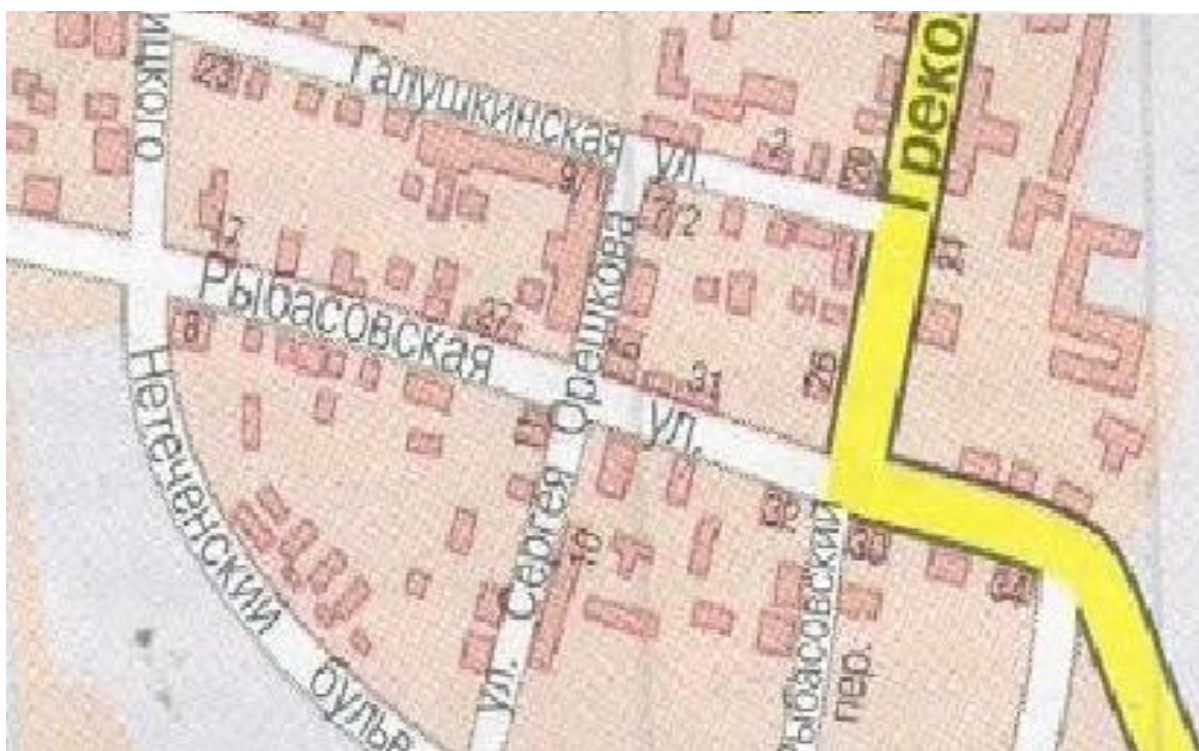


Рисунок 3.3 — Область поширення шкідливих дімошок

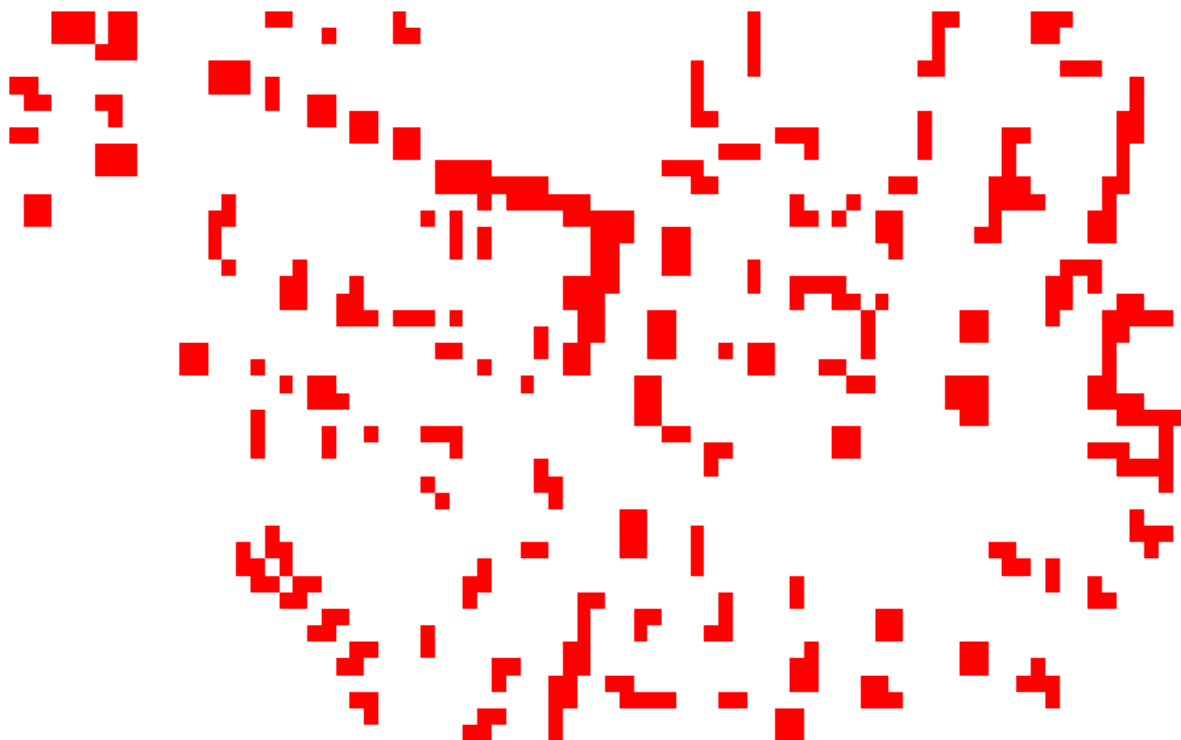


Рисунок 3.4 — Розташування будівель в сітці клітинок

При дифузійному розсіюванні необхідно враховувати наявність будівлі в даній комірці, а також в осередках, які стикаються з нею. Якщо в сусідній комірці знаходиться будівля, то вона не враховується при розрахунку концентрацій. А якщо в даній клітинці знаходиться будівля, то її концентрація буде дорівнює нулю.

При урахуванні вітру необхідно розглядати зміну напрямку вітру біля будівель. Для чого існує вихідний масив, в якому це відображається. В осередку, в якій знаходиться будівля, швидкість вітру дорівнює нулю.

Наведений на малюнку 3.4 приклад показує якісну картину поширення викидів в двовимірному просторі для точкового джерела в поле швидкостей, формованому особливостями рельєфу.

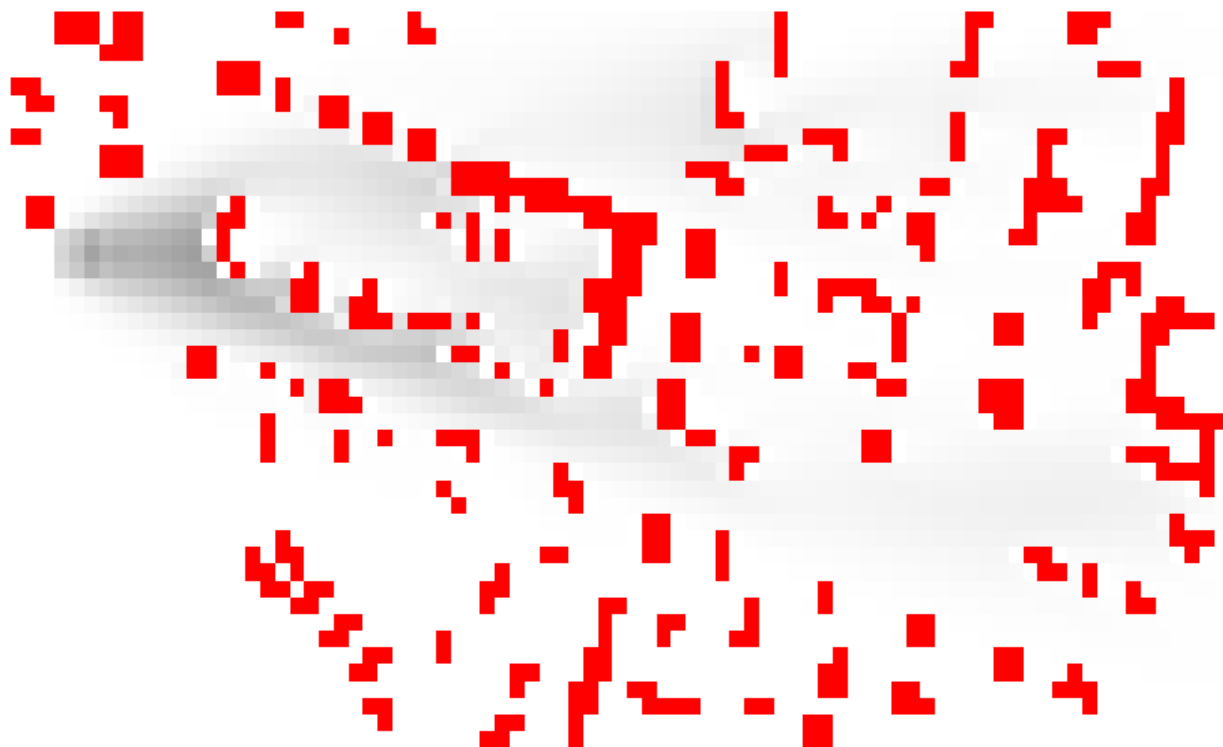


Рисунок 3.4 — Двовимірна модель з урахуванням будівель і вітру

3.2 Тривимірна модель

Засадничими завданнями для даної моделі є:

- завдання розрахунку кількості будівель;
- завдання розрахунку дифузійного розсіювання;
- завдання урахування вітру;
- завдання урахування гравітації.

3.2.1 Дифузійне розсіювання

Перехід до тривимірної моделі здійснюємо шляхом додавання третьої координати - висоти.

При чисельному моделюванні розрахункова область розбивається трьома родинами поверхонь на кінцеве число елементарних обсягів

(осередків). Визначимо положення будь-якого елемента в межах побудованої розрахункової сітки набором індексів i, j, u ($i = 0 \dots n; j = 0 \dots m; u = 0 \dots k$).

При цьому зміниться розрахунок перемішування повітря і розподілу домішок в атмосфері: на кожному наступному кроці маса домішок в кожній клітинці дорівнює середньому значенню по двадцяти семи сусідніх клітинках.



Рисунок 3.5 — Дифузійне розсіювання для тривимірної моделі

3.2.2 Врахування вітру

Врахування вітру проводиться таким же чином, як і для двовимірної моделі, але при цьому для тривимірної моделі необхідно також звернути увагу і на вертикальні переміщення повітря.



Рисунок 3.6 — Врахування вітру для тривимірної моделі

3.2.3 Врахування обтікання об'єктів

Врахування обтікання об'єктів для тривимірної моделі відрізняється від обліку для двовимірної моделі лише тим, що необхідно враховувати висоту будівель. Так задамо, що на першому рівні знаходиться земляний покрив, а з другого до шостого - розташовані будівлі, починаючи з сьомого рівня - атмосферне повітря.

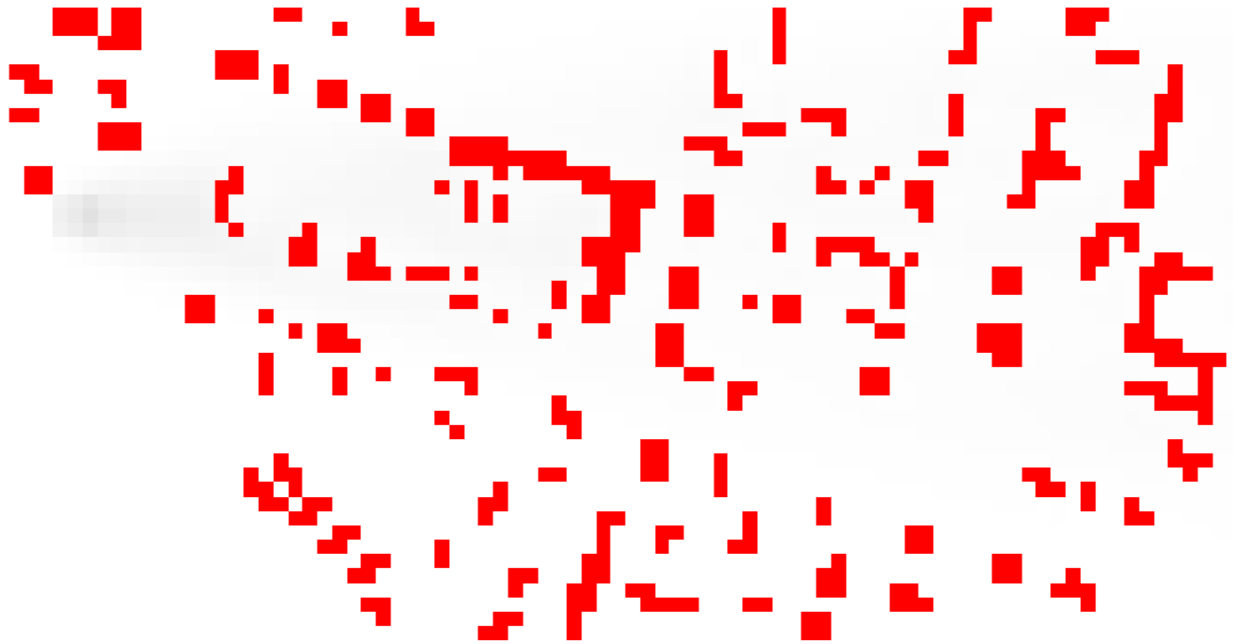


Рисунок 3.7 — Тривимірна модель з урахуванням будівель і вітру

3.2.4 Врахування гравітаційної складової

Для цього здійснюємо перенесення вмісту кожного осередку з більшої висоти до меншої на кількість осередків пропорційне силі гравітації.

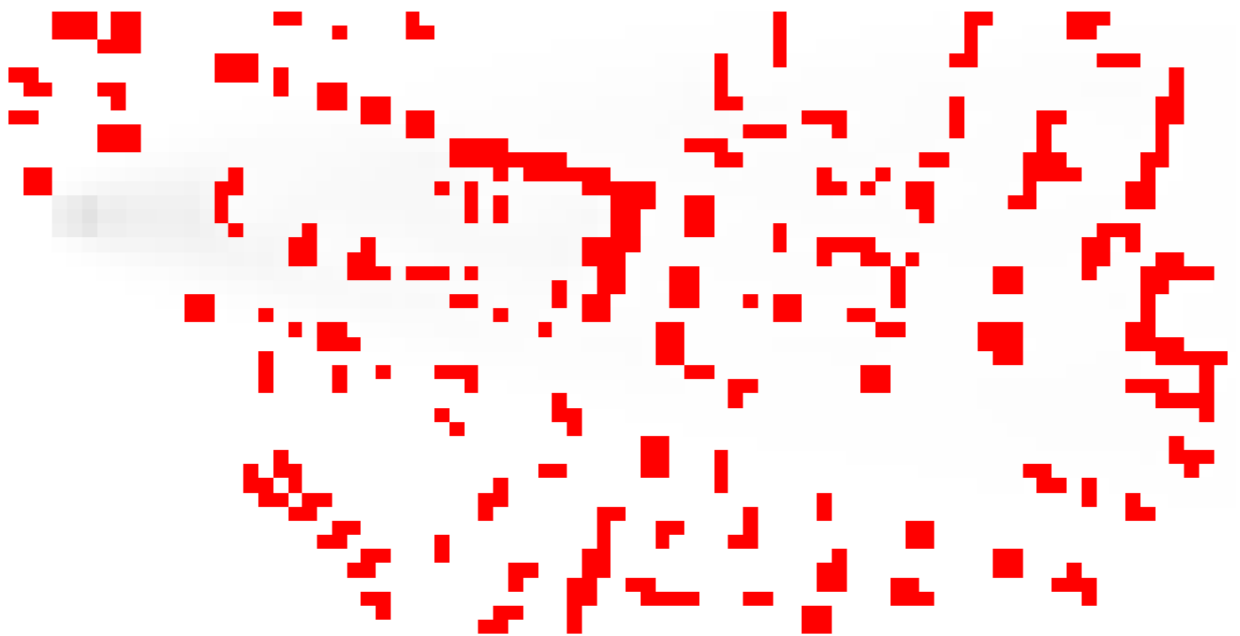


Рисунок 3.8 — Тривимірна модель з урахуванням гравітаційної складової

1.3 Забезпечення масштабованості

Основний алгоритм передбачає, що вміст комірки на кожному наступному кроці розподіляється по всіх сусідніх осередків. Для розрахунку концентрації в кожному осередку необхідний коефіцієнт, який визначає частку домішок.

$$C_i = \frac{C \cdot K}{26}, \quad (3.1)$$

де C – загальна концентрація,

K – коефіцієнт.

Частка, що залишається в осередку, залежить від кроку по часу, а решта розподіляється рівномірно по сусідніх осередків.

Щоб забезпечити масштабованість введемо окремі цикли для кожної процедури розрахунків дифузійного розсіювання, вітру, гравітаційної складової. Це дозволяє змінювати кількість кроків для даних розрахунків.

1.4 Перевірка адекватності якісної моделі

Дамо оцінку отриманим якісним графіками.

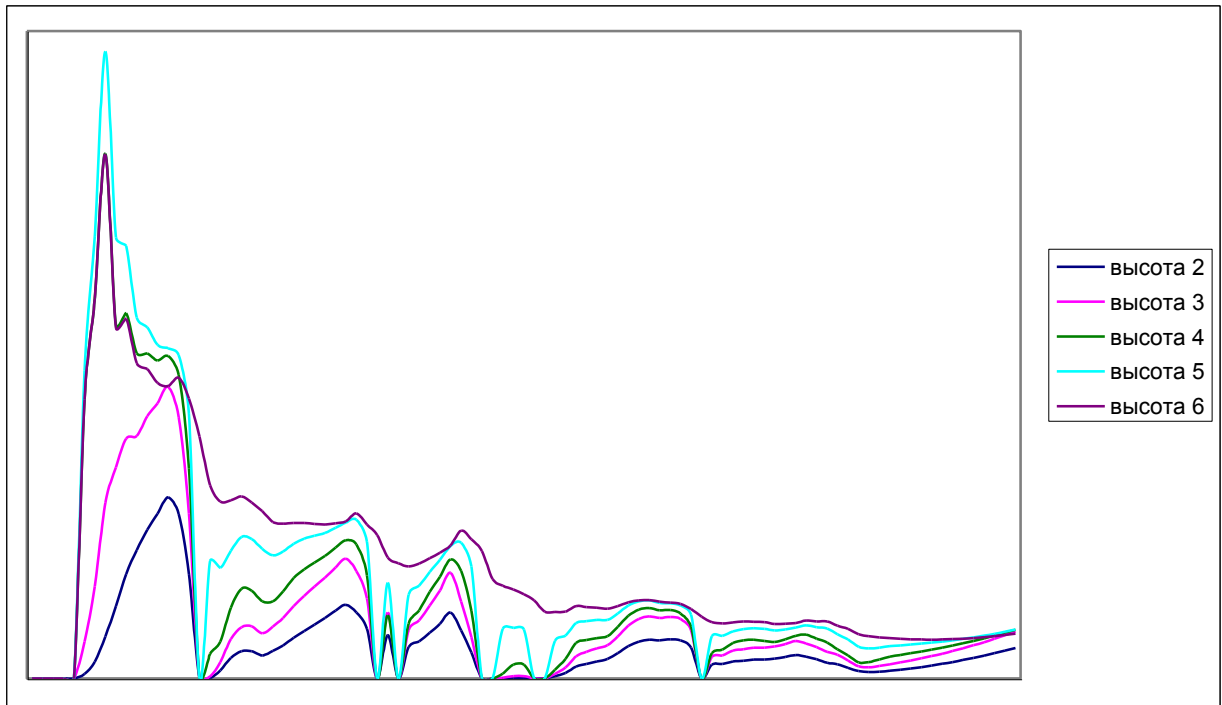


Рисунок 3.9 — Розподіл шкідливих домішок на різній висоті уздовж осі факела

За малюнком 3.9 можна сказати, що вплив будівель на розподіл домішок найбільш великий на тій висоті, на якій вони знаходиться. На висоті, де їх немає, значні коливання відсутні. В осередку, де знаходиться будівля, концентрація дорівнює нулю. Джерело шкідливих домішок знаходиться на висоті 5, тому тут концентрація найбільш велика. На висоті 6 будівель немає, тому даний графік найбільш згладжений і не має точок в нулі. Починаючи з висоти 4 і нижче концентрації зменшуються, тому що розглядаються осередку віддаляються від джерела.

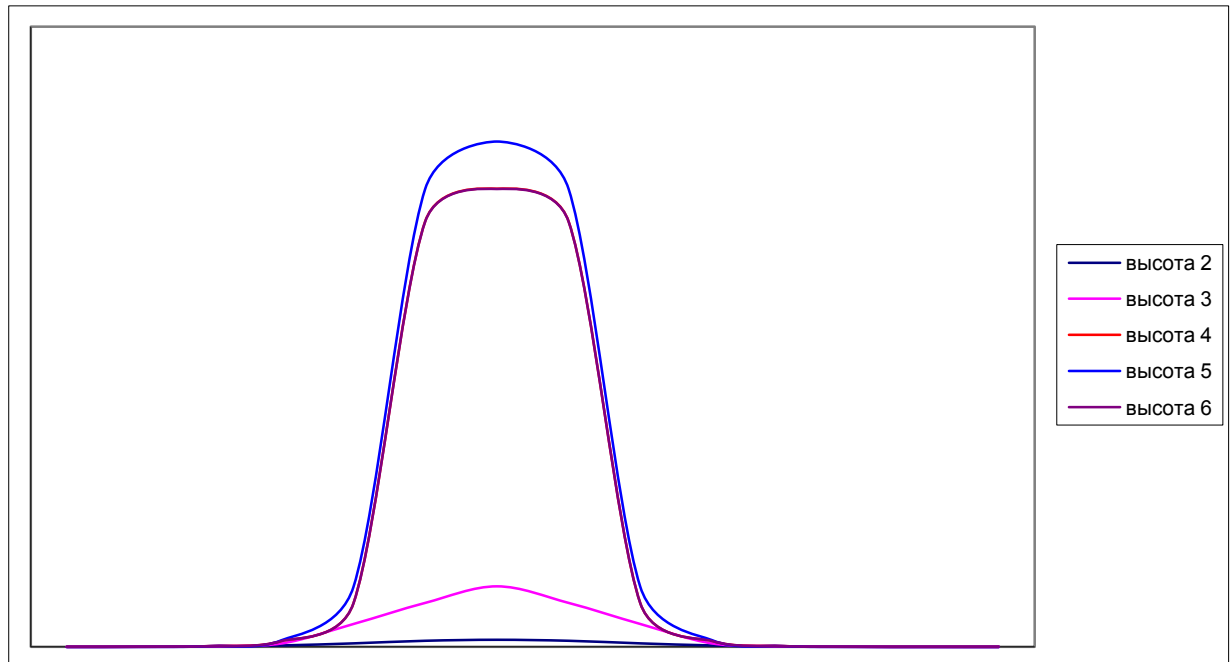


Рисунок 3.10 — Розподіл шкідливих домішок на різній висоті перпендикулярно осі факела

Зміна концентрацій шкідливих домішок зі зміною висоти залежить від місця розташування джерела, що видно за графіками на рисунку 3.10.

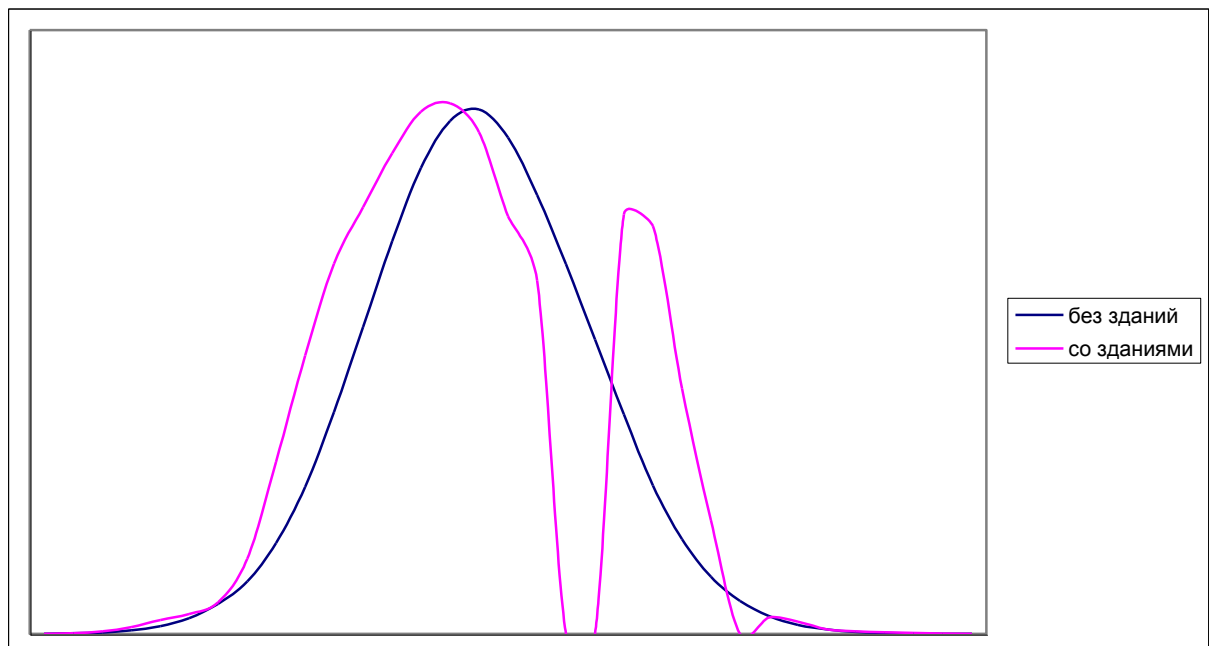


Рисунок 3.11 — Розподіл шкідливих домішок з будівлею і без перпендикулярно осі факела

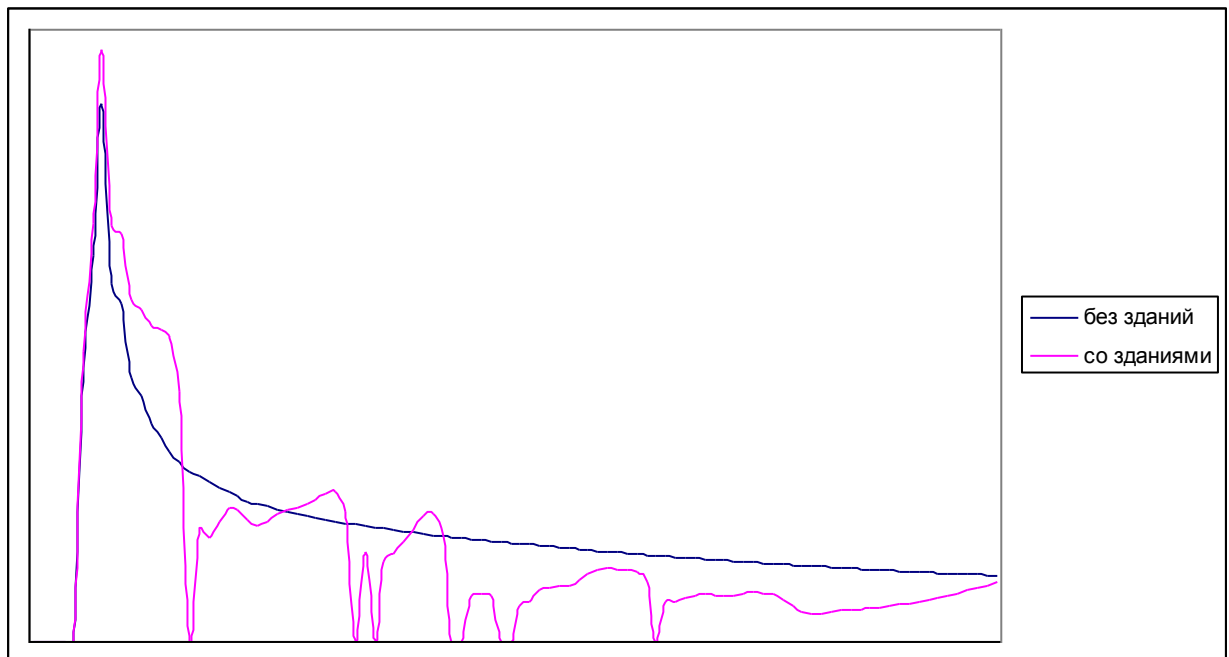


Рисунок 3.12 — Розподіл шкідливих домішок з будівлею і без уздовж осі факела

Швидкість вітру дуже впливає на розподіл шкідливих домішок в атмосфері (рис.3.13-3.16). Чим більше швидкість вітру, тим менше стає концентрація в уст'ї джерела, і тим далі і швидше будуть поширюватися шкідливі домішки.

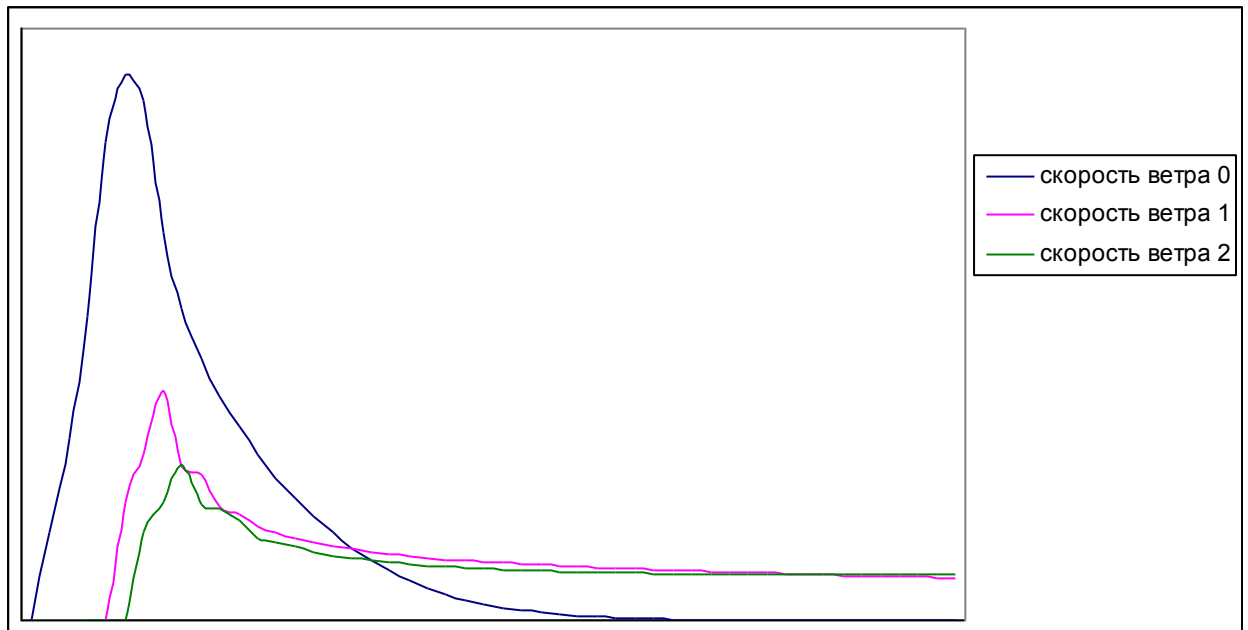


Рисунок 3.13 — Розподіл шкідливих домішок без будівель вздовж осі факела при різній швидкості вітру

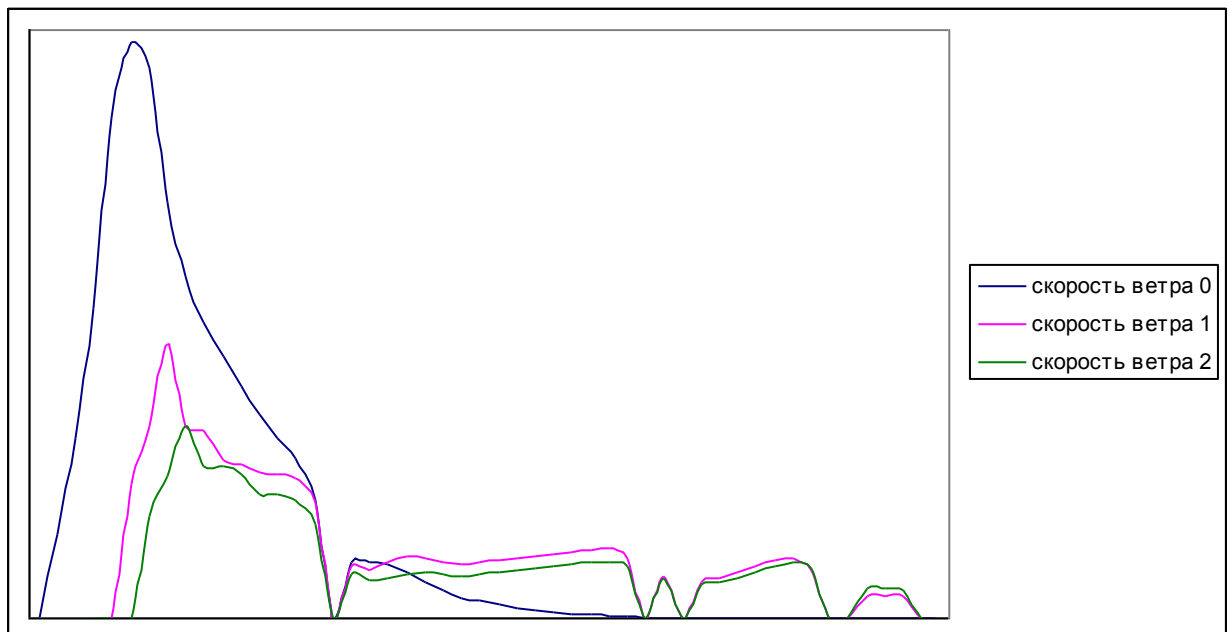


Рисунок 3.14 — Розподіл шкідливих домішок з будівлями уздовж осі факела при різній швидкості вітру

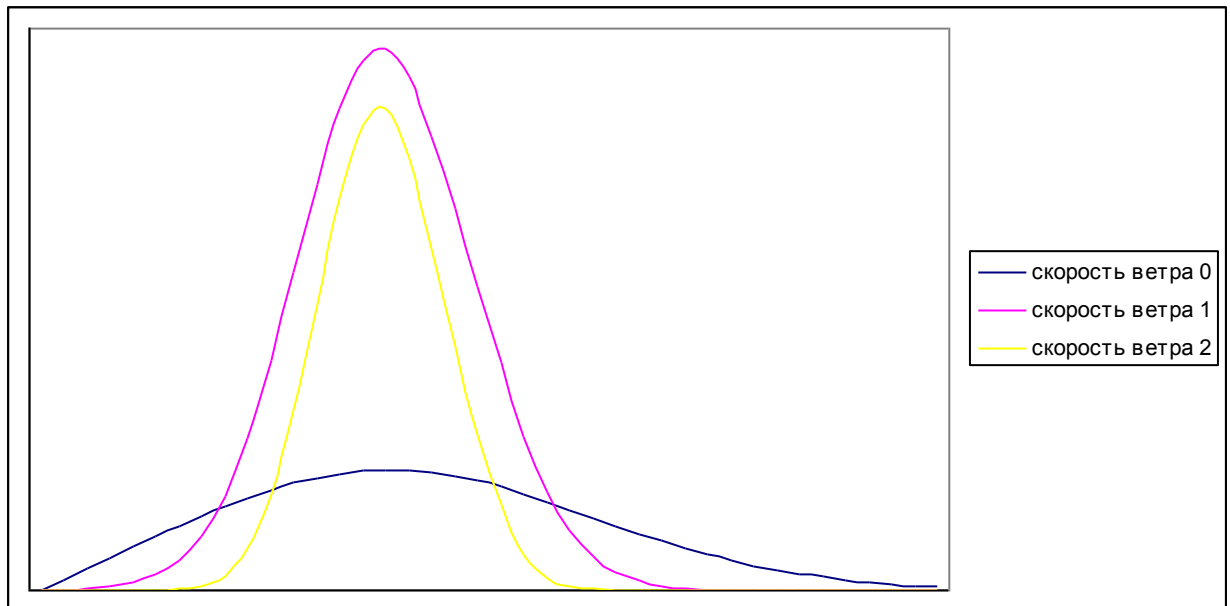


Рисунок 3.15 — Розподіл шкідливих домішок без будівель вздовж перпендикулярно осі факела при різній швидкості вітру

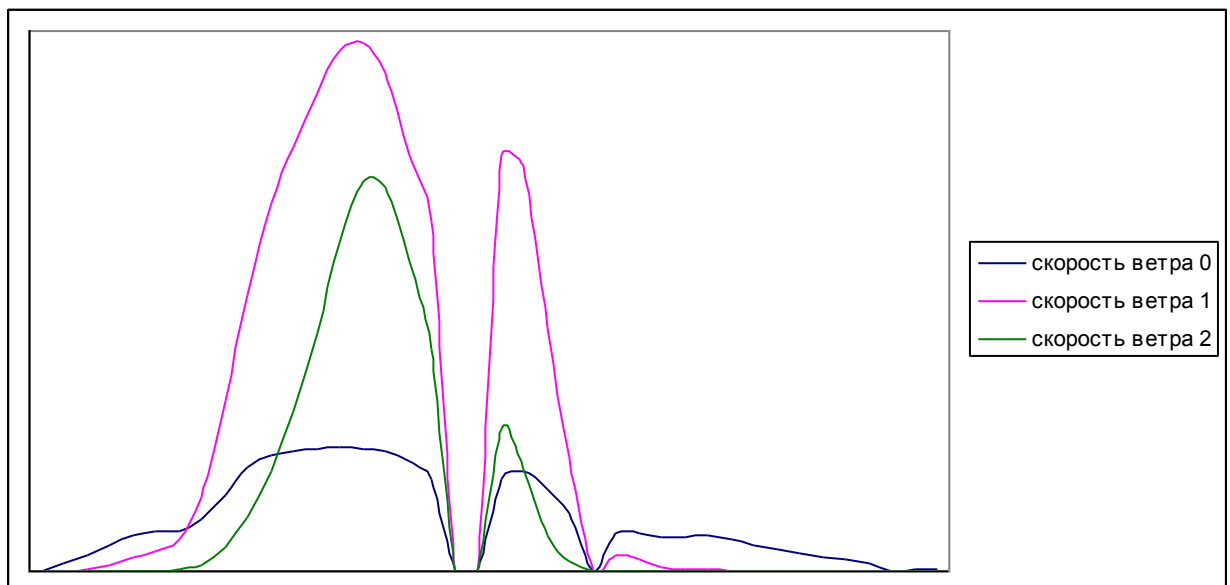


Рисунок 3.16 — Розподіл шкідливих домішок з будівлями вздовж перпендикулярно осі факела при різній швидкості вітру

4 КІЛЬКІСНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ВИКИДІВ ЗА СТОХАСТИЧНОЮ МОДЕЛЛЮ

4.1 Визначення коефіцієнта масштабування для обліку вітру

Для розрахунку концентрацій шкідливих домішок скористаємося програмою Gaussian Dispersion Model Calculator, яка призначена для попереднього розрахунку викидів шкідливих речовин по моделі розсіювання Гаусса.

Для даного розрахунку необхідно поставити такі вихідні дані, як: потужність викиду, висоту джерела викиду, діаметр джерела викиду, швидкість газу в гирлі джерела, температуру газів, середню швидкість вітру, висоту, на якій розглядається швидкість вітру, тип місцевості (міський або сільський), стабільність атмосфери (А, В, С, D, Е, F), температуру навколишнього середовища, відстань до проекції точки на вісь факела, відстань по перпендикуляру до осі факела, висоту точки.

Задамо початкові дані:

- потужність викиду $Q = 0,07 \text{ г/с}$.
- Висота джерела викиду $h = 15,68 \text{ м}$.
- Діаметр джерела викиду $d = 0,5 \text{ м}$.
- Швидкість газу в гирлі джерела $V = 25 \text{ м/с}$.
- температура газів $t_s = 25^\circ \text{C}$.
- Середня швидкість вітру $u = 3,92 \text{ м/с}$.
- Висота, на якій розглядається швидкість вітру $h^* = 7,84 \text{ м}$.
- Тип місцевості — міський.
- Стабільність атмосфери - А. Клас А використовується при денному часу, при сильному рівні сонячної радіації, приповерхнева швидкість вітру $< 2 \text{ м/с}$.
- Температура навколишнього середовища $t = 20^\circ \text{C}$.

- Відстань до проекції точки на вісь факела x задаємо від 0 до 431,2 м з інтервалом 3,92 м.

- Відстань по перпендикуляру до осі факела $y = 0$.

- Висота точки $z = 0$.

Таким чином, отримуємо графік залежності концентрації від відстані до проекції точки на вісь факела $C(x)$.

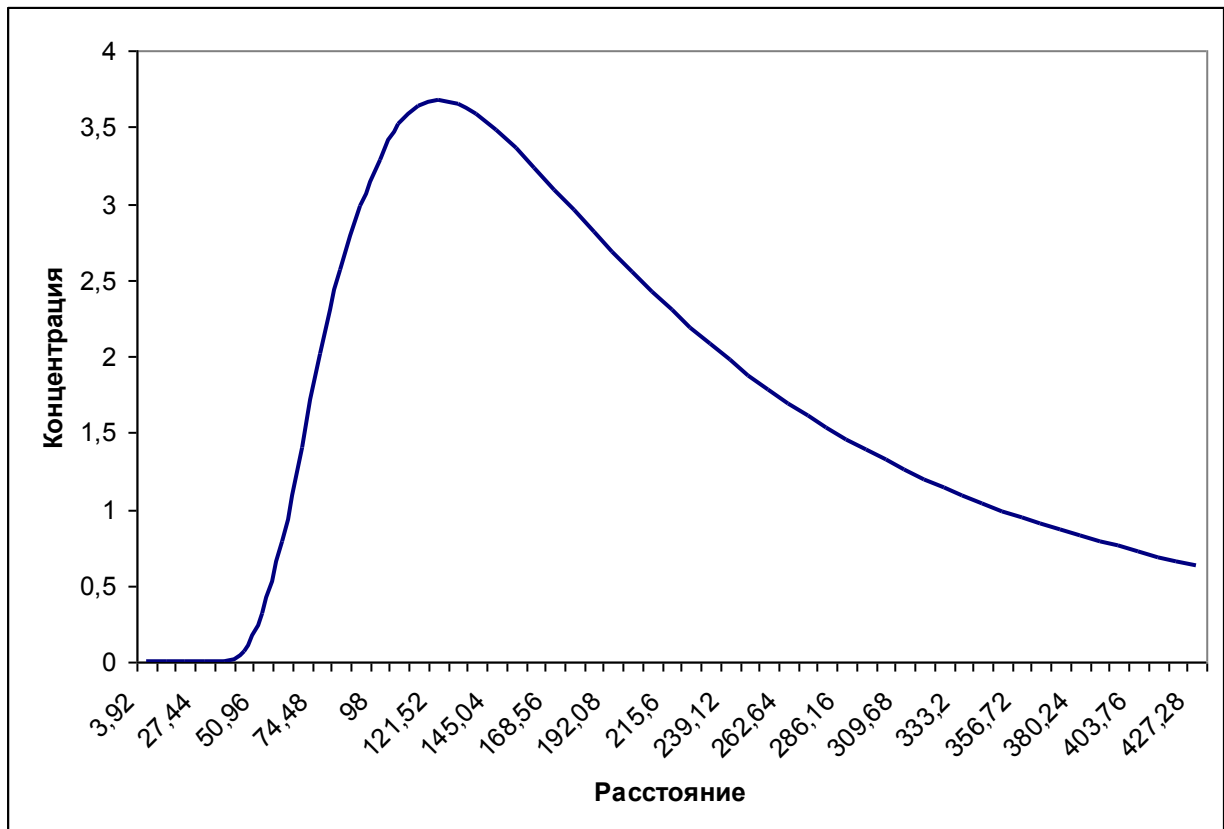


Рисунок 4.1 — Графік залежності концентрації шкідливих домішок від відстані уздовж осі факела при швидкості вітру 3,92 м / с

Розіб'ємо на осередки. Розмір одного осередку - 3,92 м.

За один цикл проводиться переміщення вмісту комірки на кількість осередків, рівне швидкості вітру. При швидкості вітру 3,92 м / с проводиться пересування вмісту на одну клітинку, при швидкості вітру 7,84 м / с - на дві і т.д.

4.2 Визначення коефіцієнта масштабування для обліку гравітаційного осадження

Визначимо швидкість осадження частинок.

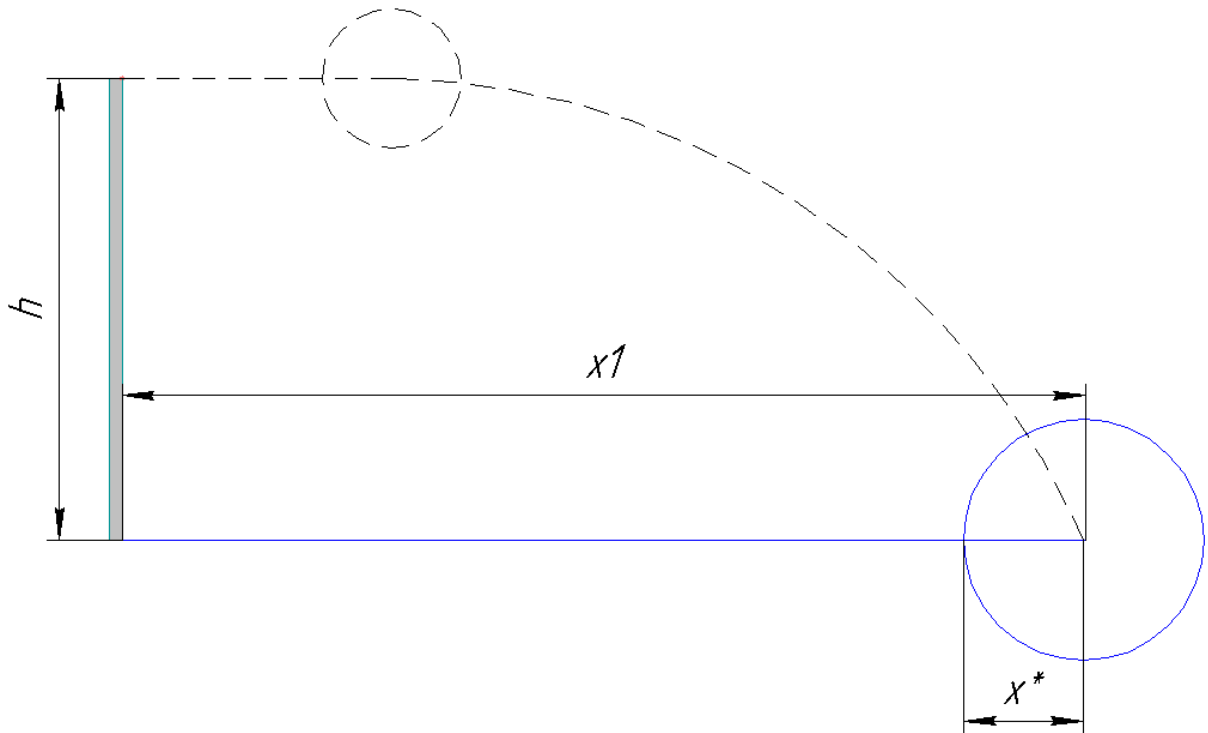


Рисунок 4.3 — Схема руху хмари домішок

Швидкість осадження частинок дорівнює:

$$V_{\text{осадження}} = \frac{h}{t_{\text{осадження}}}, \quad (4.1)$$

де h — висота джерела шкідливих домішок,

$t_{\text{осадження}}$ — час осадження шкідливих домішок:

$$t_{\text{осадження}} = \frac{x_1}{V_{\text{ветра, ср.}}}, \quad (4.2)$$

де x_1 — довжина зони здійснення впливу шкідливих домішок,

$V_{\text{ветра, ср.}}$ — середня швидкість вітру в даній зоні, $V_{\text{ветра, ср.}} = 3,92 \text{ м/с}$.

$$x_1 = 121,52 \text{ м}.$$

$$t_{\text{осаждения}} = \frac{121,52}{3,92} = 31 \text{ с}.$$

$$V_{\text{осаждения}} = \frac{15,68}{31} = 0,506 \text{ м/с}.$$

Встановимо співвідношення швидкості адвекції і числа циклів розрахунку. Для цього визначимо коефіцієнт масштабування для обліку гравітаційного осадження:

$$K_{\text{грав.}} = \frac{V_{\text{осаждения}}}{V_{\text{ветра, ср.}}}, \quad (4.3)$$

$$K_{\text{грав.}} = \frac{0,506}{3,92} = 0,129.$$

4.3 Визначення коефіцієнта масштабування для дифузійного розсіювання

Визначимо швидкість дифузійного розсіювання:

$$V_{\text{диф. рас.}} = \frac{x^*}{t_{\text{осаждения}}}, \quad (4.4)$$

де x^* — відстань до точки, в якій концентрація шкідливих домішок максимальна, зони здійснення впливу шкідливих домішок,

$$x^* = 121,52 - 23,52 = 98 \text{ м}.$$

$$V_{\text{диф. рас.}} = \frac{98}{31} = 3,161 \text{ м/с}.$$

Визначимо коефіцієнт масштабування для обліку дифузійного розсіювання:

$$K_{\text{диф. рас.}} = \frac{V_{\text{диф. рас.}}}{V_{\text{ветра, ср.}}}, \quad (4.5)$$

$$K_{\text{диф. рас.}} = \frac{3,161}{3,92} = 0,806.$$

Таким чином, можна зробити висновок, щоб встановити відповідність між розрахунками адвекції, дифузійного розсіювання і гравітаційного осадження необхідно зробити розрахунок для вітру 7 разів,

для дифузійного розсіювання - 5 разів, для гравітаційного осадження - 1 раз.

ВИСНОВКИ

Моделі, яка точно описує поведінку змінних недостатньо. Майже будь-яку довільну модель, що містить достатню кількість регульованих параметрів, можна побудувати так, щоб вона відповідала певним явищам, що спостерігалися на практиці. Будь-яка модель природних процесів повинна бути здатною до відображення не тільки тих явищ, що вже відбувались, але й таких, які ще не мали прецедентів (викликаних новими зовнішніми впливами). Тільки в цьому випадку модель буде дійсно корисною. Якщо модель правильно відображає причинно-наслідкові зв'язки, вона може правильно описати поведінку системи в цих якісно нових умовах.

Певна невизначеність щодо правильності опису реакції системи на нові умови буде існувати завжди. У загальну картину поведінки можна вписати цілі нові механізми: виключені з вихідної моделі елементи можуть несподівано виявитися істотними. Однак це неминуче незалежно від обраної форми аналізу. Якщо модель має логічну структуру причинно-наслідкових зв'язків, то в неї легко можна включити нові деталі, як тільки вони будуть виявлені. Це є важливою обставиною, що робить процедуру моделювання частиною повного адаптивного процесу.

Після внесення будь-яких змін в модель, наприклад додавання нового фактора, її необхідно досліджувати на чутливість до зміни цього фактора, тобто досліджувати, наскільки модель реагує на найменші зміни фактора і на стійкість до великих його змін тобто визначити межі застосовності моделі.

Представлена в роботі стохастична модель відповідає цим критеріям, що було показано на поетапному включенні в неї різних елементів впливу на розсіювання забруднювача – елементи рельєфу, гравітація, вітер тощо.

Перевірка якісної моделі показала її адекватну поведінку при включенні перелічених зовнішніх факторів.

На жаль обмежений час унеможливив повний перехід до кількісного моделювання, але в роботі показано, що це цей процес здійснити можна.

Запропонована модель може бути використана для широкого спектру задач — як для попереднього аналізу задач розсіювання на місцевості, які можуть бути виконані сучасними програмними продуктами, так і для вирішення принципово нових задач, які містять фактори, що не включені до існуючих моделей і програмних засобів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Гулякин В.Б., Полулях С.Н. Компьютерное моделирование в экологии: Учеб. пособие. Под ред. д. ф.-м. н., проф. Бержанского В.Н. – Симферополь: Таврический экологический институт, 1999. – 30 с.
2. Математические модели в экологии. Ч. 2 / В. В. Брук, И. Н. Берешко — Учеб. пособие. — Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. — 68 с.
3. Тимошенко В.А., Лиманский А.В. Технология решения на ЭВМ задач газовой динамики. – Киев: Наук. думка, 1981. –232 с.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1970. – 904 с.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. – Т.6. Гидродинамика. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. –736 с.
6. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. – М.: Наука, 1984. – 520с.
7. Шенг Дж. С. Обзор численных методов решения уравнений Навье-Стокса для течений сжимаемого газа // Аэрокосмическая техника. – 1986.– №2. – С.65-92.
8. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2-х т. – М.: Мир, 1990. – 726 с.
9. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х т. М.: Мир, 1991. – 1054 с.
10. Белоцерковский О.М., Андрущенко С.А., Шевелев Ю.Д. Динамика пространственных вихревых течений в неоднородной атмосфере. Вычислительный эксперимент. – М.: Янус–К, 2000. – 456 с.

11. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов, А.Н. Крайко, Г.П. Прокопов. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1976. – 400 с.

ДОДАТОК А

Алгоритм розрахунку тривимірної моделі

1. Процедура нормування:

```

procedure normalize;
var i,j,u:integer;    {описание переменных}
    k,s:extended;
begin
    s:=0;
    for i:=0 to High(GlobalArray) do begin
        for j:=0 to High(GlobalArray[i]) do begin
            for u:=0 to High(GlobalArray[i,j]) do begin
                s:=s+GlobalArray[i,j,u]; {вычисляем суммарную массу примеси во
всем районе моделирования}
            end;
        end;
    end;
    k:=sss/s;    {вычисляем отношение суммарной массы к массе выброса}
    for i:=0 to High(GlobalArray) do begin
        for j:=0 to High(GlobalArray[i]) do begin
            for u:=0 to High(GlobalArray[i,j]) do begin
                GlobalArray[i,j,u]:=GlobalArray[i,j,u]*k; {умножаем массу в каждой
ячейке на коэффициент}
            end;
        end;
    end;
end.

```

2. Процедура розрахунку кількості будівель навколо даної осередки

```

procedure kolzdaniy;
var
  i,j,b,u:integer;  {описание переменных}
begin
  for i:=1 to High(GlobalArray)-1 do begin
    for j:=1 to High(GlobalArray[i])-1 do begin
      for u:=1 to High(GlobalArray[i,j])-1 do begin
        b:=0;
        if gglobal[i,j,u]<>-1 then {проверка рассматриваемой ячейки и соседних
с ней на наличие в них здания}
          begin
            if gglobal[i-1,j,u]<>-1 then b:=b+1;
            if gglobal[i-1,j-1,u]<>-1 then b:=b+1;
            if gglobal[i-1,j+1,u]<>-1 then b:=b+1;
            if gglobal[i,j-1,u]<>-1 then b:=b+1;
            if gglobal[i,j+1,u]<>-1 then b:=b+1;
            if gglobal[i+1,j,u]<>-1 then b:=b+1;
            if gglobal[i+1,j-1,u]<>-1 then b:=b+1;
            if gglobal[i+1,j+1,u]<>-1 then b:=b+1;
            if gglobal[i-1,j,u+1]<>-1 then b:=b+1;
            if gglobal[i-1,j-1,u+1]<>-1 then b:=b+1;
            if gglobal[i-1,j+1,u+1]<>-1 then b:=b+1;
            if gglobal[i,j-1,u+1]<>-1 then b:=b+1;
            if gglobal[i,j+1,u+1]<>-1 then b:=b+1;
            if gglobal[i+1,j,u+1]<>-1 then b:=b+1;
            if gglobal[i+1,j-1,u+1]<>-1 then b:=b+1;
          end
        end
      end
    end
  end
end

```

```

if gglobal[i+1,j+1,u+1]<>-1 then b:=b+1;
if gglobal[i-1,j,u-1]<>-1 then b:=b+1;
if gglobal[i-1,j-1,u-1]<>-1 then b:=b+1;
if gglobal[i-1,j+1,u-1]<>-1 then b:=b+1;
if gglobal[i,j-1,u-1]<>-1 then b:=b+1;
if gglobal[i,j+1,u-1]<>-1 then b:=b+1;
if gglobal[i+1,j,u-1]<>-1 then b:=b+1;
if gglobal[i+1,j-1,u-1]<>-1 then b:=b+1;
if gglobal[i+1,j+1,u-1]<>-1 then b:=b+1;
if gglobal[i,j,u+1]<>-1 then b:=b+1;
if gglobal[i,j,u-1]<>-1 then b:=b+1;
end;
DomaArray[i,j,u]:=b;
end;
end;
end;
end;
end;

```

3. Процедура розрахунку дифузійного розсіювання

```

procedure difrasseivanie;
var m:MyArray;          {описание переменных}
    i,j,u:integer;
begin
setlength(m,length(GlobalArray),length(GlobalArray[1]),length(GlobalArray[1,
1]));
for i:=1 to High(GlobalArray) do begin
for j:=1 to High(GlobalArray[i]) do begin
for u:=1 to High(GlobalArray[i,j]) do begin

```

```

    m[i,j,u]:=0;
  end;
end;
end;
for i:=1 to High(GlobalArray) do begin
  for j:=1 to High(GlobalArray[i]) do begin
    for u:=1 to High(GlobalArray[i,j]) do begin
      if DomaArray[i,j,u]=0 then m[i,j,u]:=0 else begin
        if DomaArray[i+1,j,u]<>0 then
m[i+1,j,u]:=m[i+1,j,u]+GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);
          if DomaArray[i+1,j-1,u]<>0 then m[i+1,j-1,u]:=m[i+1,j-1,u]+
GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);
            if DomaArray[i+1,j+1,u]<>0 then
m[i+1,j+1,u]:=m[i+1,j+1,u]+GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);
              if DomaArray[i,j+1,u]<>0 then
m[i,j+1,u]:=m[i,j+1,u]+GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);
                if DomaArray[i,j-1,u]<>0 then m[i,j-1,u]:=m[i,j-1,u]+GlobalArray[i,j,u]
/(DomaArray[i,j,u]+1);
                  if DomaArray[i-1,j+1,u]<>0 then m[i-1,j+1,u]:=m[i-1,j+1,u]+
GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);
                    if DomaArray[i-1,j-1,u]<>0 then m[i-1,j-1,u]:=m[i-1,j-1,u]+
GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);
                      if DomaArray[i-1,j,u]<>0 then m[i-1,j,u]:=m[i-1,j,u]+
GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);
                        if DomaArray[i+1,j,u+1]<>0 then m[i+1,j,u+1]:=m[i+1,j,u+1]+
GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);
                          if DomaArray[i+1,j-1,u+1]<>0 then m[i+1,j-1,u+1]:=m[i+1,j-1,u+1]+
GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);

```

```

    if DomaArray[i+1,j+1,u+1]<>0 then m[i+1,j+1,u+1]:=m[i+1,j+1,u+1]+
GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);
    if DomaArray[i,j+1,u+1]<>0 then m[i,j+1,u+1]:=m[i,j+1,u+1]+
GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);
    if DomaArray[i,j-1,u+1]<>0 then m[i,j-1,u+1]:=m[i,j-1,u+1]+
GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);
    if DomaArray[i-1,j+1,u+1]<>0 then m[i-1,j+1,u+1]:=m[i-1,j+1,u+1]+
GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);
    if DomaArray[i-1,j-1,u+1]<>0 then m[i-1,j-1,u+1]:=m[i-1,j-1,u+1]+
GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);
    if DomaArray[i-1,j,u+1]<>0 then m[i-1,j,u+1]:=m[i-1,j,u+1]+
GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);
    if DomaArray[i+1,j,u-1]<>0 then m[i+1,j,u-1]:=m[i+1,j,u-1]+
GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);
    if DomaArray[i+1,j-1,u-1]<>0 then m[i+1,j-1,u-1]:=m[i+1,j-1,u-
1]+GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);
    if DomaArray[i+1,j+1,u-1]<>0 then m[i+1,j+1,u-1]:=m[i+1,j+1,u-1]+
GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);
    if DomaArray[i,j+1,u-1]<>0 then m[i,j+1,u-1]:=m[i,j+1,u-1]+
GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);
    if DomaArray[i,j-1,u-1]<>0 then m[i,j-1,u-1]:=m[i,j-1,u-1]+
GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);
    if DomaArray[i-1,j+1,u-1]<>0 then m[i-1,j+1,u-1]:=m[i-1,j+1,u-1]+
GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);
    if DomaArray[i-1,j-1,u-1]<>0 then m[i-1,j-1,u-1]:=m[i-1,j-1,u-1]+
GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);
    if DomaArray[i-1,j,u-1]<>0 then m[i-1,j,u-1]:=m[i-1,j,u-1]+
GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);

```



```

        if      DomaArray[i,j,u+1]<>0      then      m[i,j,u+1]:=m[i,j,u+1]+
GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);
        if      DomaArray[i,j,u-1]<>0      then      m[i,j,u-1]:=m[i,j,u-1]+
GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);
        m[i,j,u]:=m[i,j,u]+GlobalArray[i,j,u]/(DomaArray[i,j,u]+1);
        end;
        end;
        end;
        end;

```

```

for i:=1 to High(GlobalArray) do begin
  for j:=1 to High(GlobalArray[i]) do begin
    for u:=1 to High(GlobalArray[i,j]) do begin
      GlobalArray[i,j,u]:=m[i,j,u];
    end;
  end;
end;
end;
end;

```

4. Процедура розрахунку обліку вітру

```

procedure veter;
var NewArray:MyArray;      {описание переменных}
    i,j,u:integer;
begin
  SetLength(NewArray,Length(GlobalArray),Length(GlobalArray[1]),Length(Glo
balArray[1,1]));
  for i:=0 to High(GlobalArray) do begin
    for j:=0 to High(GlobalArray[i]) do begin

```

```

    for u:=1 to High(GlobalArray[i,j]) do begin
      NewArray[i,j,u]:=GlobalArray[i,j,u];
      GlobalArray[i,j,u]:=0;
    end;
  end;
end;
for i:=1 to High(GlobalArray)-1 do begin
  for j:=1 to High(GlobalArray[i])-1 do begin
    for u:=1 to High(GlobalArray[i,j])-1 do begin
      GlobalArray[i,j,u]:=GlobalArray[i,j,u]+NewArray[i-
    NapravlenieGlobal[i,j,u].vx,j-NapravlenieGlobal[i,j,u].vy,u]; {каждый шаг по
    ветру сдвигаем массу примеси на количество ячеек, равное скорости ветра,
    по его направлению}
    end;
  end;
end;
end;
end;

```

5. Процедура розрахунку обліку гравітації

```

  procedure gravitacija;
var NewArray:MyArray;      {описание переменных}
  i,j,u:integer;
begin
  SetLength(NewArray,Length(GlobalArray),Length(GlobalArray[1]),Length(Glo
  balArray[1,1]));
  for i:=0 to High(GlobalArray) do begin
    for j:=0 to High(GlobalArray[i]) do begin
      for u:=High(GlobalArray[i,j]) to 1 do begin

```

```

    NewArray[i,j,u]:=GlobalArray[i,j,u];
    GlobalArray[i,j,u]:=0;
  end;
end;
end;
for i:=1 to High(GlobalArray)-1 do begin
  for j:=1 to High(GlobalArray[i])-1 do begin
    for u:=1 to High(GlobalArray[i,j])-1 do begin
      if DomaArray[i,j,u]<>0 then
        if DomaArray[i,j,u-1]=0 then GlobalArray[i,j,u-1]:=0 else
          GlobalArray[i,j,u-1]:=GlobalArray[i,j,u-1]+GlobalArray[i,j,u]      else
GlobalArray[i,j,u]:=0;      {каждый шаг по гравитации сдвигаем массу
примеси на ячейку вниз}
        end;
      end;
    end;
  end;
end;
end;

```

6. Процедура розрахунку для моделі

```

procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
var step,i,j,u,n,y,stepmax,nnn,nnnn:integer; {описание переменных}
    a,b,c,d,e,g,f:integer;
    fff,ffff,pf:textfile;
    ShagovPoGausu,ShagovPoVetru,ShagovPoGrav,o,p,nvert:integer;
begin
  n:=110;      {размер сетки ячеек}
  nvert:=10;
  i0:=5;

```

```

j0:=15;
itruba:=i0;    {координаты источника вредных примесей}
jtruba:=j0;
u0:=5;
utruba:=u0;
stepmax:=50;  {количество шагов}

```

{присвоение элементам исходного массива значения 0}

```

SetLength(gglobal,n,n,nvert);
for i:=0 to n-1 do begin
  for j:=0 to n-1 do begin
    for u:=0 to nvert-1 do begin
      gglobal[i,j,u]:=0;
    end;
  end;
end;
end;

```

{процедура чтения файла, в котором находится информация о местоположении зданий}

```

assignfile(fff,'книга1.prn');
reset(fff);
repeat
  readln(fff,a,b);
  gglobal[b,a,2]:=-1;
  gglobal[b,a,3]:=-1;
  gglobal[b,a,4]:=-1;
  gglobal[b,a,5]:=-1;
until eof(fff);
closefile(fff);

```

```

for i:=1 to n-1 do begin
  for j:=1 to n-1 do begin
    gglobal[i,j,1]:=-1;
  end;
end;

      {задавание направления ветра}
SetLength(NapravlenieGlobal,n,n,nvert);
for i:=0 to n-1 do begin
  for j:=0 to n-1 do begin
    for u:=0 to nvert-1 do begin
      if gglobal[i,j,u]=-1 then begin
        NapravlenieGlobal[i,j,u].vx:=0;
        NapravlenieGlobal[i,j,u].vy:=0;
      end
      else begin
        NapravlenieGlobal[i,j,u].vx:=1;
        NapravlenieGlobal[i,j,u].vy:=0;
      end;
    end;
  end;
end;
end;
end;

```

{процедура чтения файла, в котором находится информация об изменении направления ветра около зданий}

```

assignfile(fff,'книга2.prn');
reset(fff);
repeat
  readln(fff,c,d,e,f);

```

```

    NapravlenieGlobal[d,c,2].vy:=e;
    NapravlenieGlobal[d,c,2].vx:=f;
until eof(fff);
closefile(fff);
for i:=1 to n-1 do begin
    for j:=1 to n-1 do begin
        for u:=3 to 4 do begin
            NapravlenieGlobal[i,j,u].vy:=NapravlenieGlobal[i,j,2].vy;
            NapravlenieGlobal[i,j,u].vx:=NapravlenieGlobal[i,j,2].vx;
        end;
    end;
end;
end;
end;

```

{присвоение элементам исходного массива для подсчета домов около рассматриваемой ячейки значения 0}

```

SetLength(DomaArray,n,n,nvert);
for i:=0 to n-1 do begin
    for j:=0 to n-1 do begin
        for u:=0 to nvert-1 do begin
            DomaArray[i,j,u]:=0;
        end;
    end;
end;
end;

```

```

SetLength(GlobalArray,n,n,nvert);

```

kolzdaniy; {расчет количества зданий вокруг рассматриваемой ячейки}

```

for i:=0 to n-1 do begin
  for j:=0 to n-1 do begin
    for u:=0 to nvert-1 do begin
      GlobalArray[i,j,u]:=0;
    end;
  end;
end;

```

sss:=1; {начальная концентрация выбросов (увеличивается на каждом шаге на 1)}

```

GlobalArray[i0,j0,u0]:=1;      {концентрация в источнике}
{отображение распределения вредных примесей}
Form1.PaintBox1Paint(application);
ShowMessage('0000');
ShagovPoGausu:=5;
ShagovPoVetru:=7;
ShagovPoGrav:=1;
for step:=0 to stepmax do begin;
  for p:=1 to ShagovPoVetru do begin
    veter;    {расчет учета ветра}
  end;
  for y:=1 to ShagovPoGrav do begin
    gravitacija; {расчет учета гравитационного осаждения}
  end;
  for o:=1 to ShagovPoGausu do begin
    difrasseivanie;    {расчет диффузионного рассеивания}
  end;
  normalize;    {нормировка}
  sss:=sss+1;

```

```
if step <> stepmax then GlobalArray[i0,j0,u0]:=1; {концентрация в  
источнике}
```

```
end.
```