

## АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ В АТМОСФЕРНОМУ ПОВІТРІ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН, ЩО МІСТЯТЬСЯ У ВИКИДАХ СТАЦІОНАРНИХ ДЖЕРЕЛ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ НАФТОГАЗОВОГО КОМПЛЕКСУ

О.М. Бортняк, М.П. Школьний, М.М. Осипчук

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (0342) 993338;  
e-mail: public@nuing.edu.ua

*Проведено експериментальні дослідження розсіювання продуктів згоряння вуглеводневого палива в атмосферному повітрі, на основі яких визначено закономірності впливу метеорологічних умов навколишнього середовища на процеси розповсюдження димових газів. Встановлено співвідношення між величинами коефіцієнтів дифузії у поздовжньому, вертикальному та поперечному напрямках поширення димової хмари.*

*Розроблено математичну модель забруднення приземного шару атмосферного повітря викидами димових газів від точкових джерел виробничих об'єктів промислових підприємств нафтогазового комплексу. Аналітична модель дає змогу врахувати фізичні властивості забруднюючих речовин, геометричні та режимні параметри джерела викиду, а також метеорологічні умови в районі розташування промислового об'єкта. Запропоновано методику визначення розподілу концентрацій шкідливих речовин у просторово-часовому полі ареалу поширення димової хмари. Методика зручна у реалізації та дає змогу оперативно оцінити рівень техногенного забруднення навколишнього середовища як на етапі проектування нових, так і під час експлуатації існуючих виробничих об'єктів, з метою подальшого удосконалення технологічних процесів та підвищення рівня екологізації промислових підприємств.*

**Ключові слова:** забруднення довкілля, продукти згоряння, вуглеводневі гази, викиди стаціонарних джерел, розсіювання димових газів

*Проведены экспериментальные исследования рассеивания продуктов сгорания углеводородного топлива в атмосферном воздухе, по результатам которых определены закономерности влияния метеорологических условий окружающей среды на процессы распространения дымовых газов. Установлены соотношения между величинами коэффициентов диффузии в продольном, поперечном и вертикальном направлениях распространения дымового облака.*

*Разработана математическая модель загрязнения приземного слоя атмосферного воздуха выбросами дымовых газов от точечных источников производственных объектов промышленных предприятий нефтегазового комплекса. Аналитическая модель позволяет учитывать физические свойства загрязняющих веществ, геометрические и режимные параметры источников, а также метеорологические условия в районе размещения промышленного объекта. Предложена методика определения распределения концентраций вредных веществ в пространственно-временном поле ареала распространения дымового облака. За счет удобной реализации указанная методика позволяет оперативно оценить уровень техногенного загрязнения окружающей среды как на этапе проектирования новых, так и при эксплуатации существующих производственных объектов с целью последующего усовершенствования технологических процессов и повышения уровня экологизации промышленных предприятий.*

**Ключевые слова:** загрязнение окружающей среды, продукты сгорания, углеводородные газы, выбросы стационарных источников, рассеивание дымовых газов

*The experimental study of products dispersion spread of hydrocarbon fuels in the atmosphere is made. On their basis certain patterns of meteorological influence conditions of the environment on the flue gases are determined. Correlations between the values of diffusion coefficients in the longitudinal, vertical and transverse directions of smoke clouds emission are presented.*

*The mathematical model of the surface air pollution by flue gases emissions from point sources of oil and gas industrial facilities is presented. The analytical model allows to take into account the physical properties of the pollutants, geometric and regime parameters of emission sources and meteorological conditions in the area of the industrial facility.*

*The offered method of distribution determination of harmful substances concentrations in the space-time range of flue gas spreading is convenient for the quick assessment of the technogenic pollution level of the environment during the design phase of the new enterprises and during the operation of existing ones in order to improve production processes and increase the level of ecological safety of industrial enterprises.*

**Keywords:** environmental pollution, waste products, hydrocarbon gases, emissions from stationary sources, dispersion of flue gases

Проблеми забруднення навколишнього середовища викидами промислових підприємств, зважаючи на масштаби та негативні наслідки впливу техногенного навантаження на довкілля, набувають дедалі більш гострого та глобального характеру. Рівень технологій та сучас-

ний стан основних виробничих фондів багатьох підприємств вітчизняної промисловості не відповідають вимогам екологізації виробництва. Нераціональне використання природних ресурсів, дефіцит коштів на переозброєння технологічного обладнання і впровадження прогресив-

них екологічно безпечних технологій призводять до загострення екологічної кризи.

Об'єкти нафтогазової галузі несуть потенційну небезпеку для навколишнього середовища, зокрема з точки зору можливого забруднення повітряного басейну розміщених поблизу них територій. Більшість виробництв нафтогазової промисловості під час проведення технологічних операцій передбачають утилізацію некондиційних газів шляхом їх спалювання на факельних установках, що дає змогу попередити безпосереднє надходження токсичних і горючих газоподібних вуглеводнів в атмосферне повітря робочої зони та виконати вимоги щодо дотримання норм пожежовибухобезпеки виробничих процесів. Однак, попри відносну простоту конструкції факельних установок їх експлуатація не виключає ризику виникнення аварій. Крім того, в результаті спалювання некондиційних газів на факельних пристроях в атмосферне повітря надходять значні обсяги шкідливих речовин, що містяться в продуктах згорання вуглеводневого палива, зокрема оксиди вуглецю та азоту, а у випадку неможливості організації ефективного згорання ще й метан та сажа. Суттєві концентрації даних речовин фіксуються на віддалі 1-3 км, а деякі розповсюджуються і на значно більші віддалі від джерела забруднення. Це призводить до підвищення рівня захворюваності населення раком дихальної системи, ураження шлунково-кишкового тракту, нервової системи, зору.

Найбільш несприятливому впливу шкідливих чинників підпадає населення, яке мешкає в межах санітарно-захисних зон виробничих об'єктів та поблизу них. На території України функціонує ряд промислових підприємств, від яких не витримана нормативна санітарно-захисна зона до житлової забудови. В зв'язку з цим виникає необхідність у виявленні характеру розповсюдження забруднюючих речовин в атмосферному повітрі, визначення розподілу концентрацій в просторово-часовому вимірі з метою оцінки їх впливу на людину та середовище, що її оточує, в районі розташування джерел викиду та можливості правильного вибору, доцільності застосування та ефективності використання необхідних природоохоронних заходів, спрямованих на зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище та покращення екологічної ситуації в країні.

Питання розповсюдження домішок в атмосфері є однією з прикладних задач теорії атмосферної дифузії. Розсіювання викидів в атмосфері є складним процесом, що залежить від багатьох взаємопов'язаних чинників: фізико-хімічних властивостей забруднюючих речовин викиду, типу джерела забруднення, метеорологічних умов, характеристики місцевості та ін. На сьогоднішній день запропоновано значну кількість аналітичних методів розрахунку, що пов'язують розсіювання викидів з окремими із вище згаданих чинників, проте жоден з цих методів не враховує їх загального впливу.

Серед усієї множини існуючих моделей можна виділити три основні підходи для кількі-

сного опису процесів розсіювання викидів газоподібних речовин в атмосфері:

1) гауссівські моделі розсіювання (або так звані дисперсні моделі);

2) моделі розсіювання, які базуються на інтегральних законах збереження у хмарі загалом (залповий викид) або у поперечному перерізі хмари (тривалий викид) (інколи такі моделі називають моделями із зосередженими параметрами);

3) моделі, побудовані на чисельному розв'язанні системи рівнянь збереження їх в оригінальному вигляді, так звані моделі чи методи прямого чисельного моделювання.

Існуючі моделі розрахунку рівнів концентрації на основі законів фізики і хімії з врахуванням атмосферної дифузії в навколишньому середовищі дозволяють прогнозувати концентрації речовин і розробити повноцінну методику оцінки забруднення атмосферного повітря у будь-якій точці досліджуваного простору. Водночас, коректність і точність розрахунків залежить від двох основних аспектів: якості вихідної інформації і правильності вибраної моделі. Цінними вважаються моделі, що найбільш точно відображають суть явища дифузії шкідливих речовин в атмосферному повітрі та як найповніше враховують всі чинники, що можуть впливати на розповсюдження забруднень.

На сьогоднішній день у світовій практиці існує достатньо велика кількість моделей, які достатньо адекватно описують процеси розсіювання шкідливих домішок в атмосферному повітрі. Серед закордонних розробок, які дозволяють провести розрахунок розсіювання забруднюючих речовин від промислових джерел, слід виділити [1-5]:

– AERMOD AERMIC (American Meteorological Society (AMS)/United States Environmental Protection Agency (EPA), яка включає модулі розрахунку розсіювання забруднюючих речовин від стаціонарних промислових джерел на віддалі до 50 км, метеорологічний підпроцесор AERMET та модуль рельєфу AERMAP;

– GASTAR (Великобританія) – спеціалізована модель для розрахунку аварійних викидів токсичних та вогненебезпечних газів, важчих за повітря. Можливий розрахунок миттєвих та тривалих викидів;

– ADMS-Screen (Великобританія) – модель для швидкої попередньої оцінки якості повітря в районі розташування димових труб. Дана модель є комбінацією алгоритмів моделі ADMS зі зручним інтерфейсом, що вимагає введення мінімальної кількості даних. За допомогою даної моделі встановлюють необхідність проведення подальших розрахунків розсіювання;

– ONM9440 (Австрія) – гауссівська модель для розрахунку тривалих викидів тільки від стаціонарних джерел;

– GRAL (Австрія) – модель Лагранжа, яка дозволяє розраховувати дисперсію від точкових та лінійних джерел;

– SEVEX (Бельгія) – спеціалізована модель для розрахунку аварійних викидів токсичних і займистих речовин від димових труб або випа-

ровування рідини. Назва моделі походить від назви міста Seveso, у якому в 1976 р. відбувся аварійний викид дуже токсичних газів;

– PLUME (Institute of Geophysics Bulgariann Academy of Sciences) – модель факела від джерела, яка базується на гауссівському розподілі;

– EK100W ATMOTERM Ltd (Польща) – тривимірна гаусова модель для розрахунку розсіювання від промислових та міських джерел;

– ТОКСИ (НТЦ “Промышленная безопасность”, Росія) – розрахункові методики, які дозволяють оцінити зони впливу основних чинників ураження під час аварій за участю небезпечних речовин;

– Эколог (“Интеграл”, Росія) – методика відповідає нормативній ОНД-86, призначена для визначення приземних концентрацій у дво-метровому шарі над поверхнею землі та вертикального розподілу концентрацій для стаціонарних джерел та ін.

Узагальнюючи наведені характеристики існуючих моделей, що використовуються у світовій практиці для розрахунку процесів розсіювання, можна сказати, що найбільш поширеними є чисельні тривимірні гідродинамічні моделі, на другому місці за широтою використання та якістю отриманих результатів є відомі гауссівські моделі, що базуються на нормативних методиках EPA US та MAGATE, решта припадає на дво-, одновимірні та аналітичні моделі. До останніх відноситься і нормативна методика ОНД-86, яка на сьогодні використовується і в нашій країні, і є єдиним затвердженим в Україні документом, призначеним для прогнозування процесів розсіювання шкідливих речовин в атмосфері. ОНД-86. “Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий”, розроблена науковими співробітниками Головної геофізичної обсерваторії ім. А.І. Войкова у 1986 році. Ступінь небезпеки забруднення приземного шару атмосферного повітря викидами шкідливих речовин, відповідно до цієї методики, визначається за найбільшою розрахованою величиною приземної концентрації шкідливих речовин -  $C_{max}$  (мг/м<sup>3</sup>), яка може встановлюватися на деякій відстані від місця викиду, і відповідає найбільш несприятливим метеорологічним умовам. Величина максимальної концентрації шкідливих речовин -  $C_{max}$ , згідно з базовою залежністю даної методики, пропорційна масі шкідливих речовин, що викидаються в одиницю часу, і обернено пропорційна квадрату підвищення точки викиду над земною поверхнею. Загалом модель, покладена в основу нормативної методики, реалізує ті ж базові принципи моделювання процесів розсіювання, що і гауссівські моделі, однак, її використання має певні складності під час створення єдиних підходів до даних питань в рамках європейських та світових стандартів. Крім того, високий рівень узагальнення робить методику універсальною, що не дозволяє врахувати цілий ряд спеціальних процесів, які виникають під час розсіювання викидів шкідливих речовин в атмосфері. Достатньо наближено

проводиться врахування регіонально залежних метеорологічних та фізичних характеристик атмосфери, а також фізико-хімічних властивостей забруднюючих речовин.

Аналіз закордонних методик та моделей розсіювання забруднюючих речовин від промислових джерел дає можливість зробити висновки щодо їх вузького спрямування, тобто можливості використання для вирішення лише вузького класу задач, орієнтації на розрахунок розповсюдження конкретних забруднюючих речовин чи врахування умов, властивих тільки для конкретного технологічного процесу, підприємства чи галузі. Достовірність та якість результатів, отриманих у разі використання таких методик, доводить доцільність розроблення моделей, які б найбільш точно відображали розсіювання шкідливих домішок в атмосферному повітрі, були порівняно простими і дозволяли врахувати максимальну кількість чинників, що можуть чинити вплив на перебіг даного процесу.

Існуючі на сьогоднішній день в Україні програмні продукти для розрахунку розсіювання шкідливих речовин в приземному шарі атмосферного повітря, погоджені Міністерством охорони навколишнього природного середовища України, зокрема такі системи як ЕОЛ та їх модифікації, побудовані на основі методики ОНД-86, мають суттєві обмеження, реалізуються у вигляді складних програмних комплексів, які вимагають висококваліфікованих спеціалістів і потребують суттєвих затрат часу для розрахунку навіть одного варіанту.

Огляд вітчизняних літературних джерел показав, що проблеми моделювання розсіювання забруднюючих речовин в атмосферному повітрі залишаються достатньо актуальними для нашої країни. Враховуючи, що точність результатів розрахунку концентрацій токсичних домішок у випадку постійного чи аварійного викиду суттєво впливає на правильність вибору, можливість застосування та ефективність використання необхідних природоохоронних заходів, спрямованих на зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище та покращення екологічної ситуації в країні, існує необхідність у подальшій роботі над розробленням нових та удосконаленням існуючих методів моделювання процесів розповсюдження забруднень в атмосферному повітрі.

Атмосферна дифузія є складним і багатифакторним процесом. Розповсюдження домішок в атмосферному повітрі характеризуються двома видами дифузії: молекулярною, пов'язаною з випадковим і хаотичним рухом молекул, та турбулентною, обумовленою вихровим полем атмосфери. Розв'язанням питань атмосферної дифузії займалося багато вітчизняних та закордонних вчених, визначна роль серед яких належить Колмогорову А.Н., Обухову А.М., Берлянду М.Е., Лайхтману Д.Л., Бизовій Н.Л., Андрєєву П.І., Сигалу І.Я., Ельтерману В.М., Тейлору Г.І., Шмідту В., Сеттону О.Г., Пасквіллу Ф. та ін. [6-15].

Враховуючи досвід використання існуючих методик розрахунку розсіювання шкідливих речовин в атмосферному повітрі, авторами запропонована нова модель дисипації димових газів. В основу розробленої моделі покладено стохастичні рівняння, застосування яких дозволяє врахувати фактор випадковості під час опису процесів переносу і дифузії домішок в атмосфері. Для чисельного представлення процесів переносу та дифузії домішок в атмосферному повітрі використовуються розв'язки рівнянь турбулентної дифузії, які є узагальненням відомого рівняння Фіка і передбачають необхідність адекватної визначеності так званих коефіцієнтів турбулентної дифузії, точність встановлення яких суттєво впливає на математичну модель розсіювання шкідливих домішок у повітрі, а, отже, і задовільність оцінки техногенного забруднення навколишнього середовища. З цієї метою були проведені експериментальні дослідження за результатами отримано функціональні залежності для встановлення зазначених вище коефіцієнтів.

На основі аналізу отриманих експериментальних даних були встановлені співвідношення між коефіцієнтами вертикальної, поздовжньої та горизонтальної дифузії, які не залежно від режимних параметрів джерела та метеорологічних умов з похибкою до 1% набували значень

$$D_y = 0,7D_x, \quad (1)$$

$$D_z = 1,1D_x. \quad (2)$$

Отримані результати узгоджуються з даними, отриманими в роботі [16].

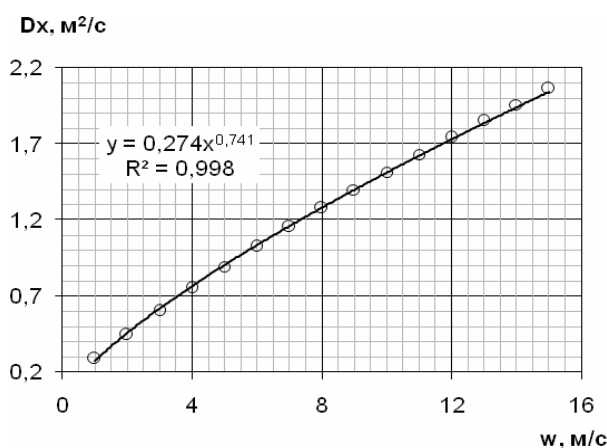
Таким чином, за необхідності з метою отримання картини розсіювання шкідливих домішок в атмосферному повітрі значень коефіцієнтів турбулентної дифузії у різних напрямках розповсюдження викиду, доцільно і цілком достатньо визначити величину коефіцієнта змішування відповідної речовини у поздовжньому напрямі і, використовуючи залежності (1), (2), встановити значення коефіцієнтів дифузії у вертикальному та горизонтальному напрямі.

Наведена методика опрацювання експериментальних даних, дала змогу встановити закономірність безпосереднього впливу швидкості вітру на величину коефіцієнта турбулентної дифузії, графічна інтерпретація якої наведена на рисунку 1.

Апроксимація графічної залежності 1 з достатньою точністю дозволяє встановити математичну модель для визначення коефіцієнта турбулентної дифузії у поздовжньому напрямі поширення димової хмари в залежності від вітрової активності атмосферного повітря у вигляді

$$D_x = 0,274w^{0,741}. \quad (3)$$

Отримані на основі експериментальних досліджень співвідношення (1), (2) дозволяють визначити величини коефіцієнтів турбулентної дифузії у вертикальному та поперечному напрямках розсіювання забруднюючих речовин.



**Рисунок 1 – Графічна інтерпретація залежності коефіцієнта турбулентної дифузії димових газів від швидкості вітру у напрямку розповсюдження хмари викиду**

Аналогічні дослідження були проведені для визначення закономірності впливу швидкості вітру на величину коефіцієнта дифузії сажі, що є також неодмінним компонентом продуктів нерегульованого спалювання газоподібних вуглеводнів. Математична залежність такої закономірності відображається формулою

$$D_x = 0,134w^{0,760}. \quad (4)$$

Аналіз кривої (рис. 1) вказує на те, що зі зростанням вітрової активності атмосферного повітря величина коефіцієнта турбулентної дифузії як у поздовжньому, так і з врахуванням співвідношень (1)-(2) у вертикальному та поперечному напрямках поширення димової хмари збільшується за степеневою залежністю, яка є достатньо близькою до лінійної моделі. Слід зазначити, що подібна закономірність була отримана у ході проведення експериментальних досліджень визначення коефіцієнта змішування у трубопроводі великого діаметра.

Отже, величина швидкості вітру є одним з найбільш визначальних чинників, які впливають на інтенсивність дифузійних процесів димових газів та їх розсіювання в атмосферному повітрі. Збільшення швидкості вітру до певного значення (5-7 м/с за результатами досліджень) сприяє підвищенню турбулізації потоку, внаслідок чого основну роль у розсіюванні домішок відіграють дифузійні процеси змішування, що сприяє зниженню величини максимальної приземної концентрації. У разі підвищення вітрової активності до значень, які перевищують 7 м/с, вирішальним чинником у процесі розповсюдження домішок стає конвективне перенесення їх повітряними течіями. В результаті, окрім зменшення величини максимальної концентрації, зростає віддаль від джерела викиду до точки максимального забруднення приземного шару атмосферного повітря, що неодмінно слід враховувати під час визначення санітарно-захисних зон (СЗЗ) промислових підприємств.

Таким чином, отримані залежності коефіцієнтів турбулентної дифузії дозволяють вирішити питання розповсюдження димових газів в

атмосферному повітрі і розробити методику розрахунку забруднення атмосфери з врахуванням основних природних чинників та параметрів роботи джерела викиду. Подальша реалізація методики у програмному забезпеченні моделювання розсіювання шкідливих речовин дозволить здійснювати оцінку існуючого та прогнозованого стану повітряного басейну з метою дослідження низки чинників, впливаючи на які можна значно знизити техногенне навантаження на навколишнє середовище.

Загалом концентрація забруднюючих речовин, що надходять до атмосферного повітря від промислових джерел викиду, є достатньо складною функцією залежності координат, і в кожній точці простору змінюється у часі під впливом низки чинників. Дослідження закономірностей зміни величини концентрації в просторово-часовому полі на основі рівнянь, які найбільш точно відображають сутність процесів емісії та розсіювання забруднюючих речовин, в загальному випадку можливе лише з допомогою чисельних методів з подальшою реалізацією побудованого рішення з використанням сучасних комп'ютерних технологій.

Розглядаючи процеси емісії та розсіювання шкідливих домішок в контексті загальної постановки проблеми з урахуванням усіх чинників, що можуть впливати на розповсюдження димових газів в атмосферному повітрі, дослідження і кількісна оцінка забруднення атмосфери домішками різного походження є достатньо далекою від завершення. На сьогодні проведено великий обсяг робіт з метою оцінювання стану навколишнього середовища для часткових випадків, отриманих на основі певних припущень щодо джерел викиду, характеру і умов руху, коефіцієнтів рівнянь та ін.

Одним з таких часткових випадків є напівемпіричний розв'язок рівняння для точкового незатемненого джерела, запропоноване Головною геофізичною обсерваторією ім. Воейкова. Дана методика дозволяє визначити концентрації шкідливих домішок, що містяться у викидах димових труб, лінійних і площинних джерел у двометровому шарі атмосферного повітря на рівні землі, а також у вертикальному та горизонтальному перерізі димового факела на віддалі не більше 100 км від джерела. Аналіз результатів розрахунку приземних концентрацій за нормативною методикою дає підстави зробити висновок на користь існування певних ймовірнісних особливостей отриманих кількісних величин. Відомо, що розрахункові формули відображають значення того чи іншого параметра в залежності від сукупності чинників, що визначають досліджувані процеси. Відхилення фактично виміряного значення від розрахункового повинно вкладатися у межі похибки математичної моделі і вимірювань і не перевищувати 10-20 %.

Концентрації забруднюючих речовин, встановлені під час інструментальних спостережень, виявляються, як правило, значно нижчими від розрахованих за нормативною методикою для однакових метеорологічних умов та

режимних параметрів джерел викиду. При цьому результати підфакельних замірів наявних концентрацій шкідливих речовин свідчать про зміну їх величин у полі забруднення приземного шару у достатньо широких межах, при цьому, як виявляється, їх розподіл найбільш точно підпорядковується стохастичним та ймовірнісним законам.

Враховуючи складну природу атмосферної дифузії та результати проведених експериментальних досліджень і інструментальних спостережень, було побудовано математичну модель розповсюдження в атмосферному повітрі шкідливих домішок, що містяться у викидах промислових установок, призначених для спалювання некондиційних вуглеводневих газів, яка б максимально точно відображала фізичні процеси, що відбуваються під час емісії та розсіювання забруднюючих речовин.

Розповсюдження забруднюючих речовин в газових середовищах визначається двома основними процесами: конвективним перенесенням внаслідок усередненого руху середовища і дифузійним за рахунок турбулентності. Крім того, важливу роль відіграють процеси захоплення домішок краплинами вологи, що містяться у хмарах та туманах. Тому математична модель повинна правильно описувати як поле середніх швидкостей, так і характеристики турбулентної дифузії, враховуючи при цьому властивості забруднюючих речовин.

Система точних рівнянь, що описують в часі всі деталі еволюції поля швидкостей і концентрацій в практичному завданні, не може бути вирішена за допомогою сучасних обчислювальних засобів. Єдиний економічно виправданий вихід полягає в розв'язанні рівнянь усередненого руху, якими визначається розподіл усереднених за часом величин. Зазвичай тільки середні величини і мають практичний зміст. При цьому час усереднювання повинен бути багато більшим тимчасового масштабу турбулентності, але багато меншим тимчасового масштабу усередненої течії (наприклад, добового циклу в приземному шарі атмосфери). Рівняння усередненого руху містять члени, що описують турбулентне перенесення. Для замикання системи рівнянь (тобто для її вирішення) ці члени повинні бути апроксимовані за допомогою певної моделі турбулентності. Основна вимога до таких моделей полягає в тому, щоб вони були відносно прості і придатні для практичних розрахунків і в той же час враховували найбільш істотні чинники, що визначають розсіювання забруднюючих речовин.

Під час створення математичної моделі розсіювання димових газів були використані стохастичні рівняння, які з достатньою точністю відображають дифузійні процеси розповсюдження димових газів у повітряному середовищі, а також більш точно враховані фізичні властивості речовин, що викидаються джерелом забруднення [17].

Для побудови моделі були прийнято такі припущення:

– повітряний простір є необмеженим зверху та з боків;  
 – швидкість руху повітряних мас (м/с) відома

$$\vec{a}(\vec{x}) = (a^{(1)}; a^{(2)}; a^{(3)}); \quad (5)$$

– відома є матриця дифузії у повітрі (м<sup>2</sup>/с) для визначення якої проводилися експериментальні і теоретичні дослідження турбулентного змішування димових газів в потоці атмосферного повітря

$$B(\vec{x}) = \begin{pmatrix} b^{(11)} & b^{(12)} & b^{(13)} \\ b^{(21)} & b^{(22)} & b^{(23)} \\ b^{(31)} & b^{(32)} & b^{(33)} \end{pmatrix}; \quad (6)$$

– джерело димових газів площею  $S$  (м<sup>2</sup>) знаходиться на висоті  $h$  (м) від підшви повітряного простору;

– швидкість надходження продуктів згоряння є відомаю,  $n$ ;  
 – концентрація диму біля джерела відома і дорівнює (мг/м<sup>3</sup>)  $C_0$ .

Траєкторія руху частинки в деякому середовищі під дією теплового руху молекул середовища та макроскопічного його руху може бути описана як реалізація  $\vec{x}(t)$  випадкового дифузійного процесу з вектором переносу  $\vec{a}_g$  та матрицею дифузії  $B$ . Такі реалізації можна одержувати як розв'язки стохастичного диференціального рівняння

$$d\vec{x}(t) = \vec{a}_g(t, \vec{x}(t)) \cdot dt + \sqrt{B(\vec{x}(t))} \cdot d\vec{w}(t), \quad (7)$$

з деякою початковою умовою

$$\vec{x}(0) = \vec{x}_0, \quad (8)$$

де  $\vec{w}(t)$  – тривимірний стандартний вінерівський процес;

$\vec{a}_g(t, \vec{x}(t))$  – вектор переносу, який може бути описаний рівнянням

$$\vec{a}_g(t, \vec{x}(t)) = \vec{a}(\vec{x}) + (0; 0; v - g \cdot t), \quad (9)$$

$g$  - прискорення вільного падіння.

На частинку, яка вилітає з джерела висотою  $h$  з початковою швидкістю  $V_0$  і рухається в повітряному середовищі, діють сили її ваги  $P$  та опору повітря  $R$ . Приймаючи дану частинку за матеріальну точку, диференціальне рівняння її руху для випадку підйому над джерелом її викиду можна записати у вигляді

$$m \frac{dV}{dt} = -P - R. \quad (10)$$

Для випадку опускання частинки до рівня підстилаючої поверхні рівняння її руху набуває вигляду

$$m \frac{dV}{dt} = P - R. \quad (11)$$

Розв'язавши рівняння (10), (11), можна визначити час підйому частинки  $t_1$  над джерелом викиду і час її витання над підстилаючою поверхнею до моменту повного опускання  $t_2$ . Та-

ким чином, сумарний час, протягом якого частинка буде знаходитися у димовій хмарі

$$t = t_1 + t_2, \quad (12)$$

буде характеризувати тривалість процесу розсіювання таких домішок у повітрі. Увівши величини  $t_1$  і  $t_2$  у рівняння (9) і знайшовши ймовірність  $P(t, \vec{x}_0, \Gamma)$  попадання дифузійного процесу, який стартував у точці  $\vec{x}_0$ , за час  $t$  в область  $\Gamma$ , можна знайти концентрацію забруднюючих речовин в кожній точці  $\vec{x}$  повітряного простору в будь-який момент часу  $t$  за формулою

$$C(t, \vec{x}) = C_0 \cdot v \cdot \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{V(\Gamma_{\vec{x}})} \int_0^t d\tau \int_E P(\tau, \vec{y}, \Gamma_{\vec{x}}) d\vec{y}, \quad (13)$$

де  $\Gamma_{\vec{x}}$  – окіл точки  $\vec{x}$ ;

$d$  – діаметр  $\Gamma_{\vec{x}}$ ;

$V(\Gamma_{\vec{x}})$  – об'єм  $\Gamma_{\vec{x}}$ ;

$E$  – область надходження у повітряний простір диму.

Форма димової хмари буде визначатися нерівністю

$$C(t, \vec{x}) \geq C_{zp}, \quad (14)$$

де  $C_{zp}$  – деякий граничний рівень концентрації диму.

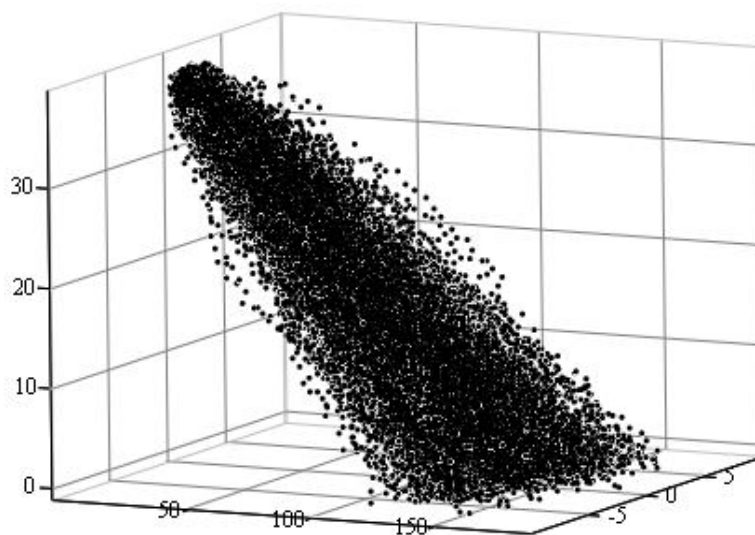
Основним у застосуванні формули (14) є обчислення ймовірності  $P(t, \vec{x}_0, \Gamma)$ . На практиці можна обмежитись оцінкою такої ймовірності, яку можливо знайти шляхом моделювання великої кількості траєкторій – розв'язків рівняння (9).

Оцінкою ймовірності  $P(t_k, o, \Gamma)$  попадання в момент часу  $t_k$  траєкторії дифузійного процесу, що стартував з точки  $\vec{o}$  в область  $\Gamma \in Q_k$  відношення кількості траєкторій, для яких  $\vec{x}_k \in \Gamma$ , до загальної кількості змодельованих траєкторій. Замінивши інтеграли в (14) відповідними сумами та взявши достатньо малі околиці (об'єму  $V$ ) точок, в яких нас цікавить значення концентрації диму, одержимо розрахункову формулу для обчислення  $C(t_k, \vec{x})$

$$C(t_k, \vec{x}) \approx \frac{C_0 \cdot v}{V} \cdot \sum_{i=1}^k Q_i \Delta t. \quad (15)$$

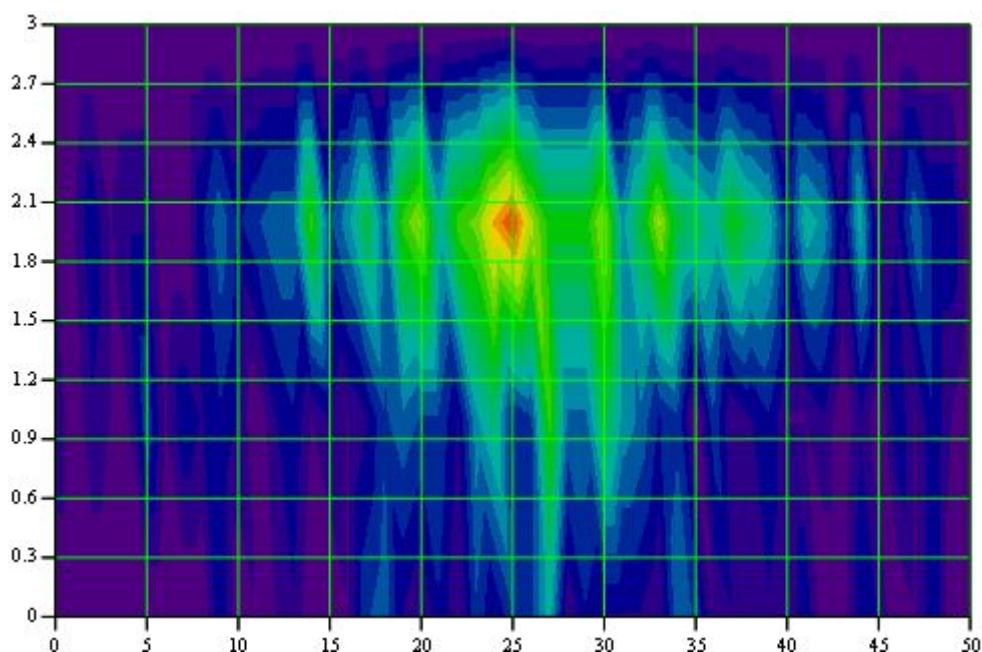
На основі наведених вище теоретичних викладень було розроблено орієнтований на систему Mathcad програмний пакет, який дозволяє проводити моделювання зміни формування і розповсюдження димової хмари у просторі повітряного середовища з врахуванням фізичних властивостей забруднюючих речовин, що містяться у викиді та метеорологічних умов району розташування джерела емісії.

Використовуючи розроблене програмне забезпечення, були проведені розрахунки процесів розсіювання різних за фізичними властивостями шкідливих домішок димової хмари викиду за умов змінної інтенсивності вітрової активності повітряного середовища. Оскільки найбільш токсичними речовинами, що міс-



(X(kkT), Y(kkT), Z(kkT))

**Рисунок 2 – Модель зміни форми і розповсюдження димової хмари сажових частинок у просторово-часовому полі за швидкості вітру 3 м/с**



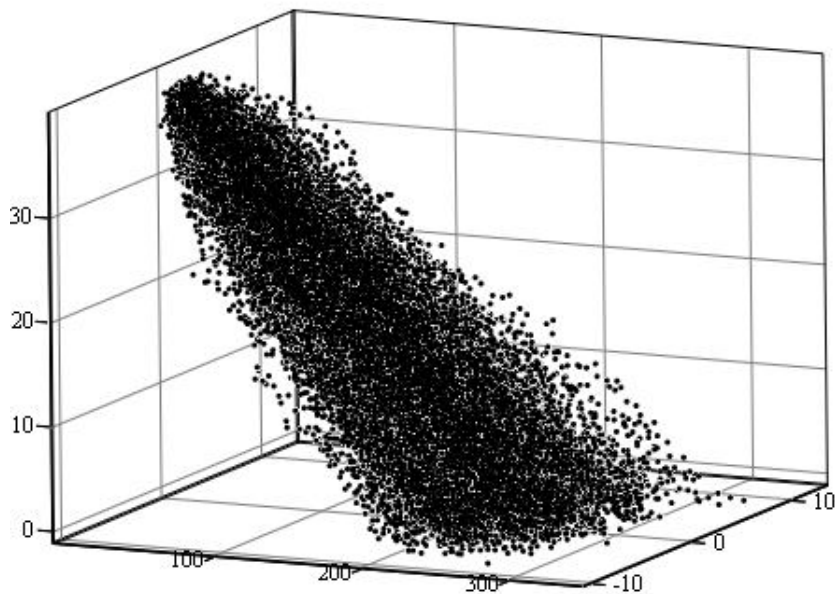
С

**Рисунок 3 – Розподіл просторово-часового поля концентрацій сажових частинок на рівні приземного шару атмосферного повітря за швидкості вітру 3 м/с**

тяться у продуктах неповного згоряння вуглеводневих газів, є оксиди азоту та, з точки зору можливого акумулювання 3,4 бенз(а)пірену, сажа, то саме ці компоненти були вибрані для ілюстрації процесів розповсюдження забруднень в атмосферному повітрі з використанням розробленої моделі. Фізико-хімічні характеристики зазначених речовини суттєво відрізняються, що уможливорює репрезентативну оцінку впливу на стан навколишнього середовища викиду шкідливих речовин з урахуванням їх влас-

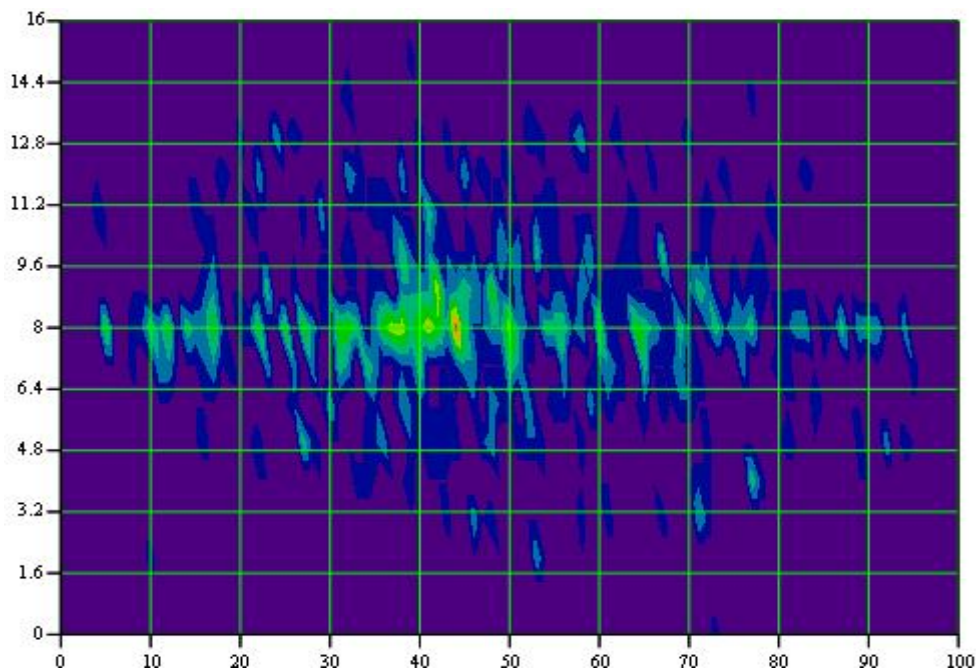
тивостей, метеорологічних умов та параметрів джерела забруднення.

На рисунках 2, 3 наведено графічні результати виконання процедури моделювання форми димової хмари та розподілу у приземному шарі атмосферного повітря просторово-часового поля концентрацій сажі та оксидів азоту, що містяться у викиді точкового джерела забруднення з визначеними геометричними розмірами та параметрами роботи за умови швидкості вітру 3 та 5 м/с.



(X(kkT), Y(kkT), Z(kkT))

**Рисунок 4 – Модель зміни форми і розповсюдження димової хмари сажових частинок у просторово-часовому полі за швидкості вітру 5 м/с**



С

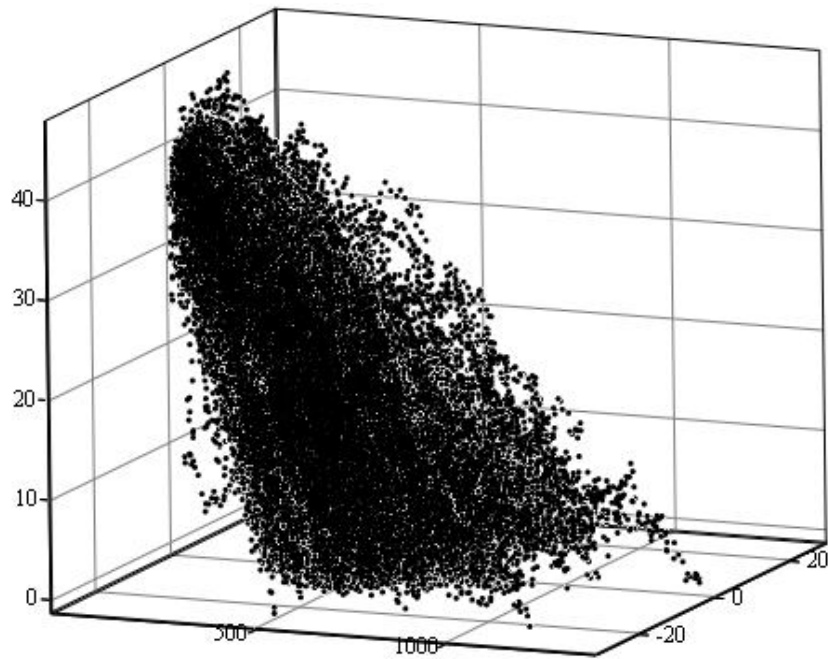
**Рисунок 5 – Розподіл просторово-часового поля концентрацій сажових частинок на рівні приземного шару атмосферного повітря за швидкості вітру 5 м/с**

Аналізуючи отримані результати, наведені у вигляді графічних залежностей 8, 9, можна зробити такі висновки:

1) підвищення вітрової активності сприяє розповсюдженню шкідливих домішок, причому чим меншими є густина та розмір домішки, тим сильнішим буде вплив величини швидкості вітру на параметри димової хмари та величини приземних концентрацій;

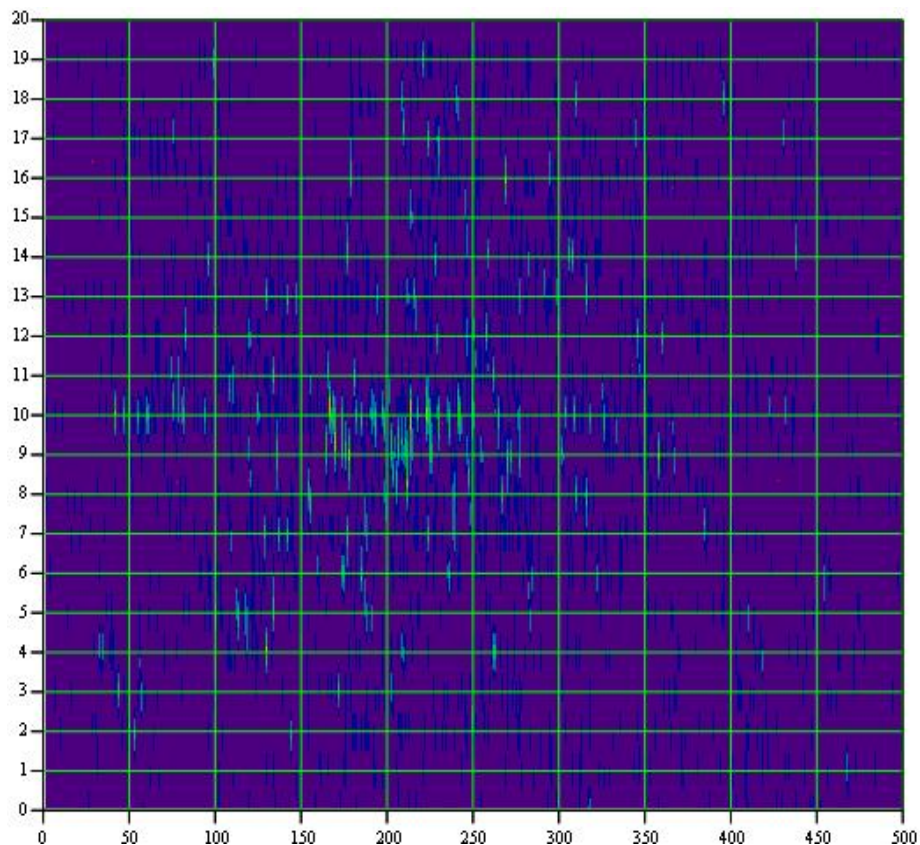
2) чим більша густина та розмір частинки домішки, тим швидше та ближче від джерела викиду вона випаде, при цьому зона впливу димової хмари на рівні підстилаючої поверхні буде меншою, проте характеризуватиметься значно більшими величинами максимальної концентрації;





(X(kkT), Y(kkT), Z(kkT))

Рисунок 6 – Модель зміни форми і розповсюдження димової хмари оксидів азоту у просторово-часовому полі за швидкості вітру 5 м/с



С

Рисунок 7 – Розподіл просторово-часового поля концентрацій оксидів азоту на рівні приземного шару атмосферного повітря за швидкості вітру 5 м/с

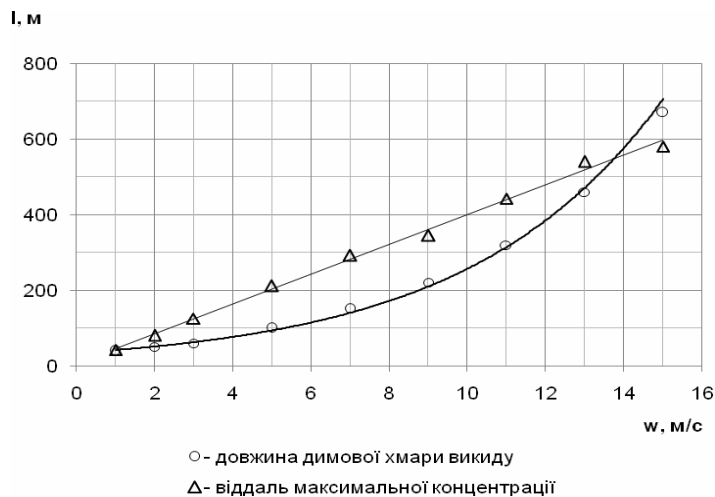


Рисунок 8 – Графічна інтерпретація впливу вітрової активності атмосферного повітря на параметри димової хмари

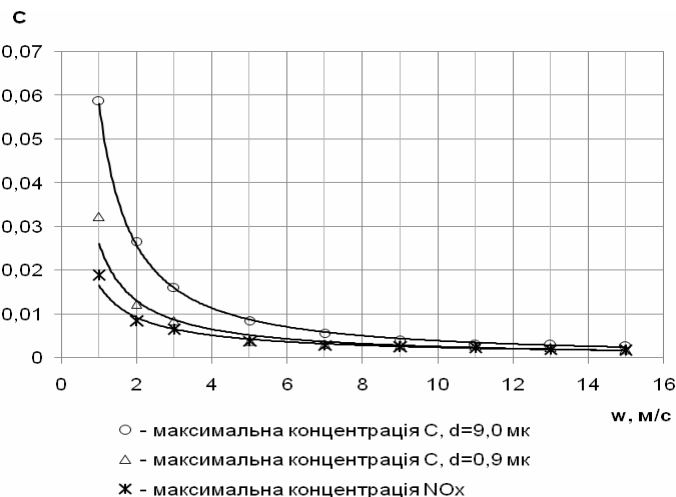


Рисунок 9 – Залежність величини максимальної концентрації від інтенсивності вітру з урахуванням фізико-хімічних характеристик забруднюючих речовин

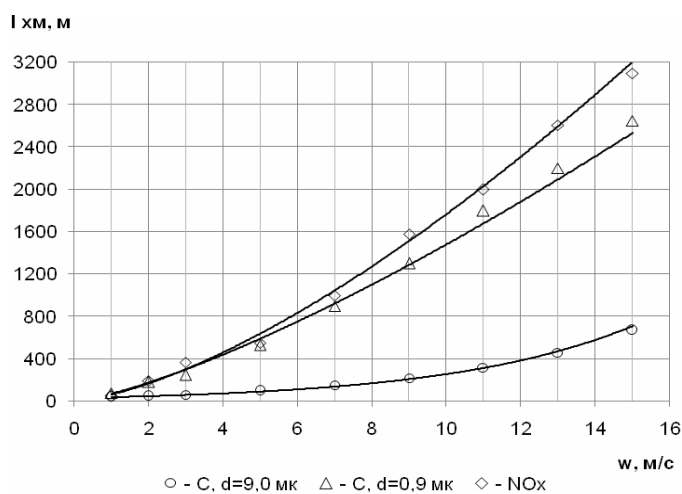


Рисунок 10 – Динаміка зміни зони впливу димової хмари на рівні приземного шару залежно від вітрової активності атмосферного повітря з урахуванням фізико-хімічних характеристик забруднюючих речовин

3) відстань від джерела викиду до точки максимальної концентрації домішки також суттєво залежить не тільки від інтенсивності вітру, а й від властивостей забруднюючої речовини: чим вона легша, тим далі від джерела будуть спостерігатись максимальні величини приземних концентрацій.

Отже, навіть у разі постійних за обсягом та складом викидів в результаті зміни метеорологічних умов рівень забруднення атмосферного повітря може суттєво відрізнятись. Проведені дослідження дозволяють встановити закономірності такого впливу, що є важливим для проведення оцінки стану повітряного басейну, прогнозування можливого забруднення, підготовки документації якості атмосферного повітря та розроблення природоохоронних заходів.

### Література

- 1 Prater E. A new air dispersion modeling system is helping create more accurate industrial source models / E. Prater, C. Midgley // Environmental Protection. - Vol. 17, No. 3.
- 2 Beychok M.R. (2005). Fundamentals Of Stack Gas Dispercion / Beychok M.R. - California: The Author, 2005. - 193 p.
- 3 Pal A.S. Air Pollution Meteorology and Dispersion / Pal A.S. - Oxford University Press, 1998. - 234 p.
- 4 Rod V. Atmospheric Dispersion Modelling / Rod V. - Earthscan Publications, 2001. - 258 p.
- 5 Environmental Protection Agency. [Електронний ресурс] // User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models]. - 1995. - Vo. 1, 2. -Режим доступу: [epa.gov/scram001/userg/regmod](http://epa.gov/scram001/userg/regmod)
- 6 Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива / Исаак Яковлевич Сигал. - Л.: Недра, 1988. - 312 с.
- 7 Охрана окружающей природной среды / [Лавриненко М. З., Петин В.А., Чмовж В.В. и др.]; под. ред. Г.В. Дуганова - К.: Выща школа, 1988. - 304 с.
- 8 Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86. - Л.: Гидрометеиздат, 1987. - 94 с.
- 9 Шабад Л.М. Загрязнение атмосферного воздуха канцерогенными веществами / Л. Д. Шабад, П.П. Дикун. - Л.: Медгиз, 1959. - 240 с.
- 10 Белов Н.С. Комплексная оценка рассеивания вредных примесей / Н.С. Белов // Газова промисленность. - 1982. - №10. - С. 39-41.
- 11 Эльтерман В.М. Охрана воздушной среды на химических и нефтехимических предприятиях / Эльтерман В.М. - М.: Химия, 1985. - 160 с.
- 12 Сеттон О.Г. Микрометеорология / Сеттон О.Г. - М.: Гидрометеиздат, 1958. - 230 с.
- 13 Fundamentals of air pollution / [Boubel R.W., Fox D.L., Turner D.B., Stern A.C.]. - California: Academic press, 1994. - 574 p.
- 14 International Trends in Standartization of Air Pollution Modeling and its Application. [“4-th Int Clean Air Congr.”]. (Tokyo, 1977). - Tokyo, 1977. - P. 261-266.
- 15 Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / Берлянд М.Е. - Л.: Гидрометеиздат, 1975. - 448 с.
- 16 Шестопалов А. В. Повышение точности контроля концентрации выбросов в атмосфере города стационарными источниками: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: 05.11.13 “Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий” / А.В. Шестопалов. - Омск, 2007. - 20 с.
- 17 Побудова математичної моделі просторово-часового поля розсіювання в атмосфері димових газів факельних установок: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції [“Нафтогазова енергетика”] (Івано-Франківськ, 10-14 жовт. 2011 р.) / ІФНТУНГ. - Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2011. - С. 37-43.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
03.06.13

Рекомендована до друку  
професором **Семчуком Я.М.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
канд. техн. наук **Пукішем А.В.**  
(НДПІ ПАТ «Укрнафта», м. Івано-Франківськ)