

М.М. Біляєв, Т.І. Русакова, О.В. Берлов

**МІНІМІЗАЦІЯ РІВНЯ ХІМІЧНОГО
ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ НА
ВІДКРИТІЙ МІСЦЕВОСТІ**

Монографія

Дніпро
Журфонд
2021

УДК 638.345:[502.3:658.5]

М 79

Рецензенти:

д-р техн. наук, проф. *В. І. Шинкаренко* (ДНУЗТ)

д-р техн. наук, доц. *М. М. Налісько* (ПДАБА)

Рекомендовано до друку Вченою радою
Дніпровського університету залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна,
протокол № 6 від 01.02.2021 р.

М. М. Біляєв, Т. І. Русакова, О. В. Берлов

М79 Мінімізація рівня хімічного забруднення атмосферного повітря на відкритій місцевості. Дніпро: Журфонд, 2021. 198 с.

ISBN 978-966-934-301-7

В монографії розглянуті важливі науково-прикладні методи і засоби управління та контролю шкідливими виробничими чинниками, що виявляються під час виробництва у процесі трудової діяльності людини. Сукупність цих методів і засобів можна використовувати при атестації робочих місць за умовами праці та паспортизації підприємств, що мають шкідливі виробничі чинники внутрішнього та зовнішнього походження та можуть погіршити умови праці на відкритій місцевості; при аналізі або прогнозуванні стану безпеки об'єкта для вироблення управлінських рішень та вибору форм організаційно-розпорядчих дій. Для використання в навчальному процесі вищих навчальних закладів при підготовці фахівців за спеціальністю 183 «Технології захисту навколишнього середовища», 263 «Цивільна безпека», 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

ISBN 978-966-934-301-7

© Біляєв М. М., Русакова Т. І.,
Берлов О. В., 2021

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. Актуалізація розвитку наукових основ та практичної оцінки шкідливих факторів в робочих зонах на території промислових підприємств	7
1.1 Аналіз нормативно-правових основ охорони праці та необхідність розробки методів оцінювання ризиків хронічних захворювань у робітників на відкритих майданчиках промислових підприємств.....	8
1.2 Оцінювання газового складу повітряного середовища в робочих зонах на промислових майданчиках та на відкритій місцевості з урахуванням його зміни в результаті техногенного впливу підприємств та автотранспорту.....	10
1.3 Сучасні методи оцінювання вітрового режиму в робочих зонах та методи зменшення забруднення повітря	36
1.4 Методи моделювання та оцінювання параметрів повітряного середовища в робочих зонах	44
2. Прогнозування рівня хімічного забруднення в робочих зонах	52
2.1 Метод прогнозу хімічного забруднення повітря в робочих зонах	52
2.2 Метод розрахунку концентрації хімічних речовин в робочих зонах	57
2.3 Метод розрахунку хімічної трансформації забруднюючих речовин в робочих зонах	60
2.4 Методи розрахунку поля швидкості вітру в робочих зонах	69
2.5 Метод оцінювання ризику хронічної інтоксикації робітників.....	72
2.6 Верифікація розроблених методів	76
2.7 Оцінка рівня забруднення в робочих зонах промислових майданчиків	80
2.7.1 Динаміка забруднення повітряного середовища на підприємстві Дніпропетровського металургійного заводу «ДМЗ ЄВРАЗ» та на прилеглий території.....	81
2.7.2 Динаміка забруднення повітряного середовища на підприємстві коксохімічного заводу «Дніпрококс» та на прилеглий території	94
2.7.3 Динаміка забруднення повітряного середовища на прилеглий території Придніпровської ТЕС.....	108

2.7.4 Динаміка забруднення повітряного середовища на підприємстві «Інтерпайп Нижньодніпровського трубопрокатного заводу» та на прилеглий території з урахуванням викидів автотранспорту..... 111

2.7.5 Динаміка забруднення повітряного середовища на прилеглий території «ПАТ Південного гірничо-збагачувального комбінату» з урахуванням викидів автотранспорту..... 117

3. Мінімізація рівня хімічного забруднення в робочих зонах на відкритій місцевості за допомогою екранів та рослинності..... 122

3.1 Оцінювання ефективності застосування екрана для зниження загазованості в робочих зонах 123

3.2 Прогнозування вітрового режиму в робочих зонах промислових майданчиків..... 134

3.3 Використання рослинності для зниження рівня загазованості в робочих зонах..... 145

3.4 Методи оцінювання вітрового режиму в робочих зонах 163

ВИСНОВКИ..... 166

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 170

ВСТУП

В монографії розглядається науково-прикладна проблема, яка полягає в обґрунтуванні та розробці методичних основ для оцінювання параметрів повітряного середовища і забезпечення допустимих умов праці на робочих місцях промислових майданчиків та при проектуванні робочих місць на відкритій місцевості в промислових зонах, шляхом розробки математичних методів прогнозування ризику хронічної інтоксикації працівників, розроблення способів його зниження на основі ефективних інженерних засобів захисту.

Забезпечення нормативних параметрів повітряного середовища в робочих зонах є однією з головних проблем у сфері охорони праці. Розв'язання цієї проблеми є специфічним, оскільки обумовлюється різними небезпечними чинниками, які виникають на виробництві, тому дослідження в конкретній галузі завжди мають виробничу спрямованість. Значні теоретичні та кількісні дослідження були проведені стосовно параметрів повітряного середовища на робочих місцях у виробничих приміщеннях. Значно менше уваги було приділено проблемі забезпечення нормативних параметрів повітряного середовища в робочих зонах, які розміщуються на майданчиках промислових підприємств та територіях підприємств.

Оцінювання та прогнозування параметрів повітряного середовища в робочих зонах промислових майданчиків та на відкритій території виявляється особливо складною задачею, оскільки робочі місця перебувають під впливом багатьох факторів: руху повітряного потоку, турбулентної дифузії, наявності різних перешкод, джерел емісії різного виду. Присутність такого комплексу факторів суттєво ускладнює розроблення методів прогнозування параметрів повітряного середовища в робочих зонах промислових майданчиків та на відкритій місцевості.

Необхідність вирішення проблеми об'єктивного оцінювання та прогнозування якості повітря в робочих зонах промислових майданчиків підтверджується підвищенням рівня ризику хронічних захворювань робітників. Таким чином, актуальною проблемою залишається розроблення методів

прогнозування ризиків хронічних захворювань робітників та визначення закономірностей розподілу шкідливих виробничих чинників.

На сьогодні існує необхідність у розробленні методів прогнозування параметрів повітряного середовища, які б комплексно враховували вплив вищезазначених факторів, а також дозволяли оперативно аналізувати умови праці на робочих місцях та виконувати оцінювання ризику хронічної інтоксикації працівників. Для цього необхідна подальша розробка математичних методів, системи заходів і технічних засобів, що зменшують вплив шкідливих факторів на працівників. Така система заходів містить у собі очищення повітря в робочій зоні від шкідливих речовин, забезпечення нормативних параметрів температури, вологості, швидкості руху повітря, іонізації повітряного середовища. Не менш важливим питанням є розробка ефективних інженерних засобів захисту працівників на промислових майданчиках від впливу різних шкідливих чинників, зниження рівня забруднення повітряного середовища та забезпечення допустимих умов праці на робочих місцях.

1. АКТУАЛІЗАЦІЯ РОЗВИТКУ НАУКОВИХ ОСНОВ ТА ПРАКТИЧНОЇ ОЦІНКИ ШКІДЛИВИХ ФАКТОРІВ В РОБОЧИХ ЗОНАХ НА ТЕРИТОРІЇ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Однією з умов сталого соціально-економічного розвитку суспільства є трудова активність всіх його членів і забезпечення безпеки їх життєдіяльності. Як відомо, жодний вид діяльності (трудова, інтелектуальна, духовна та ін.) не є абсолютно безпечним. Сучасна людина живе у світі природних, техногенних, соціальних та інших видів небезпек. Тому серед найгостріших глобальних проблем сучасної цивілізації найважливіше значення набули проблеми середовища праці людини – захист працівників від пов'язаних з виробництвом нездужань, хвороб і травм. Згідно з останніми оцінками Міжнародної організації праці (МОП), в основі яких лежать статистичні дані, внаслідок негативного впливу на працівників виробничих факторів, щорічно в світі помирає близько 2,2 мільйонів людей. Ще близько 160 мільйонів по всьому світу страждають від захворювань, пов'язаних з трудовою діяльністю, а загальна кількість нещасних випадків на виробництві оцінюється в 270 мільйонів на рік. На промислових підприємствах у шкідливих умовах праці зайнято більше 30 % працівників. Щорічно виявляється велика кількість випадків професійних захворювань, при цьому більш 80 % профзахворювань реєструється на промислових підприємствах.

Нещасні випадки, невиходи на роботу через хворобу, плинність робочої сили завдають суспільству великі економічної шкоди. Через травматизм на виробництві втрачається близько 180-200 тисяч людино-днів щорічно, страхові виплати по обов'язковому страхуванню від нещасних випадків на виробництві та профзахворювань складають щорічно близько 25 мільйонів доларів, а на компенсації за умовами праці – близько 130 мільйонів доларів США.

Найважливішим фактором, що сприяє скороченню числа нещасних випадків і профзахворювань, підвищення безпеки та поліпшення гігієни праці в умовах ринкової економіки є широке використання принципів економічного стимулювання роботодавців у створенні гідних умов праці. Економічне

стимулювання передбачає матеріальну вигоду вкладення коштів у поліпшення умов і в охорону праці у порівнянні з виплатами штрафів, підвищених страхових внесків, компенсації за роботу в несприятливих умовах, значних сум на відшкодування збитків і втрату працездатності.

Метеорологічні умови або мікроклімат характеризуються фізичними параметрами повітря в робочій зоні – його температурою ($t^{\circ}\text{C}$), відносною вологістю (ϕ , %), швидкістю руху (V , м/с), а також інтенсивністю теплового випромінювання на працівників від нагрітих поверхонь обладнання, виробів і відкритих джерел (I , Вт/м²), тиском (p , Па). Зазначені параметри як окремо, так і в комплексі надають значний вплив на перебіг життєвих процесів в організмі людини, багато в чому визначають його самопочуття і тому є важливою характеристикою комфортності умов праці.

З метою зниження ризику професійної захворюваності необхідна система організаційних заходів, технічних методів і засобів, що запобігають або зменшують вплив шкідливих факторів. Така система заходів включає в себе очищення повітря в робочій зоні від шкідливих речовин, забезпечення оптимальних і допустимих параметрів повітряного середовища (температури, вологості, швидкості руху повітря), іонізацію повітряного середовища, організацію раціонального освітлення і вентиляції на робочих місцях, захист від різного виду випромінювання і ін.

1.1 Аналіз нормативно-правових основ охорони праці та необхідність розробки методів оцінювання ризиків хронічних захворювань у робітників на відкритих майданчиках промислових підприємств

На сьогодні в Україні значна увага приділяється питанням охорони праці на підприємствах різної галузі. В державі створена нормативно-правова база стосовно різних питань охорони праці. А саме, законодавство України з охорони праці поєднує в собі конституційні гарантії прав громадян у сфері охорони праці, Закони України «Про охорону праці» і «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на

виробництві і професійного захворювання...», Кодекс законів України про працю, інші закони, пов'язані з охороною життя і здоров'я громадян в процесі їх трудової діяльності, нормативні акти, яким надано чинність правових норм, що повинні виконуватися обов'язково.

До таких нормативно-правових документів відносяться: ДСТУ 18001:2015, що регламентує систему управління гігієною та безпекою праці; ДСТУ 2293:2014 відносно охорони праці, термінів та визначень основних понять; ДБН А.3.2-2-2009 стосовно системи стандартів безпеки праці, де представленні основні положення з охорони праці та промислової безпеки у будівництві, а саме п. 6.6.24 запобігання впливу шкідливих виробничих чинників, спричинених умовами робіт та особливостями діючого підприємства; перелік шкідливих виробничих чинників відповідно ГОСТ 12.0.003, 12.1.007, ДСТУ Б В.2.7-43.

В Конституції України стверджується: «Людина, її життя і здоров'я, честь і гідність, недоторканність і безпека визнаються в Україні найвищою соціальною цінністю». Оскільки, здоров'я робітників – саме головне, про що наголошується в конституції, тому одним із важливих питань є оцінка ризиків. Поняття ризику, як міри небезпеки, застосовується для прогнозування і оцінювання стану умов та безпеки праці на робочому місці, ефективності впровадження заходів та засобів з охорони праці. В рамках цієї проблеми одною із складових є оцінка ризиків хронічних захворювань, що виникають у робітників під час тривалого впливу ряду негативних факторів, а саме хімічного забруднення, електромагнітного випромінювання. Проте при оцінці ризику виникнення хронічних захворювань у робітників, які працюють на відкритій місцевості промислових майданчиків, існуюча нормативно-правова база не в повній мірі регламентує можливості для оцінювання такого ризику. Головна увага приділена ризикам при аваріях, катастрофах, але відсутні методи оцінювання ризику виникнення хронічних захворювань на підприємствах різної галузі, особливо для робочих зон, що розміщуються на відкритій місцевості. Також слід підкреслити, що нормативні документи головну увагу приділяють

робочим зонам на промислових підприємствах, які розміщуються в приміщеннях, і відсутні методи оцінювання ризику хронічних захворювань в робочих зонах на відкритій місцевості.

Також в розпорядженні Кабінету Міністрів України від 12 грудня 2018 р. № 989-р запропонована Концепція, що «визначає основні напрями та завдання створення системи організації безпеки та гігієни праці в Україні на основі ризикоорієнтованого підходу для забезпечення впровадження стандартів Європейського Союзу». Відмічається, що на сьогодні потрібен «... перехід до заходів, що передбачають точне і постійне оцінювання виробничих ризиків, їх запобігання, ..., проведення досліджень ...», що сприятиме «підвищенню рівня захисту життя та здоров'я працівників». В межах цієї Концепції актуальною задачею є створення методів оцінювання ризику, у тому числі і ризику хронічних захворювань в робочих зонах на відкритій місцевості промислових підприємств, але це дуже складна задача, оскільки на формування полів забруднення в таких робочих зонах впливає значна кількість фізичних факторів. Заміряти величину ризику не можливо за допомогою приладів, оскільки він не є фізичною величиною, але його можна оцінити та спрогнозувати за допомогою математичних моделей, розроблених на основі методів чисельного моделювання, які в масштабі реального часу дозволяють провести оцінку та спрогнозувати на майбутнє. Розробка багатопараметричних методів прогнозу ризику хронічних захворювань потребує використання фундаментальних моделей аеродинаміки, масопереносу, електродинаміки. На сьогодні існує дефіцит моделей, методів, процедур, розрахункових модулів.

1.2 Оцінювання газового складу повітряного середовища в робочих зонах на промислових майданчиках та на відкритій місцевості з урахуванням його зміни в результаті впливу підприємств та автотранспорту

Повітряне середовище, в якому здійснюється діяльність людини, що працює на відкритій місцевості, характеризується хімічним складом, фізичними

параметрами та іншими показниками, які значно впливають на здоров'я працівників, їх психофізіологічний стан і працездатність.

Атмосферне повітря, найбільш сприятливе для дихання, у своєму складі містить 78,08 % азоту, 20,95 % кисню, 0,03 % вуглекислого газу, 0,93 % інертних і 0,01 % інших газів.

У процесі праці на відкритій місцевості в повітря робочої зони можуть потрапляти шкідливі речовини різного походження (гази, пари, аерозолі), які здатні викликати захворювання або відхилення в стані здоров'я працюючих.

Забруднення повітряного середовища, зміна його газового складу і фізичних параметрів може відбуватися: за рахунок шкідливих речовин, що надходять від промислових підприємств та автотранспорту, що знаходиться в околі робочих зон працівників на відкритій місцевості.

У січні 2016 року Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) виступила з попередженням: ризики для здоров'я, пов'язані із забрудненням повітря в багатьох великих містах, досягли критичної позначки. За словами експертів ВООЗ, ситуація така, що незабаром населення Землі всерйоз зіткнеться з проблемою ранньої смертності, а влади різних країн будуть вишукувати величезні суми на лікування хронічних захворювань своїх громадян, таких як порушення роботи серця і навіть старече недоумство [146].

Індустріальна промисловість є найважливішою особливістю економічного зростання в країнах, одночасно вона викликає шкідливі наслідки для навколишнього середовища за допомогою вивільнення забруднювачів повітря і води та небезпечних відходів виробництва. Одна з причин – забруднення від небезпечних виробництв або технологій, які вже не повинні застосовуватися, адже пов'язані з небезпекою для здоров'я працівників та для навколишнього середовища, але до сих пір використовуються. Друга причина – швидкий розвиток малих підприємств недержавного сектору. Забруднення повітря виникає не тільки від масових викидів забруднювачів підприємствами щодо великих галузей промисловості, таких як виробництво чавуну, сталі, кольорових металів і галузей нафтопереробки, але і від випадкових невеликих

викидів забруднювачів малими підприємствами, такими, як невеликі цементні заводи, підприємства по очищенню свинцю, виробництву хімічних добрив і пестицидів і т. д., де заходи щодо запобігання забруднення не відповідають вимогам, тому забруднювачі можуть потрапляти в атмосферу.

Так як індустріальна діяльність завжди включає виробництво енергії, спалювання корисних копалин є основним джерелом забруднення повітря, через що великі кількості забруднювачів (зважені частинки, двоокис сірки та ін.) викидаються в повітря через неповноту згоряння і недостатній захист від викидів.

Склад викидів забруднювачів повітря змінюється в залежності від галузі промисловості. Концентрації різних забруднювачів в атмосфері також варіюється в широких межах залежно від виробничого процесу і від географічних і кліматичних умов місцевості. Специфіку впливу на населення кожного забруднювача з різних галузей промисловості важко оцінити. В цілому, рівні впливу на робочих місцях відкритої місцевості набагато вище, ніж для інших груп населення. Хоча концентрація викидів швидко зменшується, і вони розносяться вітром, але тривалість впливу набагато вище.

Таким чином, працівники на відкритій місцевості підприємств та прилеглої до них території попадають під довготривалий вплив викидів цих промислових підприємств. Велика кількість епідеміологічних досліджень показала тісний зв'язок між погіршенням легеневої функції і збільшенням числа випадків хронічних захворювань органів дихання серед працівників, що піддаються тривалому впливу звичайних забруднювачів повітря.

Як було сказано, викиди промислових підприємств є головним джерелом забруднення атмосферного повітря, на їх частку припадає 56 % всіх забруднень, або 17 451,9 тис. т. шкідливих викидів. При викидах автотранспорту на кожного жителя країни в середньому припадає 221 кг забруднюючих речовин. Третина всіх промислових викидів – це викиди обробних виробництв, на другому місці – видобуток корисних копалин (28 %), на третьому – виробництво та розподілення електроенергії, газу та води (22 %), незважаючи

на те, що загальний обсяг викидів від стаціонарних джерел в цілому по країні продовжує скорочуватися. І хоча частка уловлених і знешкоджених речовин в загальній кількості відповідає цільовому показнику, обсяг викидів в паливно-енергетичному комплексі та металургії перевищує встановлений цільовий показник.

В чорній металургії процеси виплавки чавуну і переробки його на сталь супроводжуються викидом в атмосферу різних газів. Викид пилу в розрахунку на 1 т придатного чавуну складає 4,5 кг, сірчистого газу – 2,7 кг, марганцю – 0,1-0,6 кг. Разом із доменним газом в атмосферу в невеликих кількостях викидається також з'єднання миш'яку, фосфору, сурми, свинцю, ртуті і рідких металів, ціанистий водень і смолисті речовини.

У кольоровій металургії шкідливі речовини утворюються при виробництві алюмінію, міді, свинцю, олова, цинку, нікелю й інших металів у печах (для спікання, виплавки, опалювання, індукції й ін.), на устаткуванні для подрібнення та розмелення, у конвертерах, місцях навантаження, вивантаження і пересилки матеріалів, у сушильних агрегатах, на відкритих складах. Підприємства кольорової металургії забруднюють атмосферне повітря сірчанам ангідридом – 75 % сумарного викиду в атмосферу, окисом вуглецю – 10,5 % і пилом – 10,4 %.

Викиди в атмосферу при роботі хімічної промисловості відбуваються під час виробництва кислот, гумовотехнічних виробів, фосфору, пластмас, барвників і миючих засобів, мінеральних добрив, штучного каучуку, розчинників, крекінгу нафти. У викидах міститься аміак – 3,7 %, бензин – 3,3 %, сірковуглець – 2,5 %, сірководень – 0,6 %, толуол – 1,2 %, ацетон – 0,95 %, бензол – 0,7 %, ксилол – 0,3 %, дихлоретан – 0,6 %, етилацетат – 0,5 %, сірчана кислота – 0,3 %.

Підприємства нафтопереробної промисловості забруднюють атмосферу викидами вуглеводів – 23 % від сумарного викиду, сірчаного газу – 16,6 %, оксиду вуглецю – 7,3 %, оксидів азоту – 2 %.

Виробництво промисловості будівельних матеріалів супроводжується викидами в атмосферу пилу і завислих речовин – 57,1 % від сумарного викиду, оксиду вуглецю – 21,4 %, сірчаного ангідриду – 10,8 % і оксидів азоту – 9 %, у викидах присутні сірководень – 0,03 %, формальдегід – 0,02 %, толуол – 0,02 %, бензол – 0,01 %.

Характерними забруднювальними речовинами, що виробляються деревообробними та целюлозно-паперовою промисловістю, є тверді речовини – 29,8 % сумарного викиду в атмосферу, оксид вуглецю – 28,2 %, сірчаний ангідрид – 26,7 %, оксид азоту – 7,9 %, толуол – 1 %, сірководень – 0,9 %, ацетон – 0,5 %, ксилол – 0,45 %, бутилацетат – 0,4 %, етилацетат – 0,4 %, формальдегід – 0,1 % [89].

Місто Дніпро відоме, як промислове місто. На території міста знаходиться велика кількість підприємств, які є джерелами забруднення повітряного середовища. Ці підприємства поділяються за сферою діяльності на:

- підприємства по виготовленню електричної, теплової енергії, до яких можна віднести «ДТЕК Дніпроенерго». За даними Головного управління статистики у Дніпропетровській області [63], воно займає перше місце по забруднюванню навколишнього середовища міста;

- підприємства чорної та кольорової металургії, до яких можна віднести Дніпровський металургійний завод «ЄВРАЗ», який за даними Головного управління статистики у Дніпропетровській області [63], займає друге місце за забрудненням атмосферного повітря міста Дніпра. До цієї сфери діяльності відносяться такі підприємства: «Дніпровський металургійний комбінат», Дніпропетровський трубний завод, «Інтерпайп Нижньодніпровський трубопрокатний завод», «Укрсплав», металургійний завод «Дніпросталь»;

- підприємства хімічної промисловості, до яких відноситься «Дніпровський коксохімічний завод»;

- підприємства по виробництву будівельних матеріалів, до яких відносяться завод металоконструкцій «Укрсталь Дніпро» і Дніпровський завод «Алюмаш»;

– підприємства харчової промисловості, до яких відносяться: кондитерська фабрика «АВК», «Дніпропетровський комбінат харчових концентратів», «Дніпропетровський олійноекстракційний завод», «Дніпровський крохмалепатоковий комбінат», комбінат «Придніпровський», м'ясокомбінат «Ювілейний», кондитерська фабрика «Квітень», «Дніпромлин»;

– підприємства машинобудування та металургійного обладнання: «Дніпроважмаш», «Дніпропетровський завод з ремонту та будівництва пасажирських вагонів», «Дніпрополімермаш», «Дніпрометиз», «Дніпровагонмаш», «Південний машинобудівний завод імені О. М. Макарова», «Дніпропетровський агрегатний завод», «Дніпропетровський стрілочний завод»;

– підприємства комунальної сфери;

– інші підприємства та джерела.

Для більш детального аналізу було обрано три активних підприємства з найбільшими викидами: Дніпровський металургійний завод «ЄВРАЗ», «Інтерпайп Нижньодніпровський трубопрокатний завод», «Дніпропетровський олійноекстракційний завод». За отриманими даними Управління статистикою у Дніпропетровській області за 2016-2017 рр. [63], складено порівняльні таблиці 1.1–1.2 відносно показників інтенсивності викидів цих підприємств за два роки. Було обрано показники трьох найбільшкідливих хімічних сполук, які надходять до атмосфери від підприємств, а саме: оксидів азоту, діоксиду сірки та оксиду вуглецю.

Таблиця 1.1 – Інтенсивність викидів основних забруднювачів заводів м. Дніпра у 2016 р.

Види домішок	Інтенсивність викидів (ЄВРАЗ ДМЗ), Q , г/с	Інтенсивність викидів (Інтерпайп), Q , г/с	Інтенсивність викидів (Олейна), Q , г/с
Оксиди азоту, (NO_x)	29,983	8,243	0,478
Діоксид сірки, (SO_2)	21,401	0,291	1,594
Оксид вуглецю, (CO)	153,426	13,189	1,739

Таблиця 1.2 – Інтенсивність викидів основних забруднювачів заводів м. Дніпра у 2017 р.

Види домішок	Інтенсивність викидів (ЄВРАЗ ДМЗ), Q , г/с	Інтенсивність викидів (Інтерпайп), Q , г/с	Інтенсивність викидів (Олейна), Q , г/с
Оксиди азоту, (NO_x)	25,831	9,688	0,518
Діоксид сірки, (SO_2)	18,882	0,299	2,199
Оксид вуглецю, (CO)	146,701	20,801	1,789

Аналіз таблиць показав, що для підприємства ЄВРАЗ ДМЗ інтенсивність викидів NO_x знизилася на 14 %, SO_2 – 12 %, CO – 6 %; для підприємства Інтерпайп інтенсивність викидів NO_x зросла на 17 %, SO_2 – 38 %, CO – 58 %; для підприємства Олейна інтенсивність викидів NO_x зросла на 8 %, SO_2 – 38 %, CO – 3 %. Тому викиди цих підприємств відіграють значну неативну роль у забрудненні повітряного середовища в робочих зонах на відкритій місцевості самих підприємств та на прилеглий території.

На рисунках 1.1–1.2 представлена загальна кількість викидів обраних підприємств: ЄВРАЗ ДМЗ, Інтерпайп, Олейна у 2016 р. і 2017 р.

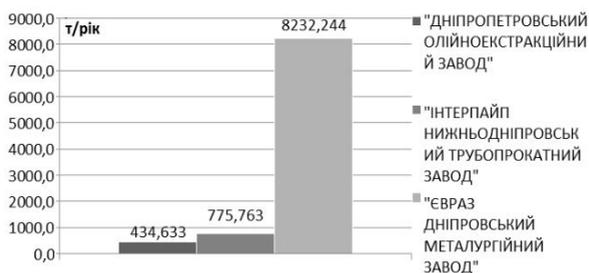


Рисунок 1.1 – Загальна кількість викидів підприємств у 2016 р.

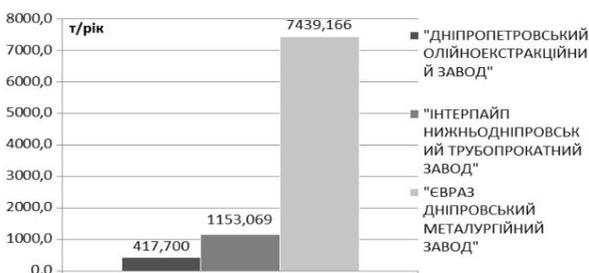
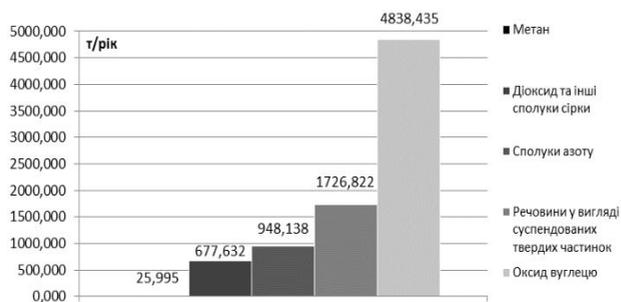


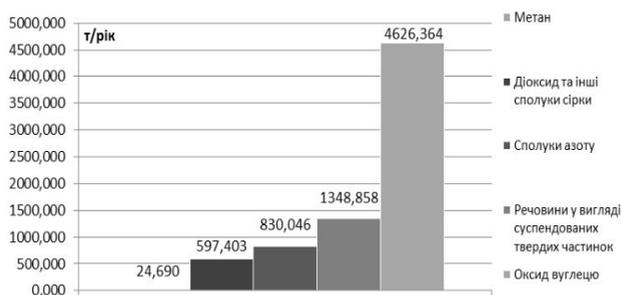
Рисунок 1.2 – Загальна кількість викидів підприємств у 2017 р.

За даними Головного управління статистики у Дніпропетровській області [63], підприємством ДМЗ ЄВРАЗ у загальній кількості було вироблено 8232,244 т/рік різноманітних шкідливих речовин без урахування діоксиду вуглецю (2143298,372 т/рік) за 2016 рік та 7439,166 т/рік різноманітних шкідливих речовин без урахування діоксиду вуглецю (1959937,682 т/рік) за 2017 рік.

На діаграмах (рис. 1.3–1.8) показано кількісні показники різних сполук за їх хімічною класифікацією, які надходять в атмосферу від підприємства ДМЗ ЄВРАЗ ім. Петровського.



а



б

Рисунок 1.3 – Кількість викидів заводу «ЄВРАЗ ДМЗ» за хімічною класифікацією: а – 2016 р.; б – 2017 р.

Можна спостерігати тенденцію зниження кількості викидів домішок у 2017 р. від підприємства ДМЗ ЄВРАЗ ім. Петровського в порівнянні з 2016 р. (рис. 1.3). А саме зменшується кількість метану, діоксиду та сполук сірки, складових азоту та оксиду вуглецю.

На рисунку 1.4 спостерігається зниження залізу, цинку, мангану, міді, нікелю, свинцю та хрому, але зростання міді.

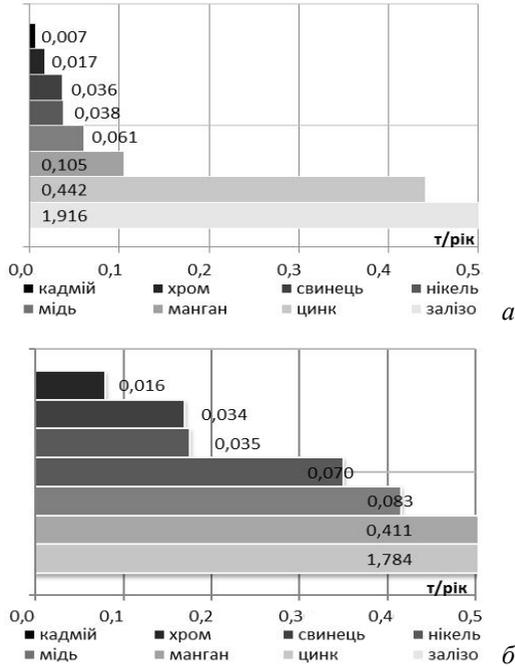
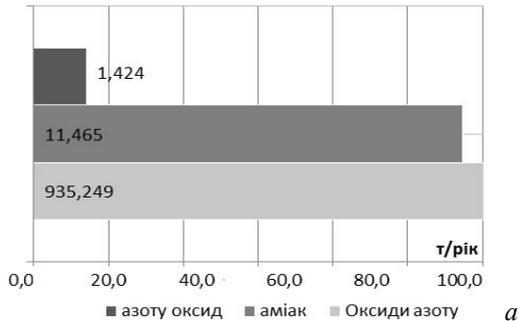
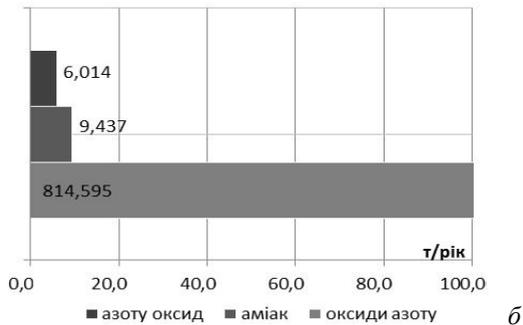


Рисунок 1.4 – Кількість викидів металів та їх сполук заводом «ЄВРАЗ ДМЗ»: *а* – 2016 р.; *б* – 2017 р.

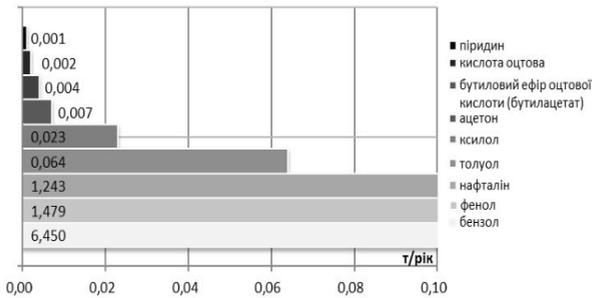
На рисунку 1.5 можна бачити, що викиди оксиду азоту збільшилися у 4,2 рази, тоді як викиди аміаку та оксидів азоту зменшилися приблизно у 1,2 рази.



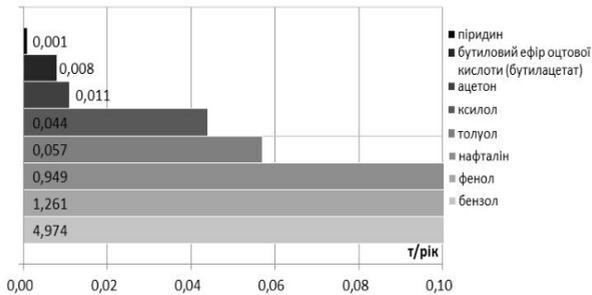


б

Рисунок 1.5 – Кількість викидів сполук азоту заводу «ЄВРАЗ ДМЗ»: а – 2016 р.; б – 2017 р.



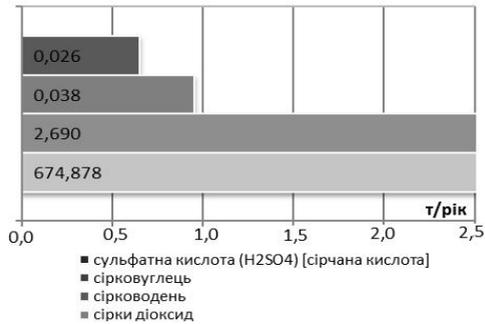
а



б

Рисунок 1.6 – Кількість викидів неметалевих легких органічних сполук заводу «ЄВРАЗ ДМЗ»: а – 2016 р.; б – 2017 р.

На рисунку 1.6 представлено розподіл неметанових легких органічних сполук. Можна бачити кількість бензолу, фенолу, нафталіну, толуолу зменшилося в 1,3 рази, а кількість ксілолу і ацетону збільшилося в 1,5 разів.



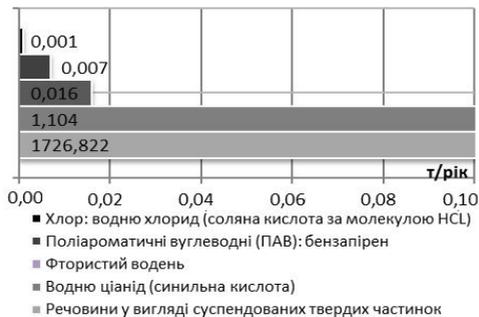
a



б

Рисунок 1.7 – Кількість викидів діоксиду та сполук сірки заводу «ЄВРАЗ ДМЗ»: а – 2016 р.; б – 2017 р.

На рисунку 1.7 представлено розподіл сполук сірки. Можна спостерігати зменшення кількісного розподілу: сірчана кислота зменшилась на 14 %, сірковуглець – на 8 %, сірководень – на 12 %.



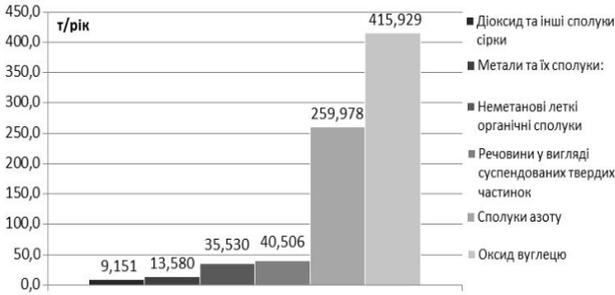
a



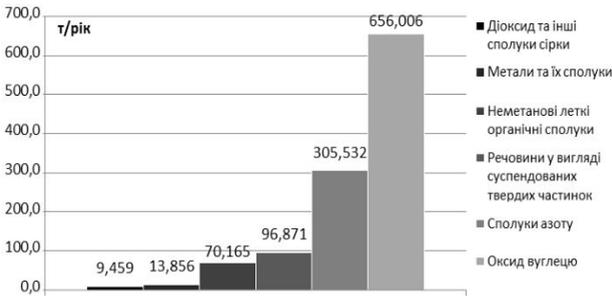
Рисунок 1.8 – Кількість викидів інших сполук заводу «СВРАЗ ДМЗ»: а – 2016 р.; б – 2017 р.

На рисунку 1.8 представлено розподіл хлору, бензапірену, фтористого водню, синильної кислоти та речовин у вигляді суспендованих твердих частинок, спостерігається їх загальний зріст: хлору у 2 рази, бензапірену на 14 %, фтористого водню на 75 %, синильної кислоти на 72 %, суспендованих твердих частинок на 14 %.

За даними Головного управління статистики у Дніпропетровській області [63], підприємством «Інтерпайп Нижньодніпровським трубопрокатним заводом» у загальній кількості було вироблено 775,763 т/рік різноманітних шкідливих речовин без урахування діоксиду вуглецю (11450,789 т/рік) за 2016 рік та 1153,069 т/рік різноманітних шкідливих речовин без урахування діоксиду вуглецю (8448,176 т/рік) за 2017 рік. На діаграмах (рис. 1.9–1.13) наведено кількісні показники різних сполук, які надходять в атмосферу від даного підприємства. На рисунку 1.9 показано розподіл викидів заводу «Інтерпайп НТЗ» за хімічною класифікацією: діоксиду та складових сірки, металів та їх сполук, неметалевих летких органічних з'єднань, речовин у вигляді суспендованих твердих частинок, складових азоту та оксиду вуглецю.



а

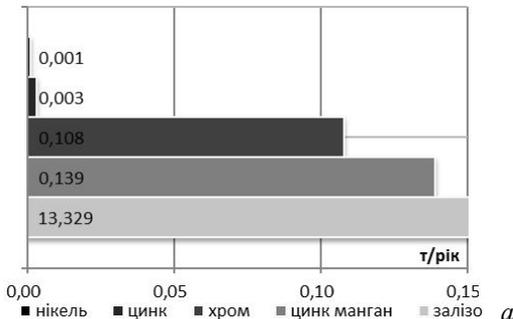


б

Рисунок 1.9 – Кількість викидів заводу «Інтерпайп НТЗ» за хімічною класифікацією: а – 2016 р.; б – 2017 р.

Спостерігається загальний зріст усіх цих елементів, а саме: діоксиду та складових сірки на 4 %, металів та їх сполук на 2 %, неметалевих летких органічних з'єднань на 97 %, речовин у вигляді суспендованих твердих частинок на 139 %, складових азоту на 18 %, оксиду вуглецю на 58 %.

На рисунку 1.10 представлено кількісний розподіл металів та їх сполук, спостерігається зменшення хрому на 12 %, зріст мангану та 22 %, зріст заліза на 2 %.



а

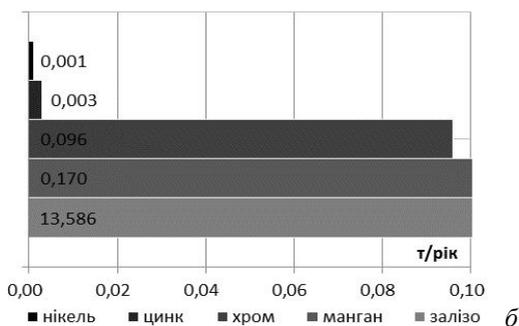


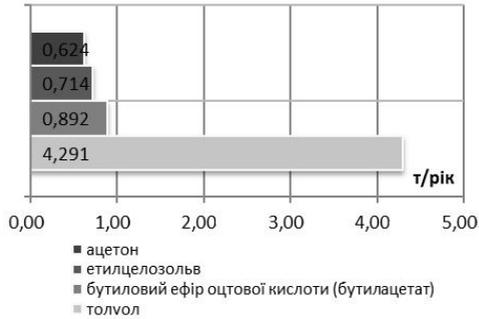
Рисунок 1.10 – Кількість викидів металів та їх сполук заводом «Інтерпайп НТЗ»: а – 2016 р.; б – 2017 р.

На рисунку 1.11 наведено кількісний розподіл сполук азоту: азотної кислоти зменшилося у 2 рази, оксиду азоту збільшилося на 43 %, оксидів азоту зменшилося на 15 %.

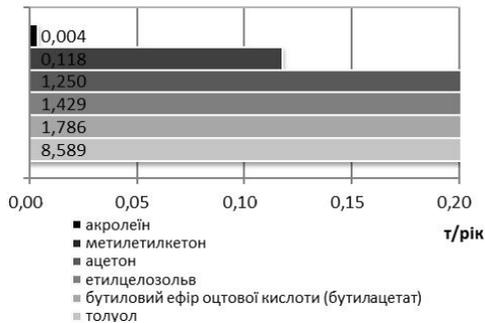


Рисунок 1.11 – Кількість викидів сполук азоту заводом «Інтерпайп НТЗ»: а – 2016 р.; б – 2017 р.

На рисунку 1.12 представлено кількість викидів неметанових летючих органічних сполук: ацетона, етилцелозольва, бутилового ефіру оцтової кислоти толуол. Кожна із компонент збільшилася у 2 рази, до того ж з'явилися додаткові речовини: акролеїн, метилетилкетон.



а



б

Рисунок 1.12 – Кількість викидів неметалевих летючих органічних сполук заводом «Інтерпайп НТЗ»: а – 2016 р.; б – 2017 р.

На рисунку 1.13 наведено розподіл інших сполук (фреонів, хлориду водня, флористого водня, метану, озону, сажі, сірчаної кислоти) та показано їх зміну за два роки. Кількість хлориду водню зросла на 3 %, флористого водню на 24 %, метану на 16 %, озону на 11 %, сажі на 20 %, сірчаної кислоти на 3 %.

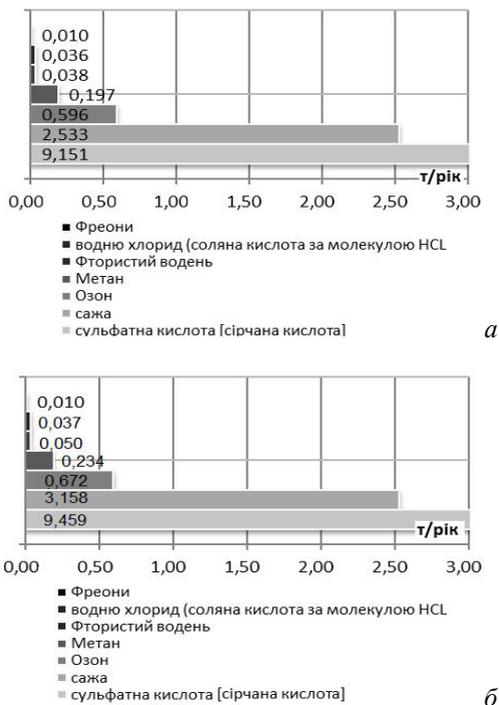
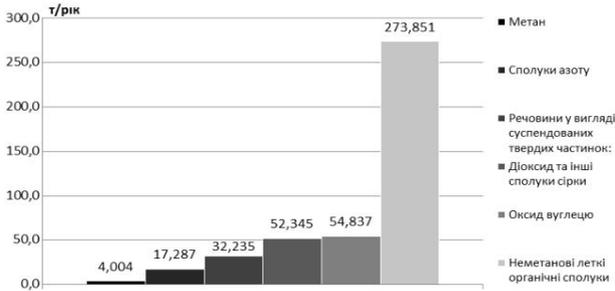


Рисунок 1.13 – Кількість викидів інших сполук заводом «Інтерпайп НТЗ»:
а – 2016 р.; *б* – 2017 р.

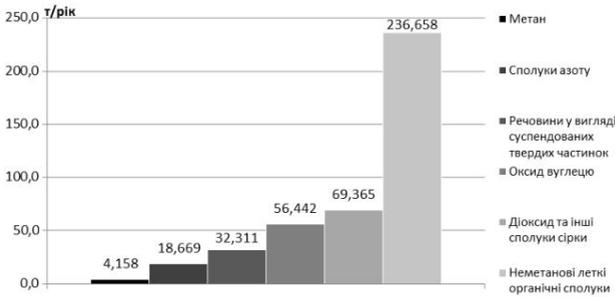
За даними Головного управління статистики у Дніпропетровській області [63], підприємством «Дніпропетровським олійноекстракційним заводом» у загальній кількості було вироблено 434,633 т/рік різноманітних шкідливих речовин без урахування діоксиду вуглецю (34899,927 т/рік) за 2016 рік та 417,7 т/рік різноманітних шкідливих речовин без урахування діоксиду вуглецю (36563,991 т/рік) за 2017 рік. На діаграмах (рис. 1.14–1.17) показано різні сполуки, які надходять в атмосферу за їх класифікацією.

На рисунку 1.14 представлено порівняльний викидів заводу «Олейна» за хімічною класифікацією: метану, сполук азоту, речовин у вигляді суспендованих твердих частинок, діоксиду та складових сірки, оксиду вуглецю, неметалевих летких органічних з'єднань. Спостерігається наступна динаміка зміни цих елементів, а саме: метану збільшилося на 4 %, сполук азоту – 8 %,

речовин у вигляді суспендованих твердих частинок на 1 %, діоксиду та складових сірки – 8 %, оксиду вуглецю –27 %, неметалевих летких органічних з'єднань зменшилося на 14 %.



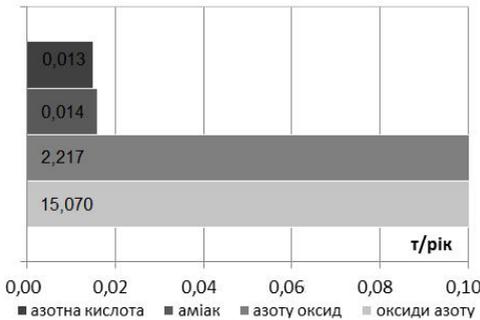
a



b

Рисунок 1.14 – Кількість викидів заводу «Олейна» за хімічною класифікацією: а – 2016 р.; б – 2017 р.

На рисунку 1.15 наведено кількісний розподіл сполук азоту: азотної кислоти зменшилося у 2 рази, оксиду азоту збільшилося на 43 %, оксидів азоту зменшилося на 15 %



a

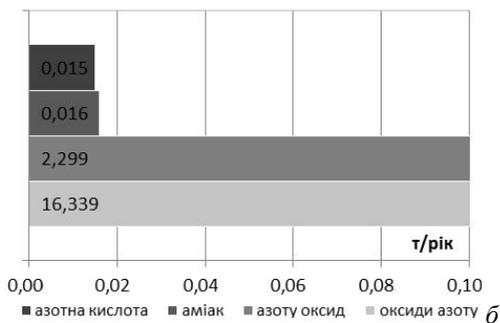
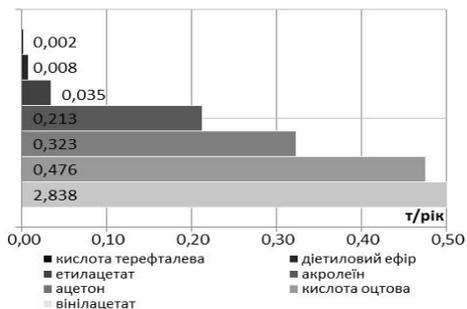


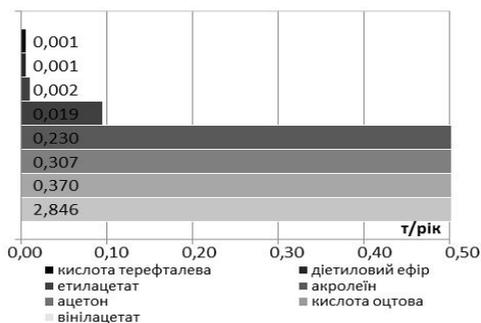
Рисунок 1.15 – Кількість викидів сполук азоту заводом «Олейна»:

a – 2016 р.; *б* – 2017 р.

На рисунку 1.16 представлено кількісний склад викидів неметанових летючих органічних сполук: кислоти терефталової, етилацетату, ацетону, діетилового ефіру, акролеїну, кислоти оцтової.



a



б

Рисунок 1.16 – Кількість викидів неметанових органічних сполук заводом «Олейна»: *a* – 2016 р.; *б* – 2017 р.

Кожна із компонент змінюється наступним чином: кислота терефталова зменшилася у 2 рази, етилацетат зменшився у 4 рази; ацетон зменшився на 46 %, діетиловий ефір на 5 %, акролеїн на 22 %, до того ж кислота оцтова майже не змінилася, підвищилися значення менше як на 1 %. На рисунку 1.17 наведено розподіл інших сполук (металів та їх поєднання, метану, озону, оксиду азоту, сажі, діоксиду та сірчаної кислоти) та показано їх зміну за два роки. Кількість металів та їх поєднань зменшилося 37 разів, діоксиду та інших сполук сірки збільшилося на 27 %; сажі зменшилося у 8 разів, оксиду азоту – у 6,5 разів, метану понад 80 разів.

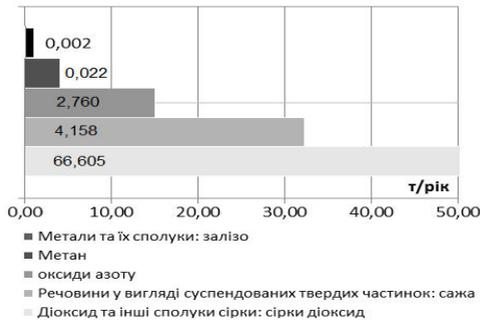
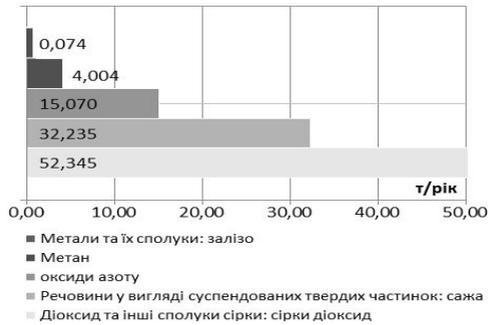


Рисунок 1.17 – Кількість викидів інших сполук заводом «Олейна»: *a* – 2016 р.; *б* – 2017 р.

Підприємства гірничо-металургійного і паливно-енергетичного комплексів є основними джерелами забруднення об'єктів навколишнього середовища [230]. Щорічно в результаті їх функціонування в навколишнє

середовище надходить до 35 % забруднень від усіх стаціонарних джерел. Це призводить до значного забруднення територій прилеглих до промислових підприємств. Встановлено високі рівні забруднення об'єктів навколишнього середовища в районах функціонування металургійних підприємств. Одним з основних забруднювачів навколишнього середовища при роботі гірничо-металургійних і енергетичних підприємств є сполуки сірки. Найбільш небезпечним для життя і здоров'я людей є діоксид сірки SO_2 , що утворюється при спалюванні органічного палива (вугілля, нафти), що містить сірку, а також при промисловій переробці сіромісткої сировини. Причому викиди діоксиду сірки, обумовлені роботою теплоенергетичних установок, що спалюють органічне паливо, перевищують 100 млн. т на рік [188].

Більше 60% виділяється кількості SO_2 обумовлено спалюванням вугілля і нафти. У зв'язку з вимогами до зниження забруднення повітря SO_2 нафта з низьким вмістом сірки користується великим попитом і тому продається за вищою ціною. Вугілля, що містять знижену кількість сірки, мають більш низьку питому теплоту згорання, тому в розрахунку на одиницю теплоти, що виділяється, відмінність в вмісті сірки нівелюється.

Шкідливий вплив викликається не тільки самим діоксидом сірки, основний збиток наносить триоксид сірки SO_3 , що утворюється при окисленні SO_2 . Діоксид сірки важко окислюється в чистому повітрі. Однак у присутності пилоподібних частинок оксидів металів під впливом O_2 діоксид сірки дуже швидко перетворюється в SO_3 . Реакція протікає на поверхні частинок, які грають роль гетерогенного каталізатора. У викидних газах міститься значна кількість тонкоподрібнених твердих речовин – золи, що знаходиться в підвішеному стані в повітрі. Окисленню SO_2 також сприяє наявність в повітрі крапельок вологи, а розчинений у воді SO_2 окислюється досить швидко [161].

Наслідкам функціонування великих гірничо-металургійних і енергетичних підприємств на міських територіях присвячені роботи В. А. Батлук, В. С. Бахарева, Р. В. Галич, Ю. В. Піцик, І. В. Прискореного, А. Г. Шапаря, В. М. Шварцмана, О. Р. Якуби та ін.

Пересувні джерела забруднення (автомобілі) характеризуються: високими темпами зростання чисельності автомобілів в порівнянні з ростом кількості стаціонарних джерел; їх просторовою розосередженістю; безпосередньою близькістю до житлових районів; більш високою токсичністю викидів автотранспорту в порівнянні з викидами стаціонарних джерел; низьким розташуванням джерела забруднення від земної поверхні. В наслідок цього відпрацьовані гази автомобілів накопичуються в зоні дихання людей і повільніше розсіюються вітром в порівнянні з промисловими викидами. Дані особливості пересувних джерел призводять до того, що автотранспорт створює в містах великі зони зі стійким перевищенням норм забруднення повітря.

Вміст шкідливих речовин у відпрацьованих газах (ВГ) регламентують два стандарти ДСТУ 4276:2004 «Норми і методи вимірювань задимленості у відпрацьованих газах автомобілів з дизелями або газодизелями» і ДСТУ 4277:2004 «Норми і методи вимірювання вмісту оксиду вуглецю та вуглеводнів у відпрацьованих газах автомобілів, що працюють на бензині або газовому паливі». У відпрацьованих газах автомобілів міститься понад 170 шкідливих компонентів, з них 160 – похідні вуглеводнів, що утворюються при неповному згорянні палива. До недавнього часу найнебезпечнішими з них вважали окис вуглецю CO і незгорілі вуглеводні, однак дослідження останніх років примушують поглянути на проблему інакше.

Так, оксиди азоту NO_x , викиди яких набагато менші (0–0,8 % сумарного викиду) в 80 разів більш токсичні, ніж чадний газ CO . Оксидів азоту п'ять типів, але за кількістю найбільш поширені NO і NO_2 . Самі по собі вони не є небезпечними, але легко з'єднуються з водою, утворюючи азотисту і азотну кислоти, які дуже шкідливі для організму. За кордоном шкідливу дію NO_x враховано нормами, там каталітичний нейтралізатор – обов'язковий компонент автомобіля, але в нашій країні зміст NO_x для автомобільних засобів, що знаходяться в експлуатації, не регламентується. Дуже шкідливий бенз(а)пірен (БП), який викидають і бензинові двигуни, і дизелі. Також обидва типи двигунів викидають сажу, яка, хоч сама по собі і не токсична, але адсорбує на

своїй поверхні циклічні вуглеводні, частина яких представляє собою канцерогени.

Основний склад забруднювачів повітря включає в себе оксиди вуглецю, сірки, азоту (CO , CO_2 , SO_2 , NO_x), різні вуглеводні (CN , HM), альдегіди (фенол, формальдегід) та ін. За характером впливу на організм шкідливі речовини класифікуються на загальнотоксичні, дратівливі, сенсibiliзуючі, канцерогенні і мутагенні.

Оксид вуглецю CO впливає головним чином на нервову і серцево-судинну системи, з'єднуючись з гемоглобіном крові, позбавляє його здатності переносити кисень до тканин і викликає задуху.

Оксиди азоту NO , N_2O_3 , NO_2 , N_2O_5 надають подразнюючу дію на органи дихання, викликаючи кашель, блювоту, іноді головний біль.

Діоксид сірки SO_2 викликає подразнення слизової оболонки очей і дихальних шляхів, створює неприємний смак в роті.

Вуглеводні (пари бензину, пентан, гексан та ін.) мають наркотичною дією, знижують активність, викликають головний біль, запаморочення, кашель.

Бенз(а)пірен $C_{20}H_{12}$ має канцерогенні властивості, він міститься в сажі, димових газах і відпрацьованих газах автомобілів, провокує ракові захворювання.

Альдегіди викликають подразнюючу дію на очі і дихальні шляхи, а при значних концентраціях – головний біль, слабкість, втрату апетиту, безсоння та ін.

Постійне збільшення викидів оксидів азоту в атмосферне повітря пов'язано: з розвитком автотранспорту; з тенденцією більш повного використання палива, що призводить до збільшення викидів NO_x з ростом температури при більш ефективній роботі двигуна; зі збільшенням швидкості руху автотранспорту, в результаті чого NO_x зростає нелінійно. У зв'язку з цим антропогенне забруднення атмосферного повітря оксидами азоту приймає критичний характер в промислових густонаселених містах з великою мережею автомобільних доріг.

Але потрапляння NO_x обумовлене не тільки автотранспортом, але і

викидами підприємств. Так, згідно з даними екологічного паспорта м. Дніпра до основних стаціонарних промислових джерел забруднення атмосферного повітря викидами NO_x належать підприємства (табл. 1. 3).

Таблиця 1.3 – Підприємства м. Дніпра з найбільшими викидами NO_x

Назва об'єкту	Всього викидів, NO_x , т/рік	До загального об'єму викидів об'єкту, %	До загального об'єму викидів (населеного пункту) об'єкту, %
Придніпровська ТЕС	15399,971	18,7	84,3
Дніпровський меткомбінат	4003,362	3,7	62,2
Дніпропетровський металургійний завод ім. Петровського	1066,608	11,9	5,8
Нижньдніпровський трубопрокатний завод «Інтерпайп»	437, 807	28,6	2,4
Дніпродзержинський коксохімічний завод	413,750	32,7	4,1

Можна зробити висновок, що працівники на промислових майданчиках та на відкритій місцевості промислових регіонів, одночасно потрапляють під дію шкідливих викидів підприємств та автотранспорту.

Оцінка рівня забруднення атмосферного повітря в робочих зонах працівників на промислових майданчиках та на відкритій місцевості промислових регіонів з урахуванням впливу викидів від промислових підприємств і автомагістралей є досить складною задачею як з математичної точки зору, так і в чисельній реалізації.

В даний час використовуються: емпіричні моделі – нормативна методика OND-86 (All-Union normative document – 86) The Methods of Calculations for the Concentration of Harmful Substances in the Atmospheric Air from Enterprises Wastes; аналітична модель Гаусса [188] і її різновиди [54], чисельні моделі [187].

Модель гаусовського розподілу концентрації реалізовано в моделях

CAL3QHC и ISC-3, з урахуванням факторів хімічних реакцій ADMS-3, AVASTA-II, MESOPUFF-II, в європейських моделях STACKS (Нідерланди, Іспанія, Польща), IDFM (Бельгія), OML (Данія), ONM 9440 (Австрія), CALPUFF (США).

Для оцінювання нормативних умов праці у житловій забудові в зоні впливу викидів газів, що відходять від печей випалу виконано розрахунок рівня приземних концентрацій забруднюючих речовин в атмосферному повітрі з використанням програмного комплексу «ПЛЕНЕР-1.25» [176]. В роботі [173] встановлено ефективність зменшення негативного впливу коксохімічних підприємств на навколишнє середовище.

За кордоном розрахунки рівня забруднення атмосферного повітря різними видами домішок, що потрапляють від постійно діючих стаціонарних джерел забруднення, проводяться також на основі емпіричних, аналітичних моделей Гауса та їх модифікацій [245, 249].

Емпіричні та аналітичні моделі дозволяють розраховувати поле концентрації забруднюючої речовини при стаціонарному точковому джерелі забруднення. Використання чисельних моделей, заснованих на вирішенні рівнянь Нав'є-Стокса з урахуванням різних моделей турбулентності для даного класу задач здійснюється, як правило, на дорогих програмних пакетах типу Ansys.

Тому виникає необхідність розробки методики оцінювання детальності просторового розподілу забруднення атмосферного повітря шкідливими домішками, які викидаються великими промисловими підприємствами та автотранспортом з урахуванням їх взаємовпливу.

При вирішенні даного класу задач виконуються дослідження по вивченню зміни концентрації в атмосферному повітрі домішок, які надійшли або від стаціонарних джерел, або від пересувних джерел з урахуванням або без урахування процесу їх хімічного перетворення в атмосфері [50, 53–54].

Як за кордоном, так і на Україні розрахунки проводяться на основі емпіричних або аналітичних моделей, або на основі чисельних моделей готових

програмних пакетів [169, 208, 218, 251]. У даних роботах розглядається ряд факторів, що впливають на стан атмосферного повітря міста, пропонуються ефективні методи по зменшенню техногенного навантаження. Вплив автотранспорту на умови проживання населення у великих промислових центрах описано в роботі [183]. Для підвищення ефективності уловлювання забруднюючих речовин з вихлопними газами автотранспорту авторами роботи [81] розроблено математичну модель ефективності роботи фільтра твердих частинок, що враховує відповідні експлуатаційні характеристики.

Однак залишається актуальним питання про взаємовплив домішок, які надійшли від викидів промислових підприємств і автомагістралей, з одночасним урахуванням їх хімічної трансформації в атмосфері.

У промислових містах велике значення має прогноз ризиків для населення. Оцінкам ризиків при аваріях техногенного характеру присвячені роботи В. І. Голінко, Л. В. Драннікова, В. Ф. Стоєцького [61], аналізу ризиків при систематичному забрудненні атмосферного повітря небезпечними хімічними речовинами присвячені роботи В. В. Меньшикова, А. А. Швириєва, Т. В. Захарової [82], процеси хімічного перетворення викладені в роботах Н. Т. Overmana [218]. Очевидно, де має місце взаємодія домішок різного типу джерел ризик захворювання ще більше зростає, так як жителі цього регіону можуть не підозрювати, що знаходяться в зоні впливу кількох джерел. Виявити зони і оцінити можливі ризики можна за допомогою методів математичного моделювання.

Встановлення причинно-наслідкових зв'язків між станом навколишнього середовища і здоров'ям працівників в робочих зонах на відкритій місцевості є однією з основних проблем в охороні праці. З цією метою застосовують методи оцінювання ризику, як головного механізму розробки та прийняття управлінських рішень на регіональному рівні або на рівні окремого виробництва. В даний час за кордоном розробляються регіональні моделі ризику (ERF) [167] з використанням існуючих статистичних і детермінованих моделей розсіювання домішок або на основі просторової інтерполяції концентрації забруднювачів даної місцевості

[244]. На Україні розробляється інформаційна система для оцінювання та моделювання вмісту забруднюючих речовин в повітряному середовищі на основі багатокомпонентної ймовірнісної моделі розрахунку концентрації домішки [216].

Оскільки працівники промислових майданчиків, які знаходяться на відкритій місцевості, постійно перебувають під впливом шкідливих виробничих чинників підприємства та автотранспорту, то це значно погіршує функціонування органів людини та її складових, що в свою чергу призводить до захворювань, в тому числі і хронічних. Кожна шкідлива домішка при дії на організм людини викликає певні захворювання, робітник попадає під одночасний вплив різних домішок і виробничих чинників, які в цілому впливають на мозок, легені, серце, кров, судини:

- підвищення ризику інсультів, ішемії судин головного мозку, когнітивні розлади, підвищення ризику нейродегенеративних захворювань;

- погіршення стану під час хронічних обструктивних захворювань, зменшення функціональності легень, запалення легенів;

- негативні зміни у роботі серця, підвищення ризику проблем з серцевим ритмом, аритмія, ішемія міокарду;

- забруднення крові найменшими частками, погіршення кровотоку, погіршення стану під час захворювань периферичної судинної системи, тромбозу, зміна реологічних властивостей крові;

- погіршення стану під час атеросклерозу, звуження діаметру кровоносних судин та підвищення тиску;

- зменшення вірогідності запліднення, підвищення ризику викидня у жінок, проблеми розвитку плода, передчасні пологи.

Збереження здоров'я робітників – головний пункт усіх нормативно-правових документів з охорони праці, тому в дисертаційній роботі набула подальшого розвитку методологія оцінювання рівня хімічного забруднення повітря в робочих зонах на промислових майданчиках та відкритій місцевості, яка дозволяє врахувати хімічну трансформацію забруднюючих речовин на базі тривимірних рівнянь розрахунку полів концентрації домішки та виконати

оцінку ризику виникнення хронічних захворювань працівників.

1.3 Сучасні методи оцінювання вітрового режиму в робочих зонах та методи зменшення забруднення повітря

Мікроклімат – це поєднання параметрів стану атмосферного повітря, що впливає на організм людини: температури, вологості, швидкості руху повітря і теплового випромінювання нагрітих поверхонь [62]. Мікроклімат характеризується рядом особливостей, властивих обмеженим простором, він може змінюватися на відстані декількох десятків і навіть сотень метрів. Мікроклімат міста, кварталу, вулиці, парку впливає на організм, самопочуття і здоров'я людини. Стан здоров'я людини, як відомо, є опосередкованим показником стану навколишнього середовища. Для людини несприятливим є забруднення будь-якого середовища, з яким вона стикається. Якщо врахувати, що людина за добу споживає понад 9 кг повітря, то найбільшої шкоди її здоров'ю завдає забруднення атмосферного повітря. У зв'язку з цим, хвороби органів дихання мають найбільшу питому вагу в усіх країнах світу. Мікроклімат міста характеризується ускладненням циркуляції повітря, навіть якщо вулиці міста сплановані за напрямком пануючих вітрів. Температура повітря значно вище, ніж у прилеглих до міста сільських районах. Система міських вулиць і площ призводить до змін напрямку вітру в місті. Вітер переважно прямує уздовж вулиць. Загалом швидкість вітру в місті слабшає, але у вузьких вулицях посилюється; на вулицях і перехрестях легко виникають пилові вихори і поземки.

Автомобільний транспорт більш за все забруднює повітря міст. При стійкій стратифікації атмосфери, особливо при інверсіях температури, дим та пил може накопичуватися в приземному шарі атмосфери в такій кількості, що негативно впливає на стан здоров'я людини.

Мікроклімат міст відрізняється від клімату навколишньої місцевості за рахунок кам'яних і асфальтових доріг і високих будівель, які нагріваються і випромінюють тепло (середньорічна температура в місті вище на 1-3°C, а

відносна вологість нижче на 10-15%). Висхідні потоки над містом викликають в тишу погоду приплив прохолодного повітря від периферії до центру. Багатоповерхові будівлі в двічі зменшують швидкість вітру. Загазованість атмосферного повітря знижує сонячну і ультрафіолетову радіацію до 20-50%. Природні зелені масиви зменшують вплив вітру, знижують дію промислових і транспортних забруднень та шумів, виділяють у повітря фітонциди, кисень, постачають чисте повітря в міське середовище.

У зарубіжних роботах наголошується, що параметри мікроклімату мають неабияке значення для діяльності, що проводиться на відкритому повітрі [199]. Виконуються роботи з дослідження впливу житлових будівель на граничні умови мікроклімату в різних регіонах міста [147], впливу міського мікроклімату на тепловий комфорт у будівлях [242], впливу повітряного навантаження на будівлі та зміни мікроклімату за рахунок різного розташування та різної висоти будівель, що призводить до утворення вихорів різної потужності [198]. Друга низка досліджень стосується мікроклімату в закритих приміщеннях у робочих зонах працівників різної специфіки діяльності. Всі дослідження проводяться в рамках експериментів або в рамках чисельного моделювання досліджуваних повітряних процесів та навантажень, розсіювання забруднення, що виконуються в програмних пакетах SolidWorks, COMSOL Multiphysics, ANSYS, де використовуються різні можливості чисельного моделювання. У зв'язку з цим, залишається актуальною проблема розробки методів та комплексу розрахункових програм, що дозволяють розрахувати поле швидкості повітряного потоку, знайти розподіл концентрації забруднювача не тільки в робочій зоні, але і локально, на рівні органів дихання робітника, що знаходиться в цій зоні.

Вітровий потік на пішохідному рівні можна змоделювати в аеродинамічній трубі, але з появою обчислювальної техніки і чисельних методів можна точно змоделювати ті ж умови у віртуальному середовищі з використанням передових технологій моделювання, тобто за допомогою CFD моделей [163–165, 186, 212, 214, 220], які можуть забезпечити значні

економічні переваги при оцінці інженерних проектних рішень. CFD моделювання може бути використано для оцінювання поля швидкості вітру навколо будівель, а також для оцінки теплового комфорту, вентиляції повітря, впливу мікрокліматичних умов [237]. За останні два десятиліття поряд з удосконаленням CFD моделювання, багато досліджень зосереджені на чисельному моделюванні повітряного потоку близько однієї будівлі, їх дослідження показують складні явища потоку [165, 214, 220]. CFD моделювання ведеться на базі програмних пакетів, які вимагають для проведення розрахунків великих затрат часу, дуже дрібної сітки і універсальних моделей турбулентності [229] для розглянутого класу задач. В даний час для досліджень використовують комерційний код Fluent Code [212] і k-ε модель турбулентності [229], вибір якої заснований на рекомендаціях [165]. Ця модель турбулентності підтверджується дослідженнями, проведеними для умов на пішохідному рівні [163–164].

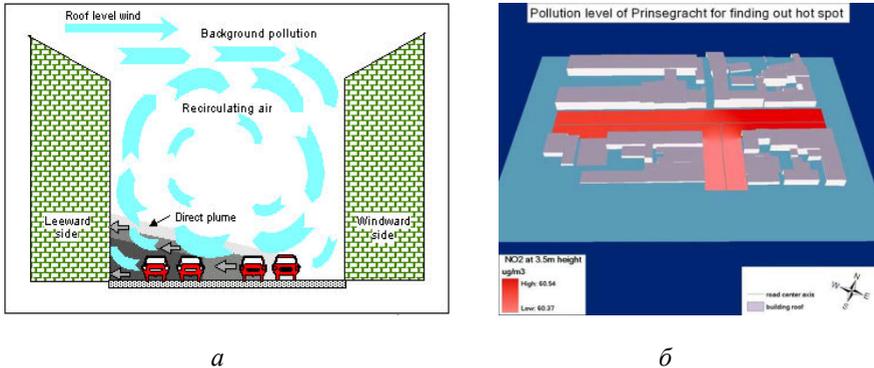


Рисунок 1.18 – Дослідження вітрового потоку та розподілу концентрації забруднення Berkowicz R. [153 – 154]

Також існують класичні аналітичні методи розрахунку взаємодії вітрових потоків з будівельними спорудами [9; 100]. 3D моделювання вітрового потоку та розрахунки концентрації забруднення рис. 1.18 проводилися Berkowicz R. [217–218] на основі моделі OSPM (Operational Street Pollution Model).

Забруднення повітря є проблемою, яка постає в різних масштабах. В деяких випадках необхідно збільшувати і враховувати якість повітря на рівні окремих вулиць, будівель і людей та їх робочих місць. Цей рівень деталізації називається мікрорівнем. Він враховується при дослідженні впливу дуже локалізованих джерел на якість повітря в безпосередній близькості. На рисунку 1.19 представлено застосування моделювання вітрового режиму в міській забудові, яке виконувалося за допомогою програмного комплексу ENVI-met 3.1, що описує процеси мезо- і мікромасштабної циркуляції повітря [90].

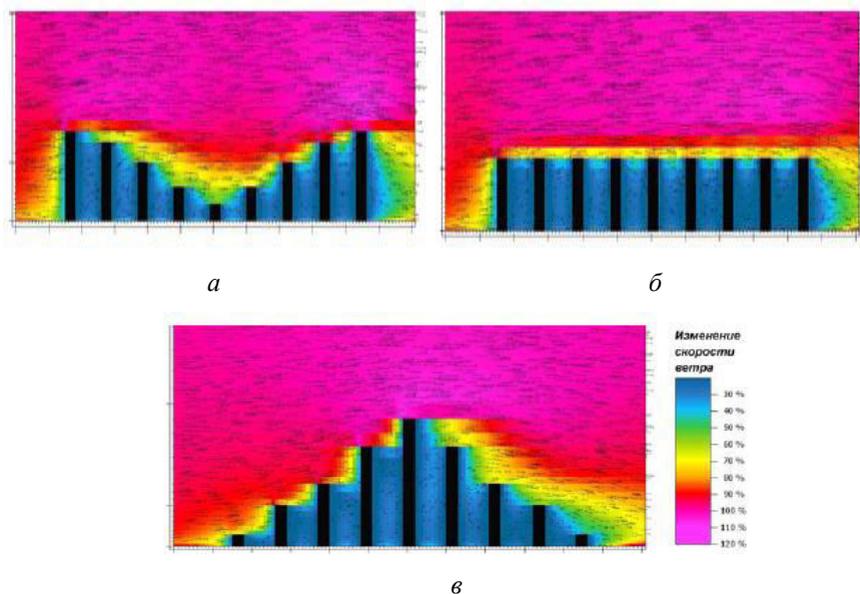


Рисунок 1.19 – Вертикальний переріз поля швидкості вітру (поздовжній) при динамічній конвекції: *а* – «місто-чаша», *б* – «місто-рівнина», *в* – «місто-холм» [90]

Розрахунки концентрації домішок виконувалися для отримання карт забруднення, що обумовлене викидами промислових підприємств (рис. 1.20) [252].

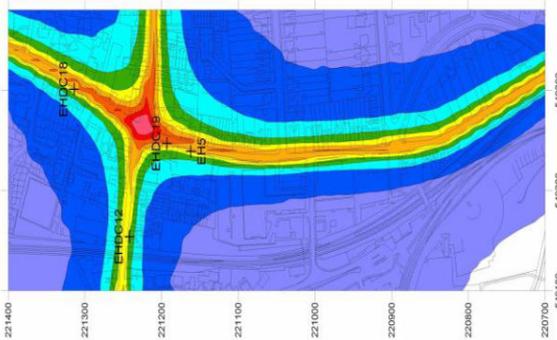


Рисунок 1.20 – Розподіл концентрації NO_2 у масштабі 1:5000 [252]

Моделювання вітрового потоку та розсіювання домішок в атмосферному повітрі також розглянуто в роботах [150–151, 168, 191, 247].

Багато досліджень стосуються оцінювання небезпеки для здоров'я людини, що перебуває в робочій зоні поблизу автомагістралі. В цілому, показано підвищений ризик розвитку астми та зниження функцій легенів. Зв'язок між знаходженням людини поблизу шосе та несприятливими наслідками для її здоров'я є суттєвим, тому залишається актуальною задача відносно розуміння точного характеру та масштабів ризиків. Такого плану дослідження можна проводити не лише на базі статистичних даних відносно кількості людей, що мають ті чи ті захворювання, але і за допомогою математичного моделювання на основі процесів чисельного розрахунку, що дозволяє оцінити ризик захворювання за допомогою передчасного аналізу поля концентрації забруднюючої величини. Слід також зазначити, що існує значна неоднорідність у типовому та кількісному навантаженні транспортними засобами автомагістралей. Значний вплив мають склад і розмір автотранспортного парку, які можуть варіюватися в залежності від часу доби, дня тижня і обмежень по використанню певних класів транспортних засобів. Важливу роль відіграє вік і стан транспортних засобів, використання дизельного палива чи бензину, наявність транспортних засобів, що мають каталітичні нейтралізатори. Усі ці фактори впливають на види і кількість забруднюючих речовин у викидах з вихлопних труб. Аналогічним чином,

хімічний склад палива і метеорологічні умови також істотно впливають на норми викидів, види і концентрації забруднюючих речовин, присутніх в придорожньому середовищі. Дослідження в роботі [170] показали, що на дорогах існують гострі градієнти забруднюючих речовин, їх концентрація і розподіл зменшуються майже в 5 разів в межах 30 м від проїжджої частини. Аналогічні спостереження були зроблені в роботах [228, 238] в Лос-Анджелесі. Вимірювалися швидкість і напрям вітру, обсяг трафіку, концентрація і розподіл CO зменшувалися між 17 м і 150 м за вітром від шосе. Дослідження в роботі [180] показують зміну концентрації забруднюючих речовин поблизу автомагістралей як взимку, так і влітку. Також показано зміну хімічного складу частинок поблизу автомагістралей за рахунок атмосферної трансформації при русі повітряних мас [233].

Місцеві відсмоктувачі здатні видаляти до 75 % всіх виділень шкідливих речовин, значно знижуючи їх надходження в зону дихання працюючих.



Рисунок 1.21 – Приклад розташування відсмоктувачів для відбору шкідливих домішок автотранспорту [235]

Забруднення атмосферного повітря і епідеміологічні дослідження показують несприятливі наслідки для здоров'я людини [152, 184]. Існує досить велика кількість робіт, присвячених математичному моделюванню процесу розсіювання забруднюючих речовин від автотранспорту з урахуванням зелених насаджень уздовж автомагістралей в житлових зонах міста. Однак всі ці дослідження не систематизовані і присвячені окремим питанням, наприклад, сорбції забруднюючих речовин листям, дослідженню по насажденню посадок для зниження рівня шуму. Широкий огляд за впливом зростання кількості рослинності, її пористості, поглинаємості і осадження представлений в роботі Janhäll [196]. Зосереджено увагу на озелененні вуличних каньйонів, замість

міських парків, які вимагають вільних просторів у щільно забудованих містах, у роботі [194] розглянуті характеристики рослинності (площа листа, пористість і т. д.), які грають ключову роль і повинні бути враховані при проектуванні зелених насаджень. В роботі [171] на основі експериментів в аеродинамічній трубі була розроблена нова методика моделювання ефектів від рослинності для дослідження аеродинаміки будівель і навколишнього середовища, заснована на теорії подібності та аналізі розмірностей. Ця методика дає можливість на малих масштабах моделювати вплив рослинності різних типів на поширення домішки. Експеримент показав, що дерева в центрі каньйону створюють несприятливі умови, що заважають природній вентиляції каньйону, і призводять до накопичення шкідливих речовин з підвітряного боку каньйону. Проведено параметричні дослідження впливу пористості крони на рух повітря, які показали, що пористість у даному випадку не має значного впливу на рух повітря і поля концентрації. Одним із варіантів зниження концентрації забруднюючих речовин є реалізація зелених стін в міських каньйонах. Дослідження стосуються вивчення структури обтікання потоком рослинності (рис. 1.22).



Рисунок 1.22 – Дослідження зон забруднення біля автотраси при наявності дерев [235]

Ця альтернатива була досліджена Pugh (2012) [148] з використанням моделі хімічної взаємодії і осадження у вуличних каньйонах під назвою City-Street. Запропоновано чисельну модель, що реалізована в програмі COMSOL Multiphysics 5.2, яка може бути використана для оцінювання впливу зелених насаджень на скорочення забруднення в міських регіонах. Модель може бути

легко адаптована до різних видів рослин і форми зелених насаджень [232]. Різні моделі з урахуванням рослинності розглянуті в роботах [190, 200, 205].

Міська рослинність може сприяти зменшенню концентрацій забруднюючих речовин в містах, хоча поточні процентні показники видалення домішки дуже низькі. Хвойні дерева краще вловлюють забруднюючі частинки, ніж листяні дерева, так як зберігають своє листя протягом усього року і мають дуже високі площі поверхні.

Деякі дослідження показують, що посадка дерев у безпосередній близькості від джерела забруднення (автомагістралей), більш ефективна, ніж віддалено від нього. Пізні дослідження показують зменшення розсіювання забруднюючих речовин, коли занадто багато дерев. Загальні концентрації забруднюючих речовин можуть бути збільшені до 40 % в залежності від діаметра і об'єму крони, висоти стовбура і проникності листяного покриву. Велика увага приділяється вивченню аеродинамічних процесів [92], пов'язаних з обтікання будівель, так як утворення вихорів і їх інтенсивність істотно впливають на процес винесення домішок з робочої зони.

Існують CFD моделі для оцінювання впливу рослинності на зниження рівня забруднення атмосферного повітря, але вони вимагають великих витрат комп'ютерного часу на практичну реалізацію, що не зручно при проведенні серійних розрахунків [190, 200–201, 205].

Для практичних цілей важливо мати методи та математичні моделі чисельного розрахунку для оцінювання ефективності застосування рослинності, екранів, усмоктувачів при зниженні рівня забруднення повітря в робочих зонах, які б враховували перелічені вище фактори та були швидкоореалізуємі. В дисертаційній роботі розроблено методи та технологічні засоби зниження загазованості в робочих зонах:

– чисельно-аналітичний метод, який дозволяє проводити дослідження по ефективності застосування на промислових майданчиках біля автомагістралей екранів, які використовуються для зменшення рівня забруднення повітря в робочих зонах при виконанні робіт;

– метод зниження загазованості в робочих зонах з урахуванням впливу рослинності (екоінжинірингу) на формування зон забруднення та зниження рівня хронічних захворювань для забезпечення санітарно-гігієнічних норм повітряного середовища на відкритих майданчиках промислових підприємств;

– технологія зниження хімічного забруднення в робочих зонах за рахунок використання дворівневих усмоктувачів та спеціальних напрямних пластин, і на базі цієї технології створено чисельний метод для оцінювання ефективності використання дворівневих усмоктувачів;

– методологія розрахунку процесу нейтралізації чадного газу в спеціальній камері, що використовується з метою зменшення рівня хімічного забруднення робочих зон.

1.4 Методи моделювання та оцінювання параметрів повітряного середовища в робочих зонах

Для вирішення таких практичних завдань, як оцінка комфортності мікроклімату або визначення потрібної потужності системи, що забезпечують мікроклімат, необхідно визначати розподіл параметрів мікроклімату в робочій зоні і їх зміну в часі. У цьому випадку користуються моделюванням процесів або відтворенням їх методами, що адекватно відображають умови протікання процесів в реальності “натурі”.

Моделювання переслідує такі цілі:

- дослідні, для поглибленого вивчення процесів формування або розробки нових технологій забезпечення мікроклімату;
- розрахункові, для визначення параметрів встановлення системи забезпечення мікроклімату в розрахункових умовах і режиму функціонування системи в експлуатаційних умовах.

Для моделювання процесів формування мікроклімату зазвичай застосовують три види моделювання:

- математичне моделювання на основі вирішення системи рівнянь в диференціальній або алгебраїчній формі, що описує повітряний, вологісний і газовий режим робочої зони;
- фізичне моделювання в натурних умовах або на геометрично подібних натурному об'єкту моделях, на які фізичні процеси переносяться за допомогою масштабних співвідношень;
- аналогове моделювання – різновид фізичного, коли реальні процеси замінюються іншими, що мають формально аналогічний математичний опис.

Математичне моделювання являє собою фізичні процеси в спрощеному ідеалізованому вигляді. Реальність і достовірність фізичних процесів забезпечує фізичне моделювання.

Фізичне моделювання здійснюється в натурних умовах і на геометрично подібних моделях. Натурні дослідження проводять на діючих об'єктах. Можливі разові обстеження і тривалі спостереження (моніторинг) за об'єктом.

Однак в натурних умовах важко встановити закономірності тих чи інших процесів через велику кількість перешкод випадкового характеру; при цьому важливо забезпечити тривале спостереження і вивчення об'єкта (за допомогою сучасних вимірювальних і обчислювальних приладів).

Крім дорогих натурних обстежень, можливе проведення досліджень в лабораторних умовах на моделях, подібних натурному об'єкту. Лабораторно-модельний метод має низку переваг і недоліків:

переваги

- можливість вивчення не створених ще в натурі об'єктів;
- можливість систематичного вивчення впливу будь-якого фактору з усієї сукупності факторів;
- можливість вивчення явищ, що швидко плінуть;

недоліки

- закономірно поширювати результати моделювання можна тільки на подібні явища;

– значні витрати часу на виготовлення моделей та проведення експериментів;

– великі матеріальні витрати на дороге устаткування та лабораторне оснащення.

На рисунку 1.23 показано проведення лабораторних експериментів в аеродинамічній трубі [235].

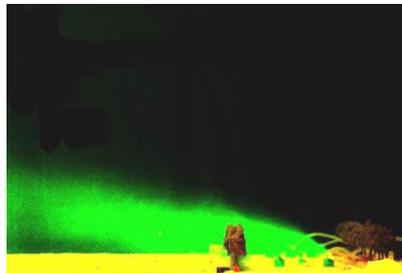
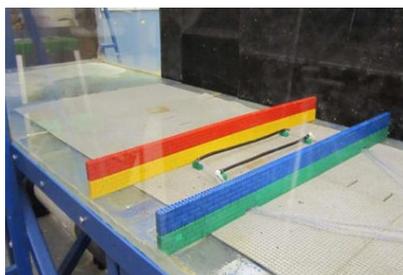
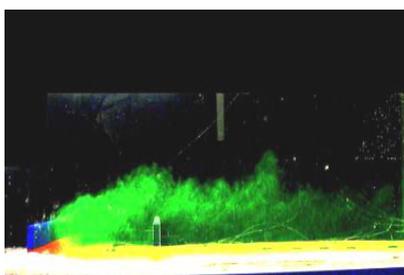
*a**б**в**г*

Рисунок 1.23 – Експериментальні дослідження в аеродинамічній трубі: *a* – модель рослинності, *б, г* – експеримент, *в* – модель споруд [235]

Математичне моделювання базується на розв’язанні системи рівнянь руху, балансу тепла і маси газових домішок в диференціальній формі в часткових похідних. Система рівнянь доповнюється крайовими умовами, до складу яких входять граничні і початкові умови. Рішення системи дозволяє визначити тривимірний розподіл параметрів мікроклімату і їх зміну в часі. До них відносяться: аналітичні методи і чисельні методи.

Аналітичний метод – метод Гауса і його модифікації розв’язують спрощенні рівняння переносу домішки з урахуванням точкового постійного джерела викиду та точкового миттєвого джерела викиду. В цих методах не враховується зміна профілю швидкості вітру з висотою, коефіцієнти дисперсії визначені емпірично, але не для усіх регіонів [148–149, 177–178, 192, 206, 210–211, 221–222, 234, 236, 246].

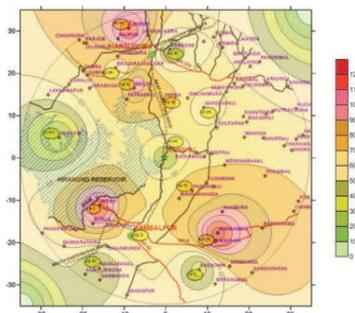


Рисунок 1.24 – Індекс якості повітря промислової зони [236]

У роботі О. Mărunțălu [206] розглянута математична модель розсіювання забруднюючих речовин у повітрі, що утворюються при спалюванні палива електростанцією рис. 1.25.

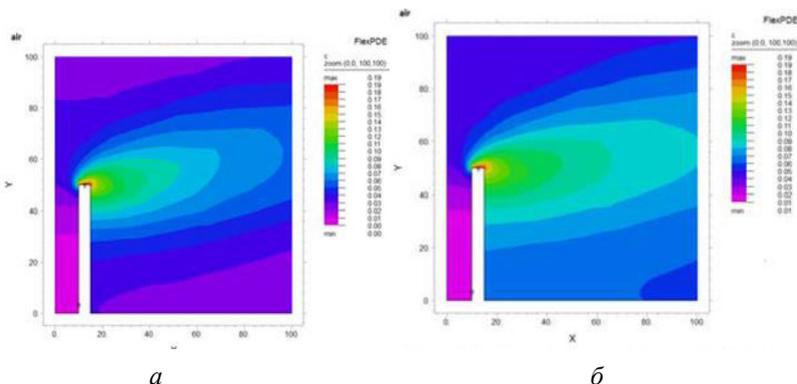


Рисунок 1.25 – Поле концентрації в різні моменти часу [206], 2015 р.:
 $t=50$ с, $t=100$ с

Просторово-часовий розподіл забруднюючих речовин описано моделлю Гауса, а математичне моделювання виконується в програмному комплексі FlexPDE, що дозволяє розрахувати поле концентрації в різні моменти часу рис. 1.25 [206].

Багато країн відчуває погіршення якості повітря і майбутній економічний розвиток призведе до проблем з управлінням якістю повітря. Сценарії галузевих викидів дрібнодисперсних речовин були розроблені і оцінені шляхом моделювання з використанням моделі GEOS-Chem (Індія). Виконано оцінку моделі шляхом порівняння розрахункових значень концентрації із значеннями на місці спостереження рис. 1.26 [234].

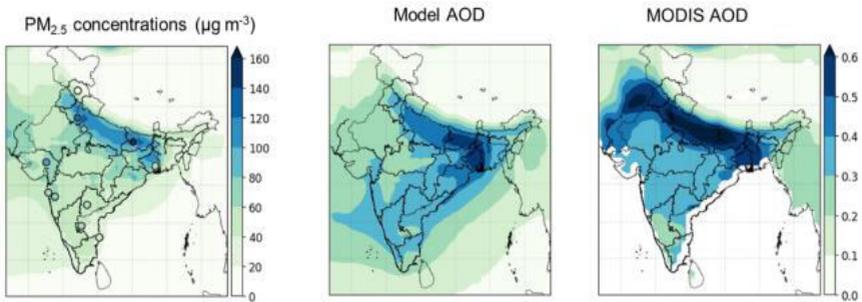


Рисунок 1.26 – Порівняння розрахункових даних із даними спостереження [234]

Аналітичний метод – метод Лагранжа та різні його модифікації, в цих моделях рух частинок досліджується згідно їх траєкторій, вони використовуються для масштабних переносів, а саме «ARCO», «MOE», «NAME», «QWIC» (рис. 1.27).

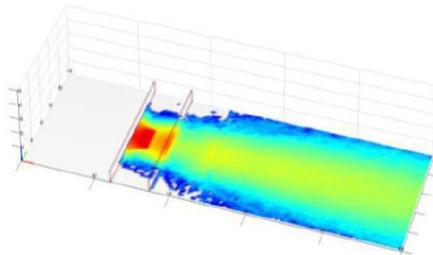


Рисунок 1.27 – Розподіл концентрації забруднення [235]

Чисельні методи – найбільш ефективний інструмент вирішення прогнозних задач, пов'язаних з забрудненням робочих зон на відкритій місцевості. В них виділяють: URB – 3D Wind Model, CFD (CWE) – Computational Fluid Dynamics Model. Дані моделі дозволяють оперативно розраховувати динаміку забруднення повітря в робочих зонах та на прилеглий території з урахуванням основних фізичних факторів, що впливають на перенесення домішки.

Забруднення повітря є проблемою, яка постає в самих різних масштабах. В деяких випадках необхідно збільшувати і враховувати якість повітря на рівні окремих вулиць, будівель і людей та їх робочих місць. Цей рівень деталізації називається мікрорівнем. Він враховується при дослідженні впливу дуже локалізованих заходів на якість повітря в безпосередній близькості від робочих зон на відкритій місцевості.

CFD моделі в першу чергу призначені для моделювання потоку вітру навколо об'єктів. У контексті мікомасштабної якості повітря ці об'єкти зазвичай складаються з будівель, дерев, автомобілів, еcranів та інше.

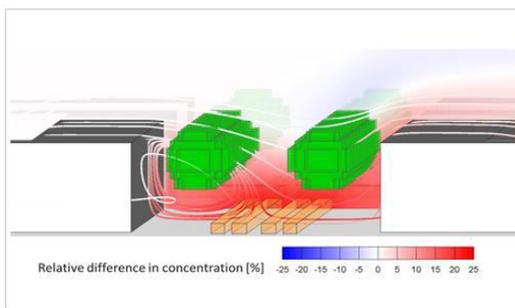


Рисунок 1.28 – CFD моделювання впливу міської рослинності на забруднення повітря і впливу шуму [195], Швеція

Три кроки в симуляції CFD якості повітря: створення тривимірної геометрії; моделювання поля вітру; моделювання розсіювання забруднюючих речовин (рис. 1.28). CFD моделі характеризуються високим рівнем деталізації:

крок по просторовій координаті складає близько 1 м або навіть менше. Змодельована область зазвичай обмежена областю довжиною до 1 км.

Слід підкреслити, що за кордоном для задач CWE моделювання вітрового потоку використовуються рівняння Нав'є-Стокса – одна з фундаментальних моделей аеродинаміки. Чисельні моделі дають можливість відтворювати процес забруднення повітря близько до фізичного експерименту (рис. 1.29).

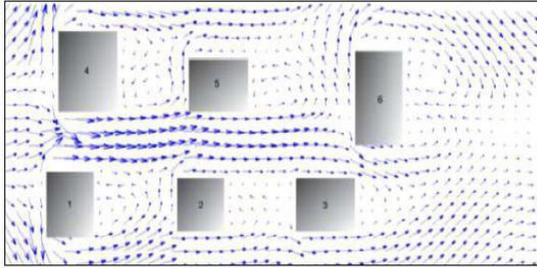


Рисунок 1.29 – Розрахунок поля швидкості на базі рівнянь Нав'є –Стокса [235]

FLUENT – це багатоцільове комерційне програмне забезпечення CFD, яке широко використовується для моделювання потоку та розсіювання домішки для міських застосувань.

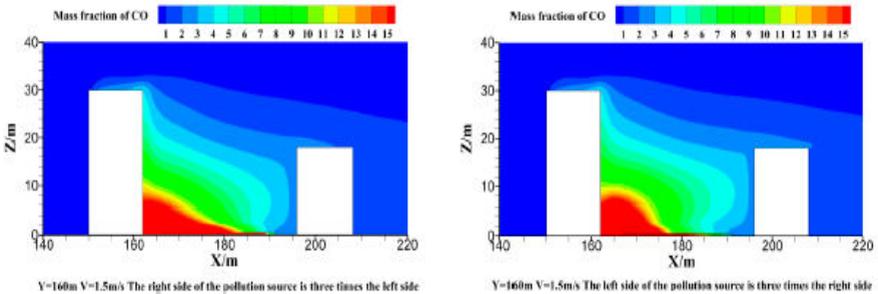


Рисунок 1.30 – Розподіл концентрації CO в зоні розташування будівель [193]

Повітря рухається з відносно низькою швидкістю і тому може вважатися нестисливими, використовував алгоритм SIMPLE, запропонований Patankar S.V. [219], розподіл концентрації CO показано на рис. 1.30 [193].

Чисельні моделі мають за перевагу – велику точність розрахунків, врахування умов турбулентності, підстиляючої поверхні, нерівномірності поля швидкості. Недоліки – висока вартість ліцензійного пакету, потребує висококваліфікованих робітників, неможливість врахувати усі граничні умови.

Тому, з практичної точки зору, дуже важливо розробляти методи розрахунку такі, щоб вони задовольняли вимогам: зручність практичного застосування, невелика база вихідних даних, швидкість розрахунку, зручність в обробці і трактуванні кількісних результатів.

Аналіз вищевказаних літературних джерел, проаналізованих в даному розділі, показує актуальність розробки таких методів.

В монографії розроблено методи оцінювання та прогнозування рівня шкідливих виробничих чинників на відкритій місцевості промислових майданчиків. Запропоновано технологічні засоби зниження концентрації забруднювачів в робочих зонах за рахунок екранів, дворівневих усмоктувачів, штучних іонізаторів та зволожувачів повітря, а на їх основі розроблено методи розрахунку на базі кінцево-різницевих методів, які застосовано для розв'язання рівнянь масопереносу та електромагнітного випромінювання.

2. ПРОГНОЗУВАННЯ РІВНЯ ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ В РОБОЧИХ ЗОНАХ

Відомо, що працівники в робочих зонах на промислових майданчиках та на відкритій місцевості промислових регіонів піддаються інтенсивному впливу хімічного забруднення, яке пов'язано з двома факторами: розташування робочих зон в області впливу шлейфів від промислових об'єктів та викиди від автотранспорту.

Повітряне середовище промислових регіонів містить велику кількість домішок антропогенного походження: викиди промислових підприємств, автотранспорту, мінікотелен, продукти згоряння палива і спалювання відходів [74, 83–84, 87, 94, 97]. Ці домішки характеризуються постійною локалізацією в просторі, неоднорідністю і нерівномірністю розподілу. Зростання кількості автотранспорту зберігає лідерство в забрудненні повітряного середовища міст, на відміну від викидів стаціонарних джерел, які мають тенденцію до стабільного скорочення [5–8, 88–89, 92, 98, 104–105].

Для забезпечення допустимих умов праці при проектуванні робочих місць на відкритій місцевості промислових регіонів необхідні методи для оцінювання рівня забруднення повітряного середовища в робочих зонах, які б враховували як викиди точкових або лінійно розподілених джерел забруднення, так і їх взаємодію та хімічну трансформацію [118].

Також необхідні методи комплексного просторово-часового оцінювання ризику виникнення хронічних захворювань для робітників на відкритих місцевостях промислових підприємств та на житловій території, що знаходяться в зоні впливу викидів автомагістралей та підприємств [1, 61, 62, 82, 85, 93, 96, 135, 143, 144].

2.1 Метод прогнозу хімічного забруднення повітря в робочих зонах

Особливістю забруднення повітряного середовища в промислових містах є те, що відбувається взаємовплив викидів від різних видів джерел. Найбільш

типовою ситуацією є взаємодія викидів промислових підприємств з викидами від автомагістралей, що схематично зображена на рисунку 2.1.

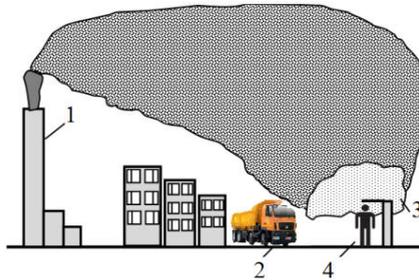


Рисунок 2.1 – Схема впливу викидів: 1 – промисловий об'єкт; 2 – автомагістраль; 3 – зона взаємодії викидів від 1 і 2; 4 – робоча зона працівника

Для моделювання хімічного забруднення використовується тривимірне рівняння переносу домішки [80, 143]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)C}{\partial z} + \sigma C = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_z \frac{\partial C}{\partial z}) + \\ & + \sum_{i=1}^n Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i), \end{aligned} \quad (2.1)$$

де C – концентрація забруднюючої речовини в одиниці об'єму повітря, $Q_i(t)$ – інтенсивність викиду від промислового підприємства або автотранспорту; u, v, w – компоненти вектору швидкості повітряного середовища в декартовій системі координат (x, y, z) , де площина xy відповідає поверхні Землі; w_s – швидкість гравітаційного осідання вагомих частинок забруднюючої речовини; σ – коефіцієнт розпаду, хімічного розкладання забруднення, що враховує зміну концентрації домішки впродовж часу; $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$ – коефіцієнти турбулентної дифузії; x_i, y_i, z_i – координати місця розташування джерел викиду

забруднюючої речовини (промислового підприємства або автомагістралі); $\delta(x-x_i)$, $\delta(y-y_i)$, $\delta(z-z_i)$ – дельта-функції Дірака, за допомогою яких моделюється викид забруднювача.

Диференціальне рівняння (2.1) описує розсіювання забруднюючої речовини в просторовій області R , що обмежена земною поверхнею $z=f_0(x,y)$ та верхньою межею вертикального розповсюдження забруднення $z=H$, яку можна представити у вигляді обмежуючої площини, де вертикальна швидкість повітряного потоку $w|_{z=H}=0$. Форма області на земній поверхні є прямокутною. На першому етапі математичного моделювання просторового переносу забруднюючих речовин можна не враховувати рельєф місцевості, або враховувати його, задаючи швидкість повітряного потоку такою, яка спостерігається на даній місцевості та рельєфі, тому компоненти швидкості повинні задовольняти рівнянню нерозривності [143]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (2.2)$$

Розв'язання рівняння (2.2) знаходиться в області R , що має форму паралелепіпеда, зображеного на рисунку 2.2.

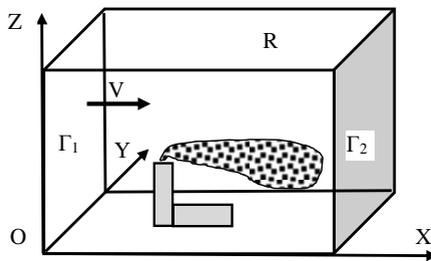


Рисунок 2.2 – Схема розрахункової області

Постановка початкових та граничних умов для рівняння (2.1) полягає в наступному. На бічних гранях паралелепіпеда: на частині границі Γ_1 , де потік входить в розрахункову область концентрація забруднення відома, забруднення,

що вноситься зовні, зазвичай не враховується, а саме $C_{\Gamma_1} = 0$, на частині границі Γ_1 , де $\vec{V} \cdot \vec{n} < 0$; на частині границі Γ_2 , де повітряні маси витікають із розрахункової області, нехтують дифузійним переносом відносно до конвективного, тобто $\left. \frac{\partial C}{\partial n} \right|_{\Gamma_2} = 0$ на границі Γ_2 , де $\vec{V} \cdot \vec{n} \geq 0$.

На площині $z = 0$ (поверхня землі) ставиться умова $\left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=0} = \alpha C$, $\alpha > 0$, де α – коефіцієнт, що враховує характер взаємодії забруднюючої речовини з поверхнею землі.

На верхній границі можливого розповсюдження забруднення вертикальна складова швидкості $w = 0$, тому може бути поставлена умова відсутності дифузійного переносу на границі $\left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=Z} = 0$ або умова $C|_{z=Z} = 0$, яку слід використовувати для забруднюючих речовин, які мають найбільшу вагу.

Якщо виконується умова внесення зовні в розрахункову область кількості забруднюючої речовини з концентрацією C_s , то гранична умова має вигляд $C_{\Gamma_1} = C_s$ на частині границі Γ_1 , де $\vec{V} \cdot \vec{n} < 0$.

Початкова умова для рівняння (2.1) $C|_{t=0} = 0$ або $C|_{t=0} = C_0$.

В рівнянні (2.1) джерелами забруднення є викиди із заводських труб, підприємства, транспорт, які моделюються точковими або лінійними джерелами відомого місця знаходження та відомої потужності Q_i , яка може змінюватися з часом.

Під час руху частинок забруднюючої речовини відбувається їх гравітаційне осідання. Швидкості гравітаційного осідання w_s залежать від розмірів та форми частинок домішки, властивостей забруднюючої речовини, ступеня турбулентності атмосфери. При визначеності швидкості гравітаційного осідання можна використовувати формулу Стокса з уточненням по Озеєну [143]:

$$w_s \cdot c = \frac{4d(\rho_p - \rho_n)}{3\rho_n}, \quad c = \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4}{\sqrt{\text{Re}}}, \quad \text{Re} = Vd/\nu,$$

де d – еквівалентний діаметр частинки забруднюючої речовини; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітряного середовища; ρ_p – щільність частинки забруднюючої речовини; ρ_n – щільність повітря. Для частинок забруднюючої речовини неправильної форми за характерний розмір приймається діаметр еквівалентного шару d_e , але швидкості більше реальних на 5 %.

В рівнянні (2.1) використовуються лише діагональні елементи тензору дифузії μ_x, μ_y, μ_z . Якщо враховувати недиагональні члени тензору дифузії, то концентрація забруднення зменшується на 5–10 %.

Фундаментальною проблемою гідродинаміки та моделювання розповсюдження забруднюючих речовин залишається визначення коефіцієнта турбулентної дифузії з метою якісного описання турбулентних течій. При розрахунку приземних концентрацій забруднюючих речовин враховується наступне:

– для висоти $z > h$, де h – висота приземного шару, при чисельному розрахунку приймають $\mu_x \approx \mu_y \approx \mu_z$, вертикальний коефіцієнт дифузії

$\mu_z = \gamma + k_1 \frac{h}{z_1}$, де γ – коефіцієнт молекулярної дифузії, k_1 – коефіцієнт турбулентної дифузії на висоті $z = 1$ м;

– для висоти $z < h$, $\mu_x \approx \mu_y$, горизонтальний коефіцієнт турбулентної дифузії розраховується $\mu_y = k_0 \cdot u$, де $k_0 = 0,1 \div 1$ м в залежності від ступеня

стійкості атмосфери, вертикальний коефіцієнт дифузії $\mu_z = \gamma + k_1 \frac{h}{z_1}$, де

$k_1 = 0,1 \div 0,2 \text{ м}^2/\text{с}$, висота приземного шару $h = 50 \div 100$ м або $\mu_z = k_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^m$,

$m \approx 1$ – безрозмірний параметр.

Таким чином, вхідними даними для проведення моделювання процесу

переносу забруднюючих речовин в межах моделі (2.1), що розглядається, виступають дані:

- роза вітрів для даного регіону та параметри, що характеризують метеорологічний режим в регіоні;
- кількісні характеристики викидів забруднюючих речовин в атмосферу;
- характеристики якісного складу викидів;
- місце розташування джерел викидів.

Наявність перешкод на шляху впливу потоку повітряного середовища необхідно враховувати при деформації поля швидкості повітряного потоку.

2.2 Метод розрахунку концентрації хімічних речовин в робочих зонах

Розрахунок концентрації хімічних речовин в робочих зонах базується на застосуванні метода чисельного інтегрування рівняння (2.1) [143].

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial C^1}{\partial t} + \frac{1}{2} \operatorname{div}(\vec{V}^+ C^1) + \frac{1}{4} \sigma C^1 = \frac{1}{4} \left(\frac{\partial}{\partial x} (\bar{\mu}_{1x} \frac{\partial C^1}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{\mu}_{1y} \frac{\partial C^1}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\mu}_{1z} \frac{\partial C^1}{\partial z}) \right); \\ \frac{\partial C^2}{\partial t} + \frac{1}{2} \operatorname{div}(\vec{V}^- C^2) + \frac{1}{4} \sigma C^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{\partial}{\partial x} (\bar{\mu}_{2x} \frac{\partial C^2}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{\mu}_{2y} \frac{\partial C^2}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\mu}_{2z} \frac{\partial C^2}{\partial z}) \right); \\ \frac{\partial C^3}{\partial t} + \frac{1}{2} \operatorname{div}(\vec{V}^- C^3) + \frac{1}{4} \sigma C^3 = \frac{1}{4} \left(\frac{\partial}{\partial x} (\bar{\mu}_{2x} \frac{\partial C^3}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{\mu}_{2y} \frac{\partial C^3}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\mu}_{2z} \frac{\partial C^3}{\partial z}) \right); \\ \frac{\partial C^4}{\partial t} + \frac{1}{2} \operatorname{div}(\vec{V}^+ C^4) + \frac{1}{4} \sigma C^4 = \frac{1}{4} \left(\frac{\partial}{\partial x} (\bar{\mu}_{1x} \frac{\partial C^4}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{\mu}_{1y} \frac{\partial C^4}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\mu}_{1z} \frac{\partial C^4}{\partial z}) \right); \\ \frac{\partial C^5}{\partial t} = \sum_{i=1}^n Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i). \end{array} \right. \quad (2.3)$$

Розглядається поперемінно-трикутний алгоритм розщеплення для чисельного інтегрування рівняння (2.1), де невідомі значення концентрації C визначаються в центрах різницевих комірок, а компоненти вектору швидкості u , v , w – на гранях різницевих комірок. Виконується розщеплення рівняння (2.1) на часовому проміжку $t \in [t^n, t^{n+1}]$ на послідовність рівнянь більш простого

виду. Алгоритм розщеплення вихідної задачі можна записати в диференційній формі [143].

Початкова умова для кожного рівняння розщеплення (2.3) має такий вид:

$$C \Big|_{t=t^n}^1 = C(x, y, z, t^n), \quad C \Big|_{t=t^n}^k = C \Big|_{t=t^{n+1}}^{k-1}, \quad C(x, y, z, t^{n+1}) = C \Big|_{t=t^{n+1}}^5.$$

В системі рівнянь (2.3) використовуються позначення:

$$\vec{V}^+ = \{u^+, v^+, w^+\}, \quad \vec{V}^- = \{u^-, v^-, w^-\},$$

$$u^+ = \frac{u + |u|}{2}, \quad u^- = \frac{u - |u|}{2}, \quad v^+ = \frac{v + |v|}{2}, \quad v^- = \frac{v - |v|}{2}, \quad w^+ = \frac{w + |w|}{2}, \quad w^- = \frac{w - |w|}{2},$$

$$\bar{\mu}_{1x} = \frac{\mu}{1 + \frac{u^+ \Delta x}{\mu}}, \quad \bar{\mu}_{1y} = \frac{\mu}{1 + \frac{v^+ \Delta y}{\mu}}, \quad \bar{\mu}_{1z} = \frac{\mu}{1 + \frac{w^+ \Delta z}{\mu}},$$

$$\bar{\mu}_{2x} = \frac{\mu}{1 - \frac{u^- \Delta x}{\mu}}, \quad \bar{\mu}_{2y} = \frac{\mu}{1 - \frac{v^- \Delta y}{\mu}}, \quad \bar{\mu}_{2z} = \frac{\mu}{1 - \frac{w^- \Delta z}{\mu}}.$$

Кожне рівняння системи (2.3) описує один напрямок переносу збурень через грані різницевої комірки: перше і четверте – в додатному напрямку координатних осей x та y , а друге та третє – у від'ємному напрямку. П'яте рівняння враховує зміну величини концентрації в просторі під дією джерел викиду.

Різницевий аналог системи (2.3) записується таким чином [143]:

– перший крок розщеплення

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ijk}^{n+1} - C_{ijk}^n}{\Delta t} + (L_x^+ + L_y^+ + L_z^+) (C_{ijk}^{n+1} \xi + C_{ijk}^n (1 - \xi)) + \frac{\sigma}{4} C_{ijk}^{n+1/2} = \\ & = \frac{1}{4} \left[(M_{xx}^+ + M_{yy}^+ + M_{zz}^+) C_{ijk}^{n+1} + (M_{xx}^- + M_{yy}^- + M_{zz}^-) C_{ijk}^n \right], \end{aligned} \quad (2.4)$$

де $\xi \in [0, 1]$ – параметр $C_{ijk}^{1\ n+1/2} = \frac{C_{ijk}^{1\ n+1} + C_{ijk}^{1\ n}}{2}$;

– другий крок розщеплення

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ijk}^{2\ n+1} - C_{ijk}^{2\ n}}{\Delta t} + (L_x^- + L_y^- + L_z^-)(C_{ijk}^{2\ n+1} \xi + C_{ijk}^{2\ n} (1 - \xi)) + \frac{\sigma}{4} C_{ijk}^{2\ n+1/2} = \\ & = \frac{1}{4} \left[(M_{xx}^- + M_{yy}^- + M_{zz}^-) C_{ijk}^{2\ n+1} + (M_{xx}^+ + M_{yy}^+ + M_{zz}^+) C_{ijk}^{2\ n} \right], \end{aligned} \quad (2.5)$$

– третій крок розщеплення – використовується різницеве рівняння (2.5), четвертий крок розщеплення – застосовується диференційне рівняння (2.4), п'ятий крок виконується наступним чином:

$$\frac{C_{ijk}^{5\ n+1} - C_{ijk}^{5\ n}}{\Delta t} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i(t^{n+1/2}) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i)}{\Delta x \Delta y \Delta z}. \quad (2.6)$$

В дискретному виді дельта-функція Дірака «розмазується» по об'єму різницевої комірки із збереженням сумарної кількості забруднення, дельта-функція дорівнює нулю скрізь, крім комірок, де розташоване i -те джерело забруднення.

В рівняннях (2.4) та (2.5) використовуються наступні позначення різницевих операторів:

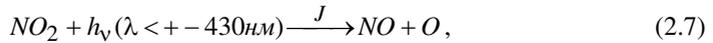
$$\begin{aligned} L_x^+ &= \frac{u_{i+1,j,k}^+ C_{ijk} - u_{i,j,k}^+ C_{i-1,j,k}}{2\Delta x}, \quad L_x^- = \frac{u_{i+1,j,k}^- C_{i+1,j,k} - u_{i,j,k}^- C_{i,j,k}}{2\Delta x}, \\ L_y^+ &= \frac{v_{i,j+1,k}^+ C_{ijk} - v_{i,j,k}^+ C_{i,j-1,k}}{2\Delta y}, \quad L_y^- = \frac{v_{i,j+1,k}^- C_{i,j+1,k} - v_{i,j,k}^- C_{i,j,k}}{2\Delta y}, \\ L_z^+ &= \frac{w_{i,j,k+1}^+ C_{ijk} - w_{i,j,k}^+ C_{i,j,k-1}}{2\Delta z}, \quad L_z^- = \frac{w_{i,j,k+1}^- C_{i,j,k+1} - w_{i,j,k}^- C_{i,j,k}}{2\Delta z}, \end{aligned}$$

Позначення інших операторів співпадає з відповідними позначеннями.

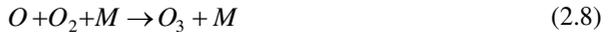
Найважливішу роль відіграє послідовність розв'язання рівнянь розщеплення. Інший порядок послідовного розв'язання рівнянь розщеплення для некомутативних диференціальних операторів забезпечує перший порядок точності.

2.3 Метод розрахунку хімічної трансформації забруднюючих речовин в робочих зонах

Під час руху автотранспорту та під час його роботи на холостому ходу в повітряне середовище надходять різного роду забруднюючі речовини, які під дією сонячного світла піддаються трансформації. Розглядаються основні хімічні реакції, що відбуваються в атмосферному повітрі між оксидом азоту NO , діоксидом азоту NO_2 і озоном O_3 (2.7) – (2.9) [218].

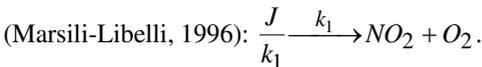


де J – константа швидкості реакції для процесу фотолізу залежно від кількості ультрафіолетового випромінювання [1/s].



де k_1 – константа швидкості реакції для NO .

У незабрудненій атмосфері ці реакції призводять до наступної рівноваги



Враховуються тільки основні три реакції (2.7)–(2.9), так як для розрахунку хімічної трансформації викидів в атмосферу необхідно знати швидкості їх хімічних реакцій, які визначаються експериментальним шляхом, вивчалися в роботах [169, 208, 218, 251]. Щоб виконати розрахунок рівня

забруднення повітряного середовища цими забруднювачами, потрібно на першому етапі вирішити рівняння переносу для кожної домішки в атмосфері (2.10) – (2.12).

$$\begin{aligned} & \frac{\partial[NO]}{\partial t} + \frac{\partial u[NO]}{\partial x} + \frac{\partial v[NO]}{\partial y} + \frac{\partial w[NO]}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x}(\mu_x \frac{\partial[NO]}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_y \frac{\partial[NO]}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_z \frac{\partial[NO]}{\partial z}) + \\ & + \sum_{i=1}^n Q_{NO_i}(t)\delta(x-x_i)\delta(y-y_i)\delta(z-z_i), \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial[NO_2]}{\partial t} + \frac{\partial u[NO_2]}{\partial x} + \frac{\partial v[NO_2]}{\partial y} + \frac{\partial w[NO_2]}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x}(\mu_x \frac{\partial[NO_2]}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_y \frac{\partial[NO_2]}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_z \frac{\partial[NO_2]}{\partial z}) + \\ & + \sum_{i=1}^n Q_{NO_2_i}(t)\delta(x-x_i)\delta(y-y_i)\delta(z-z_i), \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial[O_3]}{\partial t} + \frac{\partial u[O_3]}{\partial x} + \frac{\partial v[O_3]}{\partial y} + \frac{\partial w[O_3]}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x}(\mu_x \frac{\partial[O_3]}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_y \frac{\partial[O_3]}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_z \frac{\partial[O_3]}{\partial z}). \end{aligned} \quad (2.12)$$

де Q_{NO_i} – інтенсивність викиду NO від промислових підприємств або автотранспорту, $Q_{NO_2_i}$ – інтенсивність викиду NO_2 від промислових підприємств або від автотранспорту; u, v, w – компоненти вектору швидкості вітру; $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$ – коефіцієнт турбулентної дифузії; x_i, y_i, z_i – координати джерел викиду забруднюючої речовини (промислового підприємства або автомагістралі); $\delta(x-x_i)\delta(y-y_i)\delta(z-z_i)$ – дельта-функція Дірака, за допомогою якої

моделюється викид забруднювача. Значення коефіцієнтів дифузії розраховується за формулами: $\mu_x = (0,1 \div 1) \cdot U$, $\mu_y = (0,1 \div 1) \cdot U$, де U – швидкість вітру U ,

$\mu_z = k \left(\frac{z}{z_1} \right)^m$, де z – висота над рівнем землі, z_1 – висота, де задана швидкість

вітру U , $m \approx 1$, $k = 0,2$ [80, 143].

Дані рівняння вирішуються чисельно за допомогою поперемінно-трикутної різницевої схеми, розглянутої в п. 2.2 [143].

На другому етапі виконується розрахунок хімічної трансформації домішки. Процес хімічної трансформації проводиться на основі залежностей (2.13) – (2.15) [218].

$$\frac{d[NO]}{dt} = -k_1[NO][O_3] + J_{NO_2}[NO_2], \quad (2.13)$$

$$\frac{d[NO_2]}{dt} = -k_1[NO][O_3] - J_{NO_2}[NO_2], \quad (2.14)$$

$$\frac{d[O_3]}{dt} = -k_1[NO][O_3] + J_{NO_2}[NO_2]. \quad (2.15)$$

Хімічні реакції та реакція фотолізу взаємопов'язані в атмосфері. Швидкість фотолізу і константа швидкості реакції, що залежать від температури, визначаються виразами (2.16) – (2.17) [208].

$$J_{NO_2} = 8,14 \cdot 10^{-3} (0,97674 + 8,37 \cdot 10^{-4} \cdot (T - 273,15)) + \\ + 4,5173 \cdot 10^6 \cdot (T - 273,15)^2, [s^{-1}], \quad (2.16)$$

$$k_1 = 44,05 \cdot 10^{-3} \exp\left(-\frac{1370}{T}\right), [ppb^{-1}s^{-1}]. \quad (2.17)$$

Діоксид азоту розкладається з виділенням оксиду азоту, а останній окислюється озоном. У результаті ряду послідовних реакцій одна молекула

оксиду азоту сприяє знищенню в середньому 10 молекул озону, адже NO_2 більш токсичний ніж NO .

Для численного розв'язання (2.13) – (2.15) з урахуванням залежностей (2.16) – (2.17) розроблена програма, що реалізує метод Рунге-Кутта [113–114]. Для оцінювання рівня забруднення атмосферного повітря діоксидом азоту з урахуванням взаємовпливу викидів промислових підприємств і автомагістралі необхідно вирішити спільно рівняння (2.10) – (2.12). Постановка крайових умов для вирішення рівнянь перенесення розглянута в п. 2.1.

Одним з основних забруднювачів навколишнього середовища при роботі промислових та енергетичних підприємств є сполуки сірки. Найбільш небезпечним для життя і здоров'я людей є діоксид сірки SO_2 , що відмічалось у розділі 1. Він утворюється при спалюванні органічного палива (вугілля, нафти), що містить сірку, а також при промисловій переробці сировини, що вміщує сірку. Викиди діоксиду сірки, обумовлені роботою теплоенергетичних установок, що спалюють органічне паливо, перевищують 100 млн. т на рік.

Більше 60 % кількості SO_2 обумовлено спалюванням вугілля і нафти. У зв'язку з вимогами до зниження забруднення повітря SO_2 , нафта з низьким вмістом сірки користується великим попитом і тому продається за вищою ціною. Вугілля, що містить знижену кількість сірки, має більш низьку питому теплоту згоряння, тому в розрахунку на одиницю теплоти, що виділяється, розходження в отриманні сірки нівелюється. Шкідливий вплив викликається не тільки самим діоксидом сірки, основний збиток наносить триоксид сірки SO_3 , що утворюється при окисленні SO_2 . Діоксид сірки важко окислюється в чистому повітрі. Однак у присутності пилоподібних частинок оксидів металів під впливом O_2 діоксид сірки дуже швидко перетворюється в SO_3 . Реакція протікає на поверхні частинок, які грають роль гетерогенного каталізатора. У викидних газах міститься значна кількість тонкоподібнених твердих речовин – золи, що знаходиться в підвішеному стані в повітрі. Окисленню SO_2 також сприяє наявність у повітрі крапельок вологи, а розчинений у воді SO_2 окислюється досить швидко.

Додатковим джерелом забруднення атмосфери, є автотранспортні засоби, які викидають в навколишнє середовище забруднюючі речовини, що містять оксиди сірки. Відповідно до вищевикладеного, процес розсіювання SO_2 в атмосфері супроводжується рядом хімічних реакцій, врахувати які при моделюванні практично неможливо. Тому на практиці обмежуються урахуванням деяких з них.

Для вирішення поставленого завдання враховується процес утворення сірчаної кислоти при взаємодії SO_2 з водяними парами H_2O .

Для моделювання забруднення робочих зон викидами SO_2 використовується двомірний аналог рівняння (2.1). Розглядається рівняння (2.1) осереднене по висоті переносу домішки, планова модель [80]. Хімічна трансформація в робочих зонах розраховується на базі рівнянь [67]. Для чисельного інтегрування використовується неявна різницєва схема [143].

В цьому випадку рівняння, що моделюють вказаний процес, записуються наступним чином:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial[SO_2]}{\partial t} + \frac{\partial u[SO_2]}{\partial x} + \frac{\partial v[SO_2]}{\partial y} \\ & = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad}[SO_2]) + \sum_{i=1}^n Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial[SO_2]}{\partial t} = -\sigma \cdot [SO_2] \cdot [H_2O], \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial[H_2O]}{\partial t} + \frac{\partial u[H_2O]}{\partial x} + \frac{\partial v[H_2O]}{\partial y} = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad}[H_2O]), \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial[H_2SO_4]}{\partial t} + \frac{\partial u[H_2SO_4]}{\partial x} + \frac{\partial v[H_2SO_4]}{\partial y} = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad}[H_2SO_4]), \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial[H_2SO_4]}{\partial t} = \sigma \cdot [SO_2] \cdot [H_2O], \quad (2.22)$$

де $[SO_2]$ – концентрація двоокису сірки; $[H_2O]$ – концентрація водяної пари;

$[H_2SO_4]$ – концентрація сірчаної кислоти; u, v – компоненти вектору швидкості вітру, осереднені по висоті перенесення [80]; $\mu=(\mu_x, \mu_y)$ – коефіцієнт турбулентної дифузії; $Q_i(t)$ – інтенсивність викиду забруднювача SO_2 ; $\delta(x-x_i)\delta(y-y_i)$ – дельта-функція Дірака; x_i, y_i – координати джерела викиду; σ – коефіцієнт, що враховує хімічний розпад SO_2 , $\sigma=0,027 \text{ год}^{-1}$ [67]; t – час. Вміст водяної пари в атмосфері приймаємо 60 %.

Рівняння (2.18), (2.20), (2.21) описують розсіювання викидів SO_2 , водяної пари H_2O і сірчаної кислоти H_2SO_4 під дією вітру і атмосферної дифузії. Рівняння (2.19), (2.22) враховують зміну концентрації SO_2 за рахунок утворення сірчаної кислоти H_2SO_4 і її хімічної трансформації SO_2 . Додатково враховується процес взаємодії SO_2 з аміаком, який міститься в атмосферному повітрі промислових міст. Наявність аміаку в атмосферному повітрі населених пунктів можна прийняти на рівні середньодобової гранично допустимої концентрації $0,04 \text{ мг/м}^3$. Для врахування взаємодії SO_2 з аміаком необхідно проінтегрувати на кожному часовому кроці наступне рівняння:

$$\frac{\partial[SO_2]}{\partial t} = -\sigma_{H_2SO_4} \cdot [NH_3] \cdot [SO_2], \quad (2.23)$$

де $[NH_3]$ – концентрація аміаку в атмосферному повітрі, $\sigma_A = 0,003 \text{ год}^{-1}$ [67].

Постановка крайових умов для даного рівняння розглянута в роботах В. К. Аргучінцева, Г. І. Марчука і А. А. Самарського [4, 80, 113–114, 143]. Чисельне інтегрування рівнянь переносу домішки (2.18), (2.20), (2.21) проводиться за допомогою неявної різницевої схеми розщеплення [143]. В дисертаційній роботі наводиться опис для одного з рівнянь переносу, наприклад для рівняння (2.18). Аналогічно виконується інтегрування для рівнянь (2.20), (2.21).

Похідна за часом апроксимується розділеною різницею «назад»:

$$\frac{\partial[SO_2]}{\partial t} \approx \frac{[SO_2]_{ij}^{n+1} - [SO_2]_{ij}^n}{\Delta t}.$$

У конвективних похідних складові односпрямованого перенесення записуються у вигляді:

$$\frac{\partial u[SO_2]}{\partial x} = \frac{\partial u^+[SO_2]}{\partial x} + \frac{\partial u^-[SO_2]}{\partial x}; \quad \frac{\partial v[SO_2]}{\partial y} = \frac{\partial v^+[SO_2]}{\partial y} + \frac{\partial v^-[SO_2]}{\partial y}.$$

З урахуванням попереднього виразу конвективні похідні апроксимуються розділеними різницями «проти потоку» на верхньому часовому шарі:

$$\frac{\partial u^+[SO_2]}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+[SO_2]^{n+1} - u_{i,j}^+[SO_2]^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+[SO_2]^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^-[SO_2]}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^-[SO_2]^{n+1} - u_{i,j}^-[SO_2]^{n+1}}{\Delta x} = L_x^-[SO_2]^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+[SO_2]}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+[SO_2]^{n+1} - v_{i,j}^+[SO_2]^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+[SO_2]^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^-[SO_2]}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^-[SO_2]^{n+1} - v_{i,j}^-[SO_2]^{n+1}}{\Delta y} = L_y^-[SO_2]^{n+1}.$$

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

Другі похідні апроксимуються наступним чином:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \frac{\partial [SO_2]}{\partial x}) &\approx \mu_x \frac{[SO_2]_{i+1,j}^{n+1} - [SO_2]_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} - \\ &- \mu_x \frac{[SO_2]_{i,j}^{n+1} - [SO_2]_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- [SO_2]^{n+1} + M_{xx}^+ [SO_2]^{n+1}; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial}{\partial y}(\mu_y \frac{\partial [SO_2]}{\partial y}) \approx \mu_y \frac{[SO_2]_{i,j+1}^{n+1} - [SO_2]_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} -$$

$$- \mu_y \frac{[SO_2]_{i,j}^{n+1} - [SO_2]_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{yy}^- [SO_2]^{n+1} + M_{yy}^+ [SO_2]^{n+1},$$

де L_x^+ , L_x^- , L_y^+ , L_y^- , M_{xx}^+ , M_{xx}^- , M_{yy}^+ , M_{yy}^- – умовні позначення різницевих операторів. З урахуванням наведених вище позначень різницевий аналог рівняння переносу (2.18) записується як:

$$\frac{[SO_2]_{i,j}^{n+1} - [SO_2]_{i,j}^n}{\Delta t} + L_x^+ [SO_2]^{n+1} + L_x^- [SO_2]^{n+1} + L_y^+ [SO_2]^{n+1} +$$

$$+ L_y^- [SO_2]^{n+1} + \sigma [SO_2]_{ij}^{n+1} = (M_{xx}^+ [SO_2]^{n+1} + M_{xx}^- [SO_2]^{n+1} +$$

$$L_{yy}^+ [SO_2]^{n+1} + L_{yy}^- [SO_2]^{n+1}) + q_{ij} \delta_{ij}. \quad (2.24)$$

Позначаємо δ_{ij} – число «1» або «0», в залежності від того, розташоване чи ні в різницевому осередку « ij » джерело забруднення. Значення q_{ij} – дорівнює інтенсивності $Q_i(t)$ відповідного i -го джерела, розміщеного в різницевому осередку « ij », поділений на площу цього осередка: $q_{ij} = Q_i(t) / (\Delta x \Delta y)$.

Розщепимо різницеве рівняння (2.24) на чотири різницевих рівняння так, щоб на кожному кроці враховувався лише один напрямок перенесення збурень, який визначається знаком при конвективній похідній [143]. В цьому випадку різницеві рівняння мають вигляд:

– на першому кроці розщеплення $k = \frac{1}{4}$,

$$\frac{[SO_2]_{ij}^{n+k} - [SO_2]_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ [SO_2]^k + L_y^+ [SO_2]^k) + \frac{\sigma}{4} [SO_2]_{ij}^k =$$

$$= \frac{1}{4}(M_{xx}^+[SO_2]^k + M_{xx}^-[SO_2]^n + M_{yy}^+[SO_2]^k + M_{yy}^-[SO_2]^n) + \sum_{l=1}^n \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l ;$$

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

$$\begin{aligned} & \frac{[SO_2]_{ij}^k - [SO_2]_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^-[SO_2]^k + L_y^-[SO_2]^k) + \frac{\sigma}{4}[SO_2]_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4}(M_{xx}^-[SO_2]^k + M_{xx}^+[SO_2]^c + M_{yy}^-[SO_2]^k + M_{yy}^+[SO_2]^c) + \sum_{l=1}^n \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l ; \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} & \frac{[SO_2]_{ij}^k - [SO_2]_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+[SO_2]^k + L_y^-[SO_2]^k) + \frac{\sigma}{4}[SO_2]_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4}(M_{xx}^-[SO_2]^c + M_{xx}^+[SO_2]^k + M_{yy}^-[SO_2]^k + M_{yy}^+[SO_2]^c) + \sum_{l=1}^n \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l ; \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} & \frac{[SO_2]_{ij}^k - [SO_2]_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^-[SO_2]^k + L_y^+[SO_2]^k) + \frac{\sigma}{4}[SO_2]_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4}(M_{xx}^-[SO_2]^k + M_{xx}^+[SO_2]^c + M_{yy}^-[SO_2]^c + M_{yy}^+[SO_2]^k) + \sum_{l=1}^n \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l . \end{aligned}$$

У наведених різницевих рівняннях використовується значення $\bar{q}_l = \frac{q_l}{\Delta x \Delta y}$. Значення функції δ_l тотожно дорівнює нулю у всіх осередках, крім тих, де розташоване джерело викиду. Оскільки на кожному кроці розщеплення шаблон різницевих рівнянь має трикутну форму, то на верхньому часовому

шарі невідоме значення функції $[SO_2]$ знаходиться за методом «стрімкого рахунку».

2.4 Методи розрахунку поля швидкості вітру в робочих зонах

Важливою практичною задачею дослідження розсіювання забруднення в робочих зонах є врахування впливу геометричних форм перешкод, що розташовуються біля робочої зони працівника. Вони виступають перешкодами на шляху повітряного потоку і впливають на деформацію швидкості повітряного потоку вітру. Значний вплив на переміщення повітря поблизу земної поверхні до висоти порядку 10 м виявляє тертя о земну поверхню, при висоті будівель більше 10 м вплив тертя є менш значимим, а визначальним стає стиснення потоку при його русі над перешкодами. Найпростішою моделлю для описання зміни структури руху повітряних мас, що викликана наявністю різного роду перешкод на їх шляху, виступає модель потенційної течії. Застосування цієї моделі для розрахунку просторових моделей доцільно за двома причинами:

– застосування складних моделей турбулентних течій для просторових задач практичної спрямованості не можливо в силу обмеженості потужності комп'ютера;

– для задач прогнозу забруднення повітря існує ряд недовизначеностей в постановці задач розсіювання, що потребує багатоваріантних досліджень, а це пов'язано з великими затратами комп'ютерного часу в тривимірній постановці.

Точність розрахунку руху повітряних мас залежить від фізичної моделі вибраної гідродинамічних процесів та від сітки дискретизації розрахункової області. Складний рельєф місцевості замінюється кусочно-постійною залежністю, пов'язаною з вибраною сіткою чисельного моделювання. Для розрахунку області у формі паралелепіпеду форма будівель представляється кусочно-постійною функцією виду $z = z_{ij} = const$ для координат x , y , що належать різницевому осередку (i, j) в горизонтальній площині.

Швидкість повітря в рамках моделі нестискуваного середовища

задовольняє рівнянню неперервності [143]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (2.25)$$

Вважаючи течію повітря потенційною і вектор швидкості $\vec{V} = \text{grad } P$, де P – потенціал швидкості повітряного потоку, для визначеності швидкості переміщення повітряних мас в досліджуваній області використовується рівняння Лапласа [143]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0, \quad (2.26)$$

Гранична умова для однозначного розрахунку швидкості \vec{V} при інтегруванні рівняння (2.26) представляється на твердих непроникливих границях земної поверхні, представлені у виді кусочно-постійної поверхні умовою непротікання, а саме $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$.

На горизонтальних елементах цієї поверхні гранична умова набуває вид $\frac{\partial P}{\partial z} = 0$, на вертикальних ділянках $\frac{\partial P}{\partial x} = 0$ або $\frac{\partial P}{\partial y} = 0$ в залежності від орієнтації.

На вертикальних площинах розрахункової області, де відбувається витікання в неї повітряних мас, задається значення нормальної похідної потенціалу швидкості $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$, тобто відома нормальна складова швидкості повітря V_n , що рухається в середину розрахункової області.

На вертикальних границях, де відбувається витікання повітря із розрахункової області, необхідно задавати значення потенціалу швидкості, тобто компоненти швидкості повітряних мас в дотичних напрямках до граничних площин:

$$P = P_*(x = \text{const}, y, z) + \text{const} \text{ або } P = P_*(x, y = \text{const}, z) + \text{const}.$$

Тобто на вихідних границях розрахункової області задається лише напрямок можливого руху повітря. Оскільки для більшості практичних задач геометрична форма будівель в робочій зоні не змінює головного напрямку руху повітря, то потенціал швидкості на вихідних границях задається умовою $P = U \cdot x + V \cdot y + const$, де U, V – проєкції швидкості вітру на осі координат.

На верхній границі $z = H$ розрахункової області задається умова непротікання повітряних мас $\frac{\partial P}{\partial z} = 0$, оскільки границя $z = H$ вибирається так, щоб її положення суттєво не впливало на течію повітря поблизу земної поверхні.

Слід відмітити, що рух повітря біля геометричних споруд біля робочої зони працівника може супроводжуватися відривом потоку на границях зі зломом форми поверхні. Ці ефекти не враховуються в рамках моделі потенційної течії, в чому і полягає основний недолік схеми моделювання, але головні ефекти зміни структури потоку враховуються.

Спочатку рівняння Лапласа (2.26) приводиться до рівняння еволюційного виду і застосуванням встановлення рішення за часом:

$$\frac{\partial P}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}, \quad (2.27)$$

де η – фіктивний час, при $\eta \rightarrow \infty$, розв'язок рівняння (2.27) прямує до розв'язку рівняння Лапласа. Для розв'язання даного рівняння необхідно задати початкову умову, тобто поле потенціалу при $\eta = 0$. Наприклад, приймається $P = 0$ в усій розрахунковій області при $\eta = 0$. Для чисельного інтегрування еволюційного рівняння (2.27) використовується метод Самарського [113–114].

Різницеві рівняння в цьому випадку набувають вигляду:

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^n}{0,5\Delta\eta} = \frac{P_{i+1,j,k}^n - P_{i,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2} + P_{i-1,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x^2} +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{P_{i,j+1,k}^n - P_{i,j,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2} + P_{i,j-1,k}^{n+1/2}}{\Delta y^2} + \\
& + \frac{P_{i,j,k+1}^n - P_{i,j,k}^n}{\Delta z^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2} + P_{i,j,k-1}^{n+1/2}}{\Delta z^2}, \quad (2.28)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{0,5\Delta\eta} & = \frac{P_{i+1,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2} + P_{i-1,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + \\
& + \frac{P_{i,j+1,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2} + P_{i,j-1,k}^{n+1/2}}{\Delta y^2} + \\
& + \frac{P_{i,j,k+1}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2} + P_{i,j,k-1}^{n+1/2}}{\Delta z^2}. \quad (2.29)
\end{aligned}$$

При використанні методу Самарського чисельне розв'язання тривимірного рівняння (2.27) для визначення потенціалу швидкості здійснюється двома кроками. На першому знаходиться «проміжне» значення потенціалу $P_{i,j,k}^{n+1/2}$ на часовому шарі « $n+1/2$ », а на другому – «остаточне» значення потенціалу $P_{i,j,k}^{n+1}$ на часовому шарі « $n+1$ » [113–114]. Гранична умова непротікання $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ реалізується шляхом використання фіктивних різницевих комірок. Отримані співвідношення (2.28) – (2.29) застосовуються у випадку двовимірної постановки задачі без компонент, що відповідають за координату z .

2.5 Метод оцінювання ризику хронічної інтоксикації робітників

Як відомо, ризик – категорія ринкової економіки, яка є поняттям багатоплановим. Класифікація ризиків проводиться в залежності від основної причини виникнення ризиків: природні, техногенні, екологічні, комерційні. З точки зору застосування поняття ризику при його аналізі та управлінні

техногенною безпекою важливими категоріями є: індивідуальний, потенційний територіальний, соціальний, колективний ризику. Для працівників, що знаходяться в робочій зоні, яка безпосередньо попадає під вплив дії шкідливих викидів, особливо важливим параметром безпеки на робочому місці є аналіз ризику, а саме отримання інформації, необхідної для попередження негативних наслідків для здоров'я і умов праці людини, що складається з трьох компонентів: *оцінювання ризику, управління ризиком та поширення інформації про ризик* [1, 3].

Оцінка людської діяльності проводиться за наступною схемою: визначення кількості часу, який працівник проводить в забрудненій зоні на відкритій місцевості з урахуванням характеру діяльності людини протягом доби; визначення залежності людської діяльності від сезону року; визначення можливості тимчасового або постійного перебування людини в забрудненій зоні.

Під час проведення ідентифікації небезпеки на певній території необхідно встановити всі джерела забруднення навколишнього середовища, які існують або існували в минулому. У зв'язку з можливістю просторового розподілу забруднення не можна обмежуватися тільки джерелами, розташованими в межах досліджуваної території. *Обов'язковому врахуванню підлягають усі ті джерела, які потенційно впливають на працівника, що знаходиться в досліджуваній зоні.* У тому випадку, коли проводяться дослідження спрямовані на оцінку ризику для здоров'я людини, обумовленого будь-яким конкретним об'єктом, наприклад промисловим підприємством, найбільш важливим джерелом інформації є *відомості про якісний і кількісний склад викидів даного об'єкта, їх просторові і часові характеристики.* Крім стаціонарних джерел викидів *враховується і вплив автотранспорту* на забруднення приземного шару атмосфери.

Для прогнозування ризику виникнення рефлекторних ефектів при забрудненні атмосферного повітря використовують наступне рівняння для елементів небезпеки:

$$Prob = -1,41 + 2,33 \cdot \lg(C_i / ГДК_{м.р.}), \quad (2.30)$$

де C_i – концентрація діючої речовини; $ГДК_{м.р.}$ – максимально разова гранично допустима концентрація; $Prob$ – величина, пов’язана з ризиком $Risk$ за законом нормального імовірнісного розподілу табличним інтегралом, який є вбудованою функцією спеціалізованих пакетів програм:

$$Risk = (1/\sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^{Prob} e^{-t^2/2} dt. \quad (2.31)$$

Для розрахунку потенційного ризику тривалого (хронічного) впливу використовується безпорогова модель впливу, коли для більшості людей відсутня видима небезпека для здоров’я. Розрахунок ефектів, пов’язаних з тривалим (хронічним) впливом речовин, що забруднюють повітря, проводиться з використанням інформації про концентрацію, усереднену за рік. Для оцінювання ризику неспецифічних хронічних ефектів при забрудненні атмосферного повітря використовуються наступні рівняння:

$$Risk = 1 - \exp(\ln 0,84 \cdot (C_i / ГДК_{с.д.})^b / k_3), \quad (2.32)$$

де C_i – концентрація діючої речовини, що робить вплив за заданий період часу; $ГДК_{с.д.}$ – середньодобова гранично допустима концентрація; k_3 – коефіцієнт запасу, значення якого змінюються в залежності від класу небезпеки речовини: 1-й клас – 7,5; 2-й клас – 6,0; 3-й клас – 4,5; 4-й клас – 3; b – коефіцієнт, значення якого змінюються в залежності від класу небезпеки речовини: 1-й клас – 2,35; 2-й клас – 1,28; 3-й клас – 1,0; 4-й клас – 0,87.

$$Risk = 1 - \exp((\ln 0,84 / (ГДК_{с.д.} \cdot k_3)) \cdot C_i \cdot t)^n, \quad (2.33)$$

де n – коефіцієнт, значення якого змінюються в залежності від класу небезпеки речовини, 4-й клас $b = 0,86$; t – відношення тривалості впливу забруднення (роки) до середньої тривалості життя людини (70 років).

Для опису ризику хронічної інтоксикації (в тому числі канцерогенного ризику), пов’язаного із забрудненням атмосферного повітря, часто використовується лінійно-експоненціальна модель [1].

$$R_3 = 1 - \exp \left[-0,174 \cdot \left(\frac{C}{ГДК_{с.д.} \cdot K_3} \right)^\beta \cdot t \right], \quad (2.34)$$

де R_3 – ризик, C – концентрація речовини, що надає вплив протягом часу t ; β – коефіцієнт, що враховує особливості токсичних властивостей речовин; $ГДК_{с.д.}$ – гранично допустима середньодобова концентрація хімічної речовини в повітрі населених місць, $мг/м^3$. Речовина такої концентрації не повинна здійснювати на людину прямого або опосередкованого шкідливого впливу при невизначено тривалому вдиханні. Вказані підходи застосовуються при рівні забруднення робочої зони до 10–15 ГДК.

Комбінований ризик визначається, як сума розрахованих величин ризику по кожній з прийнятих в розрахунках речовині або за співвідношенням:

$$Risk = 1 - (1 - Risk_1) \cdot (1 - Risk_2) \cdot (1 - Risk_3) \cdot (1 - Risk_n), \quad (2.35)$$

де $Risk_1, \dots, Risk_n$ – ризик дії кожної окремої домішки.

Ефекти негайної дії найчастіше проявляються у вигляді рефлекторних реакцій у найбільш чутливих осіб. Люди, найбільш схильні до дії одних домішок, також виявляються більш чутливими до інших. У зв'язку з цим потенційний ризик негайної дії при комбінованому впливі найчастіше визначається максимальним ризиком окремої домішки серед усіх, що впливають, хоча в окремих випадках необхідний обчислення ефекту сумачії.

Хронічний вплив хімічних речовин загально токсичного характеру дії на рівні малих концентрацій (1–15 ДК) характеризується однотипними неспецифічними ефектами, що потребує використання рівняння розрахунку сумарного ризику для всіх потенційних домішок хронічної дії.

Оцінка величини потенційного ризику рефлекторної дії виконується за такими критеріями: *прийнятний* (до 2 %) – практично виключається зростання захворюваності населення, а стан дискомфорту може проявлятися лише в одиничних випадках у особливо чутливих людей; *задовільний* (від 2 до 16 %) – можливі часті випадки скарг населення на різні дискомфортні стани;

незадовільний (від 16 до 50 %) можливі систематичні скарги населення на різні дискомфортні стани; *небезпечний* (більше 50 %) – можливі випадки скарг населення на різні дискомфортні стани, що приводить до зростання загальної захворюваності; *надзвичайно небезпечний* (близький до 100 %) – поява випадків гострого отруєння, зміна структури захворюваності [1].

Оцінка величини потенційного ризику тривалого (хронічного) впливу виконується за такими критеріями: *прийнятний* (до 5 %) – відсутні несприятливі медико-екологічні тенденції; *викликає побоювання* (від 5 до 16 %) – виникає тенденція до зростання неспецифічної патології; *небезпечний* (від 16 до 50 %) – виникає достовірна тенденція до зростання неспецифічної патології при появі одиничних випадків специфічної патології; *надзвичайно небезпечний* (від 50 до 84 %) – виникає достовірне зростання неспецифічної патології при появі значного числа випадків специфічної патології, а також тенденція до збільшення смертності населення; *катастрофічний* (близький до 100 %) – поява випадків хронічного отруєння, зміна структури захворюваності, яке потрібно оцінювати з використанням інших, більш специфічних моделей.

2.6 Верифікація розроблених методів

Верифікація розроблених методів є обов'язковим етапом перед їх практичним застосуванням. Для верифікації розробленого методу прогнозу використовувалися результати проведеного фізичного експерименту.

Тестова задача 2.1. Викид продуктів горіння з вихлопної труби автомобіля Daewoo Matiz пус. 2.3.

Під час проведення фізичного експерименту здійснювалося вимірювання вуглекислого газу CO , формальдегіду та летючих сполук на різній відстані від вихідного отвору вихлопної труби.



Рисунок 2.3 – Експеримент по вимірюванню концентрації оксиду вуглецю, формальдегіду та летючих органічних сполук, 1 – джерело забруднення (вихлопна труба)

Для вимірювання концентрації оксиду вуглецю CO використовувався аналізатор Carbon Monoxide Meter Model: 7701 (рис. 2.4 а). Для вимірювання концентрації формальдегіду та летючих сполук використовувався прилад SAMI JQJC-012 (рис. 2.4 б). Швидкість вітру та газового потоку на виході з вихлопної труби вимірювалися за допомогою анемометру PM 6252 B Digital Anemometer (рис. 2.4 в). Швидкість повітряного потоку складала $V_n=0,8-1,1$ м/с, а швидкість газового потоку $V_r=1,65-1,85$ м/с, діаметр отвору вихлопної труби $d=32$ мм розміщувався відносно поверхні землі на висоті $H_0=320$ мм.



а



б



в

Рисунок 2.4 – Прилади для проведення експерименту: а – аналізатор оксиду вуглецю, б – аналізатор формальдегіду та летючих сполук, в – анемометр

Методика проведення експерименту полягала в наступному: на висоті 320 мм від поверхні землі на різній відстані від отвору вихлопної труби проводилися виміри концентрації вказаних вище домішок. Для отримання даних про інтенсивність емісії кожного виду домішки проводився розрахунок за співвідношенням $Q = V_T \cdot S \cdot C$, де V_T – швидкість газового потоку у вихідному перерізі вихлопної труби, S – площа вихідного перерізу отвору вихлопної труби, C – концентрація домішки, що вимірювалася необхідним приладом у вихідному перерізі. Безпосередньо при проведенні експерименту параметри V_T та C вимірювалися на відстані 0,5 см від вихідного перерізу отвору вихлопної труби. Отримані дані були використані, як вхідна інформація для чисельного розрахунку на базі розробленого методу, за допомогою якого також були розраховані значення концентрації домішок в тих точках, в яких були проведені вимірювання. В представлених нижче таблицях наведено результати експериментальних вимірювань та розрахункові дані отримані за допомогою розробленого методу чисельного розрахунку.

Аналіз даних, що наведено в табл. 2.1–2.3, показує адекватність методу чисельного розрахунку. Відповідне відхилення пояснюється турбулізацією потоку, що викликано впливом корпусу автомобіля на аеродинаміку течії.

Таблиця 2.1 – Концентрація оксиду вуглецю на різних відстанях від джерела емісії

Відстань від вихлопної труби автомобіля, см	Концентрація CO, ppm (експеримент)	Концентрація CO, ppm (чисельно)
5	1900-1924	1908
10	1600-1648	1614
20	1000-1053	1016
30	780-834	792
40	545-621	558
50	290-312	298
60	260-294	272
70	200-221	214

Таблиця 2.2 – Концентрація формальдегіду на різних відстанях від джерела емісії

Відстань від вихлопної труби автомобіля, см	Концентрація формальдегіду, мг/м ³ (експеримент)	Концентрація формальдегіду, мг/м ³ (чисельно)
5	3,72-3,82	3,78
10	2,65-2,78	2,67
20	2,32-2,46	2,38
30	1,82-1,96	1,87
40	0,92-0,98	0,96
50	0,41-0,53	0,45
60	0,12-0,17	0,14

Таблиця 2.3 – Концентрація летючих органічних сполук на різних відстанях від джерела емісії

Відстань від вихлопної труби автомобіля, см	Концентрація летючих органічних сполук, мг/м ³ (експеримент)	Концентрація летючих органічних сполук, мг/м ³ (чисельно)
5	9,72-9,86	9,8
10	7,32-7,54	7,4
20	6,66-6,84	6,7
30	5,16-5,63	5,3
40	2,31-2,82	2,4
50	1,14-1,21	1,2
60	0,52-0,61	0,6
70	0,24-0,33	0,3

Тестова задача 2.2 Викид домішки від постійно діючого джерела емісії.

Одним із основних способів методу тестування є порівняння чисельних розрахунків з аналітичним (точним) рішенням задачі. Класичною задачею, яка є тестовою в межах класу задач, що розглядається в роботі, є задача про визначення концентрації домішки на різній відстані від постійно діючого джерела емісії домішки, розташованого на висоті H . Поле концентрації домішки для такої задачі може бути розраховано на базі наступної залежності [4]

$$C = \frac{M}{4\pi x \sqrt{k_y k_z}} e^{-\frac{W y^2}{4 k_y x}} \cdot \left(e^{-\frac{W(z+H)^2}{4 k_z x}} + e^{-\frac{W(z-H)^2}{4 k_z x}} \right). \quad (2.36)$$

У роботі [4] цей розв'язок використаний для тестування чисельної моделі при таких даних: $M=10^6$ мг/с; $k_z=5$ м²/с; $W=4$ м/с; $k_y=500$ м²/с; $y=0$; $H=120$ м; $z=120$ м – розрахунковий рівень.

Цей аналітичний розв'язок і наведені вихідні дані було використано в роботі для тестування розробленого методу чисельного розрахунку. Результати розв'язання наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Значення концентрації забруднювача на різній відстані від джерела

x , км	1	2	3	4
C , мг/м ³ (аналітичний розв'язок)	1,59	0,79	0,54	0,42
C , мг/м ³ (розрахунок за розробленим методом / розрахунок за чисельною моделлю [4])	1,77/1,8	0,87/0,9	0,65/0,6	0,52/0,5

Як видно з даних, наведених у таблиці, маємо задовільне узгодження розрахункових даних, отриманих на базі розробленого методу чисельного розрахунку й аналітичного розв'язку.

2.7 Оцінка рівня забруднення в робочих зонах промислових майданчиків

Розроблений в даному розділі чисельний метод прогнозу концентрації забруднюючих речовин в повітряному середовищі було застосовано для оцінювання рівня забруднення в робочих зонах промислових майданчиків та на відкритій місцевості промислових регіонів при комплексному врахуванні впливу різних видів домішок та різного типу джерел емісії.

2.7.1 Динаміка забруднення повітряного середовища на підприємстві Дніпропетровського металургійного заводу «ДМЗ ЄВРАЗ» та на прилеглій території

Розроблений метод чисельного розрахунку було застосовано для вивчення динаміки забруднення атмосферного повітря при стаціонарних викидах забруднюючих речовин Дніпропетровським металургійним заводом ДМЗ ЄВРАЗ (заводом ім. Петровського), розташованим на території міста Дніпра (рис. 2.5).

Дніпропетровський металургійний завод ім. Петровського (Євраз ДМЗ ім. Петровського) – підприємство повного металургійного циклу, спеціалізується на виробництві чавуну, сталі та прокату.

Виробничі потужності підприємства складають:

- дві доменні печі;
- три кисневі конвертери;
- два прокатні цехи.

Доменне виробництво. На Євраз ДМЗ ім. Петровського діють дві доменні печі – 963 тис. тон чавуну.

Виробництво сталі. Сталь виробляється в трьох кисневих конвертерах. Проектна потужність конвертерів становить 1 360 тис. тон сталі на рік.

Прокатні потужності. У Євраз ДМЗ ім. Петровського є два прокатних цехи: стан 550 і рейкобалковий стан – 886 тис. тон прокату.

Продукція підприємства включає:

- доменний цех – чавун переробний, чавун ливарний;
- киснево-конвертерний цех – сталь вуглецева звичайної якості, сталь рейкова, сталь галузевих призначень, сталь М, сталь 60С2АЗБ;
- прокатний цех № 1 – трубна заготівка, квадратна заготівка, прокат сортовий сталевий гарячекатаний круглий, рейки кранові, рейки трамвайні жолобчасті, рейки рудничні Р 34, фасонний прокат балка двотаврова спеціальна 22 С, швелер 24, прокат сталевий гарячекатаний круглий для стрижнів млинів барабанного типу, прокат сталевий гарячекатаний круглий, шахтна стійка СВП

33, профілі для футерування млинів, прокат броні рудорозмельних млинів, прокат броні млинів та інше;

– прокатний цех № 2 – сортовий прокат (швелери, куточки), профілі для автомобільної промисловості, профілі для вугільної промисловості.

Одночасно підприємство Євраз ДМЗ ім. Петровського є потужним джерелом викидів забруднюючих речовин і займає друге місце за забрудненням атмосферного повітря міста Дніпра.

Газ, що утворюється під час виплавляння чавуну в доменних печах є головно продуктом неповного згоряння вуглецю. Хімічний склад доменного газу за умов, що чавун виплавляють на кам'яно-вугільному коксі: 12–20 % CO_2 ; 20–30 % CO ; до 0,5 % CH_4 ; 1–4% H_2 ; 55–58 % N_2 . При збагаченні дуття киснем вміст азоту в газі знижується і відповідно цьому зростає кількість інших газів (у тому числі окисли вуглецю і водню). Газ дуже отруйний через наявність у його складі монооксиду вуглецю CO .

Більш детальний порівняльний аналіз викидів за 2016–2017 рр. наведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Кількісні показники різних сполук за їх хімічною класифікацією, які надійшли в атмосферне повітря від підприємства Євраз ДМЗ ім. Петровського у 2016–2017 рр.

Вид домішки	Кількість викидів, т/рік, 2016 р.	Кількість викидів, т/рік, 2017 р.
Оксид вуглецю, CO	4838,435	4626,364
Діоксид вуглецю, CO_2	2 143 298	1 959 9378
<u>Сполуки азоту:</u>	948,138	830,046
- оксиди азоту;	935,249	811,595
- аміак;	11,465	9,437
- оксид азоту;	1,424	6,014
<u>Діоксид та інші сполуки сірки:</u>	<u>677,632</u>	<u>597,403</u>
- діоксид сірки;	674,878	595,456
- сірководень;	2,690	1,892
- сірковуглець;	0,038	0,035
- сірчана кислота	0,026	0,020
<u>Неметанові леткі органічні сполуки:</u>	<u>9,269</u>	<u>7,305</u>

Вид домішки	Кількість викидів, т/рік, 2016 р.	Кількість викидів, т/рік, 2017 р.
- бензол;	6,450	4,974
- фенол;	1,479	1,261
- нафталін;	1,243	0,949
- толуол;	0,064	0,057
- ксилол;	0,023	0,044
-ацетон;	0,007	0,011
- кислота оцтова;	0,002	0,008
- піридин	0,001	0,001
Метан	25,995	24,690
Бензапірен	0,007	0,007
Синильна кислота	1,104	0,837
Хлор	0,001	0,003

Під час проведення дослідження було проаналізовано ряд робочих місць на території промислових майданчиків ДМЗ ЄВРАЗ. Більша частина робочих місць знаходиться на території промислових майданчиків цехов із залізнично-під'їзними коліями, де виконуються розвантажувально-навантажувальні роботи. На кожному з цих майданчиків в одну зміну працює від 6 до 10 чоловік.



Рисунок 2.5 – Вид моделюючої області (Google Earth Image, 2019): Дніпропетровський металургійний завод ДМЗ ЄВРАЗ (завод ім. Петровського): 1 – територія доменного цеху; 2 – територія прокатного цеху №1; 3 – джерела викиду забруднюючих речовин; А, В – розрахункові точки промислових майданчиків; С – точка спостереження (зупинка-станція Кодатська)

Для аналізу було обрано робочу зону 1 (рис. 2.5), що відповідає території розташування доменного цеху з кількістю робітників 60 чоловік в одну зміну, де працюють сталевари, плавильники та доменщики, машиністи металургійних кранів; та робочу зону 2 (рис. 2.5), що відповідає території розташування прокатного цеху № 1 з кількістю робітників 40 чоловік в одну зміну, де працюють нагрівальники, розливальники, машиністи металургійних кранів, підготовники составів до розливання плавок, плавильники прокату і труб, вальцовальники стану гарячої прокатки, різьбярі на пилах, ножівках та верстатах, шліфувальники.

Джерела емісії є постійно діючими. Згідно з даними екологічного паспорту міста щодо викидів в атмосферу великих підприємств, інтенсивність викиду діоксиду сірки усіма джерелами викиду ДМЗ ЄВРАЗ становила $Q=18,9$ г/с. Для кожного джерела емісії значення інтенсивності приймалося як середнє значення: $Q=18,9/n$ г/с, де n – кількість джерел емісії. При розрахунку швидкість вітру становила $U=6$ м/с при його напрямку $\alpha=120^\circ$ (рис. 2.5).

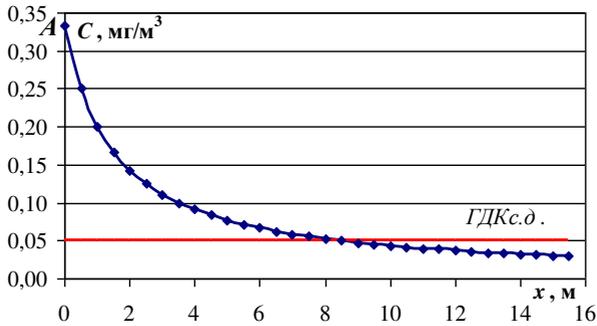


Рисунок 2.6 – Розподіл концентрації діоксиду сірки на території промислового майданчика доменного цеху Дніпропетровського металургійного заводу ДМЗ ЄВРАЗ

На рисунку 2.6 представлено розподіл концентрації діоксиду сірки на території робочої зони 1 (доменного цеху), порівняння проводилося з гранично допустимим (середньо добовим) значенням концентрації, яке для діоксиду

сірки складає $0,05 \text{ мг/м}^3$. Видно, що на частині майданчика спостерігається перевищення $ГДК_{с.д.}$, за точку початку відліку приймався початок промислового майданчика – точка A і в напрямку осі Ox розглядалася територія майданчику довжиною 16 м.

Аналогічним образом, як для діоксиду сірки, було проведено розрахунки по оцінці рівня забруднення повітряного середовища на підприємстві ДМЗ ЄВРАЗ при викиді інших сполук, що наведено в табл. 2.5. Розподіл інших складових суміші має аналогічний характер, відмінність складає лише в кількісному значенні концентрації, яке визначається інтенсивністю джерела забруднення по досліджуваній речовині (табл. 2.5). На рисунку 2.6 наведено розподіл концентрації діоксиду сірки, оскільки саме для даної речовини враховувався процес її хімічної трансформації в атмосфері (значення коефіцієнтів хімічної трансформації визначаються експериментально і відомі з літературних джерел).

Показник фактичного або прогнозного забруднення атмосферного повітря однією речовиною розраховується за формулою:

$$ПЗ = \frac{C}{ГДК_{м.р.}} \cdot 100\%, \quad (2.37)$$

де $ПЗ$ – показник забруднення; C – фактична або прогнозна концентрація конкретної речовини, мг/м^3 ; $ГДК_{м.р.}$ – значення гранично допустимої концентрації цієї речовини, мг/м^3 .

Для діоксиду сірки $ГДК_{м.р.} = 0,5 \text{ мг/м}^3$, а максимальна концентрація $C_{\text{мах}} = 0,3426 \text{ мг/м}^3$, тоді показник забруднення $ПЗ_{SO_2} = 0,6852 = 68,52 \%$.

Сумарний показник забруднення ($ПЗ$) сумішшю речовин розраховується за формулою:

$$ПЗ_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{nn} \frac{C_i}{ГДК_i \cdot K_i} \cdot 100\%, \quad (2.38)$$

де $ПЗ_{\Sigma}$ – сумарний показник забруднення; C_i – значення фактичних або

прогнозних концентрацій речовин, що входять до складу суміші, мг/м^3 ; $ГДК_i$ – значення гранично допустимих концентрацій (максимально разових) відповідних забруднюючих речовин, що входять до складу суміші, мг/м^3 ; n – кількість елементів суміші; K_i – значення коефіцієнтів, які враховують клас небезпечності відповідної речовини: для речовин 1-го класу (надзвичайно небезпечні) – 0,8; 2-го класу (високо небезпечні) – 0,9; 3-го класу (помірно небезпечні) – 1,0; 4-го класу (мало небезпечні) – 1,1.

Було проведено розрахунки для сумарного показника забруднення відповідних забруднюючих речовин, що потрапляють в повітряне середовище з викидами підприємства ДМЗ ЄВРАЗ в розрахунковій точці А на території промислового майданчика доменного цеху (табл. 2.6).

Таблиця 2.6 – Кількісні розрахунки сумарного показника забруднення $(ПЗ_{\Sigma})_A$ в розрахунковій точці А на території промислового майданчика доменного цеху заводу ДМЗ ЄВРАЗ

Речовина	Інтенсивність викиду, г/с	Концентрація, мг/м^3 (точка А)	K_i / клас небезпечності	$ГДК_i$, мг/м^3	$ПЗ_i$	$\sum_{i=1}^n ПЗ_i$
Оксид вуглецю, CO	146,656	2,6584	1,1/4	5	0,48331	7,165= 717 %
Діоксид вуглецю, CO_2	62130	1126,4169	1,0/3	-	-	
<u>Сполуки азоту:</u>	<u>26,312</u>	<u>0,4770</u>				
- оксиди азоту;	25,728	0,4664	1,0/3	0,085	5,48712	
- аміак;	0,299	0,0054	1,1/4	0,2	0,02461	
- оксид азоту;	0,191	0,0035	0,9/2	0,4	0,00972	
<u>Діоксид та інші сполуки сірки:</u>	<u>18,938</u>	<u>0,3433</u>				
- діоксид сірки;	18,876	0,3426	1,0/3	0,5	0,68521	
- сірководень;	0,059	0,0010	0,8/1	0,008	0,15625	
- сірковуглець;	0,001	0,00002	0,9/2	0,03	0,00074	
- сірчана кислота	0,0006	0,00001	0,9/2	0,3	0,00004	
<u>Неметанові леткі органічні сполуки:</u>	<u>0,232</u>	<u>0,0042</u>				
- бензол;	0,158	0,0029	0,9/2	1,5	0,00214	
- фенол;	0,039	0,0007	0,9/2	0,01	0,07778	
- нафталін;	0,031	0,0006	1,1/4	0,003	0,18182	
- толуол;	0,002	0,00004	1,0/3	0,06	0,00067	
- ксилол;	0,001	0,00002	1,0/3	0,2	0,00012	

Речовина	Інтенсивність викиду, г/с	Концентрація, мг/м ³ (точка А)	K_i / клас небезпечності	$\Gamma ДК_i$, мг/м ³	$ПЗ_i$	$\sum_{i=1}^n ПЗ_i$
-ацетон;	0,0003	0,000005	1,1/4	0,35	$1,1 \cdot 10^{-6}$	
- кислота оцтова;	0,0003	0,000005	1,0/3	5	$1,1 \cdot 10^{-6}$	
- піридин	0,00003	0,0000005	1,0/3	5	$1,1 \cdot 10^{-7}$	
Метан	0,783	0,0142	1,1/4	-	-	
Бензапірен	0,0002	0,000004	0,8/1	0,01с.д.	0,00051	
Синільна кислота	0,027	0,00049	0,9/2	0,01с.д.	0,05444	
Хлор	0,0001	0,000002	0,9/2	0,1	0,00002	

Аналіз проведених розрахунків показує, що сумарний показник забруднення $(ПЗ_\Sigma)_A$ в розрахунковій точці А на території промислового майданчика доменного цеху Дніпропетровського металургійного заводу ДМЗ ЄВРАЗ перевищує допустиме у 7,2 рази.

Такі обчислення було проведено для кожної точки виділеного промислового майданчику доменного цеху, середнє значення сумарного показника забруднення $(ПЗ_\Sigma)_{сеп.} = 6,4$.

Аналогічні дослідження було проведено і для промислового майданчику, що знаходиться біля прокатного цеху №1 – робоча зона 2 (рис. 2.7) [110, 112].

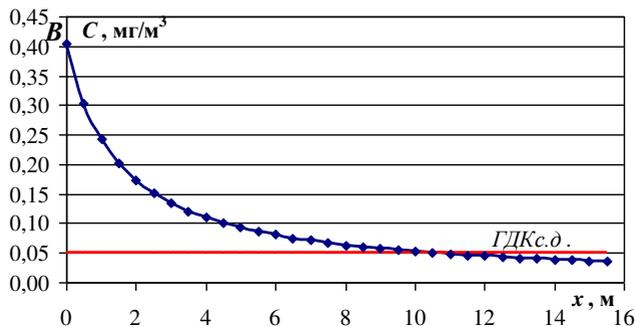


Рисунок 2.7 – Розподіл концентрації діоксиду сірки на території промислового майданчика прокатного цеху №1 Дніпропетровського металургійного заводу ДМЗ ЄВРАЗ

На рисунку 2.7 представлено розподіл концентрації діоксиду сірки на території промислового майданчику робочої зон 2 (прокатного цеху №1).

Видно, що на частині майданчика довжиною 10 м спостерігається перевищення $ГДК_{с.д.}$, за точку початку відліку приймався початок промислового майданчика – точка B і в напрямку осі Ox розглядалася територія майданчику довжиною 16 м. В цьому випадку максимальна концентрація $C_{\max}=0,4033 \text{ мг/м}^3$, з урахуванням $ГДК_{\text{м.р.}}=0,5 \text{ мг/м}^3$, показник забруднення згідно формули (2.37) складає $ПЗ_{SO_2}=0,8066=80,66 \%$.

В таблиці 2.7 виконано розрахунки сумарного показника забруднення для $(ПЗ_{\Sigma})_B$ в розрахунковій точці B на території промислового майданчика прокатного цеху №1 заводу ДМЗ ЄВРАЗ

Таблиця 2.7 – Кількісні розрахунки сумарного показника забруднення $(ПЗ_{\Sigma})_B$ в розрахунковій точці B на території промислового майданчика прокатного цеху №1 заводу ДМЗ ЄВРАЗ

Речовина	Інтенсивність викиду, г/с	Концентрація, мг/м^3 (точка B)	K_i / клас небезпечності	$ГДК_i$, мг/м^3	$ПЗ_i$	$\sum_{i=1}^n ПЗ_i$
Оксид вуглецю, CO	146,656	3,1289	1,1/4	5	0,5689	8,458=846 %
Діоксид вуглецю, CO_2	62130,23	1325,9893	1,0/3	-	-	
<u>Сполуки азоту:</u>	<u>26,312</u>	<u>0,5614</u>				
- оксиди азоту;	25,728	0,5489	1,0/3	0,085	6,45764	
- аміак;	0,299	0,0064	1,1/4	0,2	0,02909	
- оксид азоту;	0,191	0,0041	0,9/2	0,4	0,01139	
<u>Діоксид та інші сполуки сірки:</u>	<u>18,938</u>	<u>0,4041</u>				
- діоксид сірки;	18,876	0,4033	1,0/3	0,5	0,80661	
- сірководень;	0,059	0,0012	0,8/1	0,008	0,18751	
- сірковуглець;	0,001	0,000024	0,9/2	0,03	0,00089	
- сірчана кислота	0,0006	0,000012	0,9/2	0,3	0,00004	
<u>Неметанові леткі органічні сполуки:</u>	<u>0,232</u>	<u>0,0049</u>				
- бензол;	0,158	0,00342	0,9/2	1,5	0,00253	
- фенол;	0,039	0,00082	0,9/2	0,01	0,09111	
- нафталін;	0,031	0,00071	1,1/4	0,003	0,21515	
- толуол;	0,002	0,000047	1,0/3	0,06	0,00078	
- ксилол;	0,001	0,000024	1,0/3	0,2	0,00123	
- ацетон;	0,0003	0,000006	1,1/4	0,35	0,00002	
- кислота оцтова;	0,0003	0,000006	1,0/3	5	$1,2 \cdot 10^{-6}$	

Речовина	Інтенсивність викиду, г/с	Концентрація, мг/м ³ (точка В)	K_i / клас небезпечності	$ГДК_i$, мг/м ³	$ПЗ_i$	$\sum_{i=1}^n ПЗ_i$
- піридин	0,00003	0,0000006	1,0/3	5	$1,2 \cdot 10^{-7}$	
Метан	0,783	0,01671	1,1/4	-	-	
Бензапірен	0,0002	0,000005	0,8/1	0,01с.д.	0,00063	
Синильна кислота	0,027	0,00058	0,9/2	0,01с.д.	0,06444	
Хлор	0,0001	0,000002	0,9/2	0,1	0,00002	

Аналіз проведених розрахунків показує, що сумарний показник забруднення ($ПЗ_{\Sigma}$)_В в розрахунковій точці В на території промислового майданчика прокатного цеху №1 металургійного заводу ДМЗ ЄВРАЗ перевищує допустиме у 8,5 рази.

Такі обчислення було проведено для кожної точки виділеного промислового майданчику прокатного цеху №1, середнє значення сумарного показника забруднення ($ПЗ_{\Sigma}$)_{сеп.} = 7,2.

В результаті розрахунків показника забруднення для 32 точок промислового майданчику доменного цеху було отримано сумарний показник забруднення ($ПЗ_{\Sigma}$)_{сеп.} = 6,4, а для 32 точок промислового майданчику прокатного цеху №1 ($ПЗ_{\Sigma}$)_{сеп.} = 7,2, тому середнє значення для усієї території розраховувалося, як середнє квадратичне значення, яке дорівнює 6,8 або 680 %.

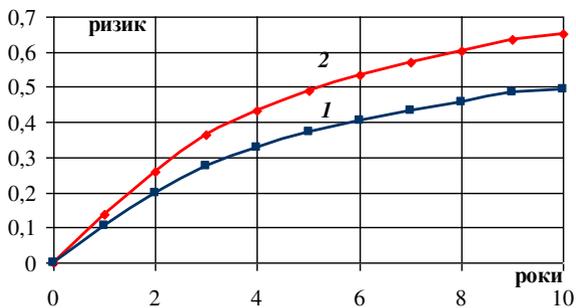


Рисунок 2.8 – Зміна ризику хронічної інтоксикації діоксидом сірки на території Дніпропетровського металургійного заводу ДМЗ ЄВРАЗ: 1 – доменний цех; 2 – прокатний цех № 1

На рисунку 2.8 представлено зміну ризику хронічних захворювань для працівників Дніпропетровського металургійного заводу ДМЗ ЄВРАЗ в робочих зонах 1 та 2 (рис. 2.5).

Аналіз показує, що через один рік ризик хронічних захворювань робітників промислового майданчика робочої зони 1 складає 11 %, а через 10 років 49 %, тоді як для робітників промислового майданчику робочої зони 2 ризик захворювання через рік складає 14 %, а через 10 років 65 %. Можна спостерігати, що ризик захворювань на промисловому майданчику другої робочої зони більше в порівнянні з величиною ризику захворювання робітників промислового майданчику першої робочої зони, оскільки територія цього майданчику підпадає під вплив більшої кількості джерел забруднення з урахуванням вказаного напрямку вітру.

Аналогічним чином було проведено розрахунки ризику виникнення хронічних захворювань у робітників як локально, на обраних майданчиках, так і на території усього підприємства з урахуванням дії кожної окремої домішки, представленої в табл. 2.5.

В результаті проведених розрахунків було отримано матрицю комбінованого ризику на території Дніпропетровського металургійного заводу ДМЗ ЄВРАЗ (рис. 2.9).



Рисунок 2.9 – Матриця комбінованого ризику виникнення хронічних захворювань у робітників на території металургійного заводу ДМЗ ЄВРАЗ

Комбінований ризик визначається за співвідношенням (2.35), яке наведено в роботі В.Т. Алімова, а саме:

$$Risk = 1 - (1 - Risk_1) \cdot (1 - Risk_2) \cdot (1 - Risk_3) \cdot (1 - Risk_n),$$

де $Risk_1, \dots, Risk_n$ – ризик дії кожної окремої домішки.

При подальшому дослідженні виконувалися виміри викидів CO на границі розташування Дніпропетровського металургійного заводу ДМЗ ЄВРАЗ, а саме на відстані 10 м від паркану, що оточує підприємство. C – точка спостереження, що відповідає зупинці, яка розташовується навпроти станції Кодатська на проспекті Свободи (рис. 2.5). Для вимірювання концентрації оксиду вуглецю CO використовувався аналізатор Carbon Monoxide Meter Model: 7701 (рис. 2.4 а).

Таблиця 2.8 – Метеорологічні дані атмосферного повітря

Параметри	11 вересня 2018 р	12 вересня 2018 р	13 вересня 2018 р
Швидкість вітру, м/с	5	3	4
Напрямок вітру	північно-східний	північно-східний	північно-східний
Тиск, мм рт. ст.	748	753	753
Вологість, %	92	81	85
Температура, °C	17	18	19

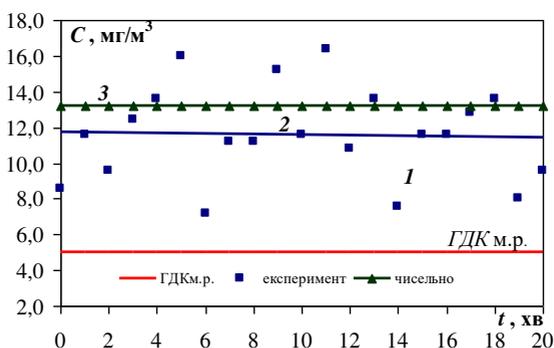


Рисунок 2.10 – Зміна концентрації CO з часом в точці спостереження: 1 – експеримент; 2 – лінія тренду для експериментальних даних; 3 – розрахунок за розробленим методом

Експерименти проводилися впродовж 10–12 години ранку на протязі трьох днів 11–13 вересня 2018 р., метеорологічні дані атмосферного повітря наведено в табл. 2.8. Результати вимірювання концентрації CO впродовж 20 хв наведено на графіку (рис. 2.10) для 12 вересня.

Звісно, значення концентрації змінюються в залежності від метеорологічних даних, але загальна картина зміни концентрації з часом має ідентичний характер, тобто спостерігаються пульсації даної величини, обумовлені процесами турбулентності.

За результатами вимірювання було побудовано лінію тренду, яка є геометричним відображенням середніх значень аналізованих показників концентрації. Осереднене значення концентрації впродовж обраних 20 хв складає $11,8 \text{ мг/м}^3$, тоді як за обраним методом значення концентрації складало $13,2 \text{ мг/м}^3$.

На наступному етапі дослідження виконувалися розрахунки рівня забруднення атмосферного повітря на прилеглий території. Джерело емісії приймалося постійно діючим. Інтенсивність викиду діоксиду сірки становила $Q=18,9 \text{ г/с}$. Розрахунок виконувався при наступних параметрах: розміри розрахункової області $18 \times 8 \text{ км}$; коефіцієнт дифузії $\mu=(0,1 \div 1) \cdot U$; осереднення по висоті перенесення 600 м .



Рисунок 2.11 – Зона забруднення діоксидом сірки при направленні вітру $\alpha=120^\circ$, одне джерело забруднення (ЄВРАЗ ДМЗ)

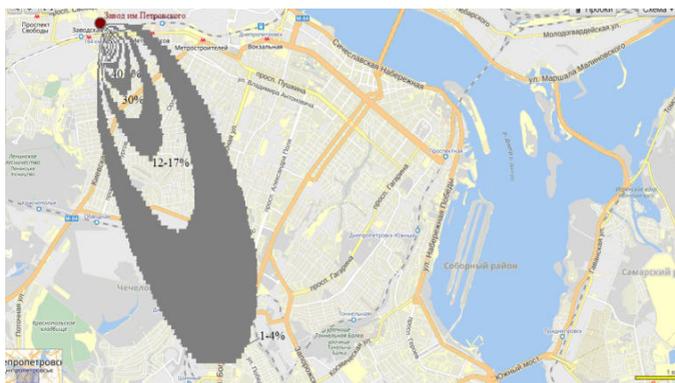


Рисунок 2.12 – Зона забруднення діоксидом сірки при направленні вітру $\alpha=160^\circ$, одне джерело забруднення (ЄВРАЗ ДМЗ)

На рисунку 2.11 – 2.12 значення концентрації представлено у відсотках від величини максимальної концентрації на конкретний розрахунковий момент часу [157].

У першому варіанті розрахунку швидкість вітру становила $U=6$ м/с при направленні вітру $\alpha=120^\circ$ (рис. 2.11), $C_{\max}=0,3426$ мг/м³, $t=52$ с; у другому варіанті розрахунку швидкість вітру – $U=8$ м/с при направленні вітру з північного заходу $\alpha=160^\circ$ (рис. 2.12), $C_{\max}=0,3226$ мг/м³, $t=52$ с.

При цьому видно, як з часом формується значна зона забруднення. Хмара забруднення дуже швидко охоплює прилеглі райони, що знаходяться за напрямком вітру.

При розгляді першої метеорологічної ситуації (рис. 2.11) в зону забруднення потрапляють: пр. Свободи, пр. Мазепи, пр. Металургів, пр. Пушкіна, пр. Олександра Поля, пр. Гагаріна. Концентрація діоксиду сірки змінюється за такою залежністю: вул. Заводська – до 55 %, вул. Київська – до 45 %, вул. Орловська – до 32 %, вул. Робоча – до 20 %, вул. Титова – до 10 %.

При розгляді другої метеорологічної ситуації (рис. 2.12), згідно з якою було змінено напрям вітру $\alpha=60^\circ$ і швидкість вітру $U=8$ м/с, в зону забруднення потрапляють: пр. Свободи, пр. Мазепи, пр. Металургів, пр. Богдана

Хмельницького. Концентрація діоксиду сірки змінюється за такою залежності: вул. Заводська – до 45 %; вул. Київська – до 40 %, вул. Орловська – до 30 %, вул. Робоча – до 15 %, вул. Титова – до 7 %, вул. Перемоги – менше 4 %.

2.7.2 Динаміка забруднення повітряного середовища на підприємстві коксохімічного заводу «Дніпрококс» та на прилеглій території

Підприємство ВАТ «Дніпрококс» є складовою металургійної промисловості України. Коксохімічний завод призначений для високотемпературної переробки кам'яного вугілля методом коксування з метою одержання коксу, коксового газу й хімічних продуктів коксування.

«Дніпрококс» увійшов до складу ДМЗ ЄВРАЗ ім. Петровського, як структурний підрозділ – коксохімічне підприємство.

Підприємство «Дніпрококс» випускає кокс та хімічні продукти коксування (кам'яновугільна смола, аміак, сирий бензол, толуол, ксилол, сульфат амонію та інше.). На підприємстві «Дніпрококс» цехова виробнича структура.

До складу коксохімічного заводу входять основні цехи, допоміжні цехи та заводоуправління.

До основних цехів відносяться:

- вуглепідготовчий;
- вуглезбагачувальний;
- коксовий;
- уловлювання первинних хімічних продуктів коксування;
- переробки первинних хімічних продуктів коксування.

Загальне призначення основних цехів полягає в переробці сировини та напівфабрикатів в готову продукцію.

До допоміжних цехів та підрозділів відносять:

- ремонтні цехи (електроремонтний, механічний, ремонтно-будівельний, котельно-монтажний);
- енергетичні цехи (парасиловий, ТЕЦ, КИПіА);

– підсобні служби та господарства.

Допоміжні цехи сприяють виробництву основної продукції і забезпечують нормальну роботу всіх виробничих ланок заводу.

До обслуговуючих цехів відносять:

- автотранспортний
- залізничний
- комунально-господарський та ін.

Вуглепідготовчий цех. Цех призначений для забезпечення коксових батарей вугільною шихтою, що складається з вугілля різних технологічних марок. У вуглепідготовчому цеху здійснюють розвантаження, зберігання вугілля, що поступає на коксування, усереднювання їх по марках або технологічних групах, дроблення і подачу готової вугільної шихти в коксовий цех.

Цех має високопродуктивні гаражі для розморожування вугільних концентратів в зимовий час, вагоперекидачі, відкритий і закритий вугільні склади, сучасні автоматичні дозатори, подрібнювальне устаткування. Прогресивна схема групового дроблення компонентів і відсівання дрібних фракцій забезпечують необхідну якість коксу вже на стадії підготовки вугільної сировини.

У *збагачувальному цеху* здійснюються головні і частково підготовчі і заключні операції (підготовче просівання, обезпилювання, знешламування, власне збагачення, звезводнювання й ін.). Цей цех є основним у загальному технологічному комплексі.

Коксовий цех. У коксовому цеху здійснюють технологічний процес отримання коксової продукції встановленої якості за технологією попереднього трамбування вугільного завантаження з виділенням пароподібних і газоподібних продуктів – прямого коксового газу, який прямує в цех уловлювання.

Цех уловлювання. У цеху уловлювання здійснюють уловлювання хімічних продуктів коксування і отримання на їх основі товарних продуктів (сульфату

амонію, сирого бензолу, смоли кам'яновугільної, фенолатів), а також подачу очищеного коксового газу споживачам. Згідно з проектом, цех уловлювання розрахований на переробку коксового газу в об'ємі 200 000 м³/годину. Стан устаткування і технології забезпечують виробництво хімічної продукції, відповідної вимогам технічних умов.

Цех сіркоочистки. У цеху сіркоочистки здійснюють технологічний процес очищення коксового газу від сірководня і отримання висококонцентрованої сірчаної кислоти. Проектна потужність цеху газу, що за об'ємом переробки складає 200 000 м³/годину. Залишковий зміст сірководня в очищеному коксовому газі складає 0,1 г/м³.

Таблиця 2.9 – Кількісні показники різних сполук за їх хімічною класифікацією, які надійшли в атмосферне повітря від «Дніпровського коксохімічного заводу» у 2016–2017 рр.

Вид домішки	Кількість викидів, т/рік (2016 р)	Кількість викидів, т/рік (2017 р)
Всього	1278,078	1335,928
Оксид вуглецю, CO	269,933	272,878
Діоксид вуглецю, CO ₂	154 989,211	170 646,197
<u>Сполуки азоту:</u>	<u>349,985</u>	<u>351,945</u>
- оксиди азоту;	319,382	319,367
- аміак;	30,244	32,183
- оксид азоту;	0,359	0,395
<u>Діоксид та інші сполуки сірки:</u>	<u>502,323</u>	<u>553,894</u>
- діоксид сірки;	496,406	547,276
- сірководень;	5,894	6,594
- сірковуглець;	0,023	0,024
<u>Неметанові легкі органічні сполуки:</u>	<u>16,247</u>	<u>12,091</u>
- бензол;	5,501	6,373
- фенол;	8,469	3,059
- нафталін;	2,277	2,659
Метан	23,369	27,315
Бензапірен	0,005	0,005
Синильна кислота	2,997	2,858
Фтористий водень	0,012	0,012

Під час роботи коксохімічного заводу до атмосферного повітря потрапляють різні забруднюючі речовини, порівняльний аналіз викидів, які надійшли за 2016–2017 рр. наведено в табл. 2.9.

Під час проведення досліджень було також проаналізовано ряд робочих місць на території промислових майданчиків «Дніпрококс» рис. 2.13. Більша частина робочих місць знаходиться на території закритих промислових майданчиків виробничих цехів. Для аналізу було обрано відкриті майданчики автотранспортного і ремонтного цехів, де виконуються електроремонтні, механічні, ремонтно-будівельні, та монтажні роботи.

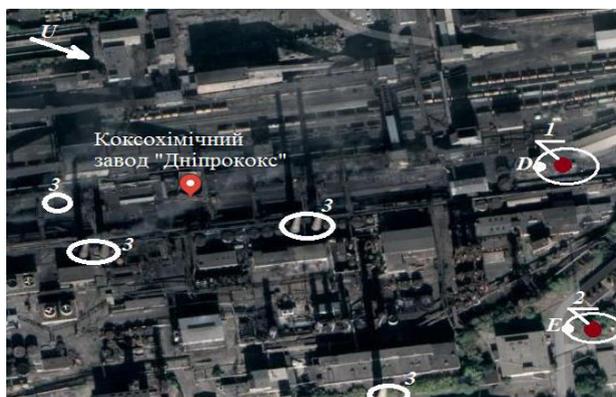


Рисунок 2.13 – Вид моделюючої області (Google Earth Image, 2019): коксохімічний завод «Дніпрококс»: 1 – майданчик ремонтного цеху; 2 – майданчик автотранспортного цеху; 3 – джерела викиду забруднюючих речовин

Розроблений метод було застосовано для вивчення динаміки забруднення атмосферного повітря території заводу «Дніпрококс» при стаціонарних викидах діоксиду сірки двома промисловими підприємствами міста Дніпра: Дніпропетровським металургійним заводом ДМЗ ЄВРАЗ (заводом ім. Петровського) і коксохімічним заводом «Дніпрококс».

Вихідні дані, метеорологічні параметри приймалися такими ж, як при першому варіанті розрахунку при наявності одного джерела забруднення.

Джерела викиду забруднюючих речовин є постійно діючими. Згідно з

даними екологічного паспорту міста щодо викидів в атмосферу великих підприємств [63], інтенсивність викиду діоксиду сірки усіма джерелами викиду заводу «Дніпрококс» становила $Q=17,6$ г/с на 2017 р. Для кожного джерела емісії значення інтенсивності приймалося як середнє значення: $Q=17,6/n$ г/с, де n – кількість джерел емісії. При розрахунку швидкість вітру становила $U=6$ м/с при його напрямку $\alpha=120^\circ$ (рис. 2.13).

На рисунку 2.14 представлено розподіл концентрації діоксиду сірки на території майданчика ремонтного цеху, порівняння проводилося з гранично допустимим (середньо добовим) значенням концентрації $0,05$ мг/м³. Розрахунки виконувалися для двох ситуацій: у випадку, коли враховуються викиди одного коксохімічного заводу «Дніпрококс» та у випадку, коли враховуються викиди двох заводів «Дніпрококс» та заводу ім. Петровського. Видно, що на усьому майданчику спостерігається перевищення ГДКс.д., за точку початку відліку приймався початок промислового майданчика – точка D і в напрямку осі Ox розглядалася територія майданчика довжиною 16 м.

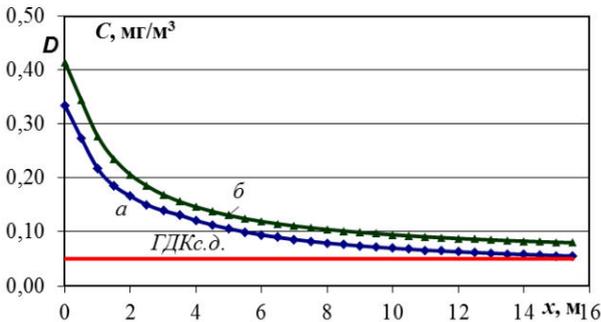


Рисунок 2.14 – Розподіл концентрації діоксиду сірки на території промислового майданчика ремонтного цеху заводу «Дніпрококс»: a – враховуються викиди одного коксохімічного заводу; b – враховуються викиди двох заводів

Аналогічним образом, як для діоксиду сірки, було проведено розрахунки по оцінці рівня забруднення повітряного середовища на території заводу

«Дніпрококс» при викиді інших сполук, що наведено в табл. 2.10. Розподіл інших складових, як відмічалось вище, має аналогічний характер, відмінність складає лише в кількісному значенні концентрації, яке визначається інтенсивністю джерела забруднення по досліджуваній речовині (табл. 2.10).

Таблиця 2.10 – Кількісні розрахунки сумарного показника забруднення $(\sum_{i=1}^n PZ_i)_D$ в розрахунковій точці D на території промислового майданчика ремонтного цеху «Дніпровського коксохімічного заводу» за 2017 р. з урахуванням викидів лише підприємства «Дніпрококс»

Речовина	Інтенсивність викиду, г/с	Концентрація, мг/м ³ (точка D)	K_i / клас небезпечності	$ГДК_i$, мг/м ³	PZ_i	$\sum_{i=1}^n PZ_i$
Оксид вуглецю, CO	8,773	0,1588	1,1/4	5	0,0289	4,393= 439 %
Діоксид вуглецю, CO_2	5486,275	1126,4169	1,0/3	-	-	
<u>Сполуки азоту:</u>	<u>11,315</u>	<u>0,2048</u>				
- оксиди азоту;	10,268	0,1858	1,0/3	0,085	2,18588	
- аміак;	1,0347	0,0187	1,1/4	0,2	0,08531	
- оксид азоту;	0,0127	0,0002	0,9/2	0,4	0,00056	
<u>Діоксид та інші сполуки сірки:</u>	<u>17,808</u>	<u>0,3223</u>				
- діоксид сірки;	17,5949	0,3187	1,0/3	0,5	0,63694	
- сірководень;	0,2119	0,0039	0,8/1	0,008	0,59956	
- сірковуглець;	0,0008	0,00001	0,9/2	0,03	0,00052	
<u>Неметанові леткі органічні сполуки:</u>	<u>0,389</u>	<u>0,007</u>				
- бензол;	0,2049	0,0037	0,9/2	1,5	0,00275	
- фенол;	0,0983	0,0018	0,9/2	0,01	0,19778	
- нафталін;	0,08548	0,0015	1,1/4	0,003	0,46888	
Метан	0,8782	0,0159	1,1/4	-	-	
Бензапірен	0,0002	0,0000029	0,8/1	0,01с.д.	0,00036	
Синильна кислота	0,0919	0,0017	0,9/2	0,01с.д.	0,18479	
Фтористий водень	0,0004	0,000007	0,8/1	0,02	0,00044	

Показник фактичного або прогнозного забруднення атмосферного повітря однією речовиною розраховується за формулою (2.37). Для діоксиду сірки $ГДК_{м.р.}=0,5$ мг/м³, а максимальна концентрація $C_{\max}=0,3187$ мг/м³, тоді показник забруднення $PZ_{SO_2} = 0,6374 = 63,74$ % з урахуванням викиду тільки

одного коксохімічного заводу. $C_{\max}=0,4143 \text{ мг/м}^3$, тоді показник забруднення $ПЗ_{SO_2} = 0,8286 = 82,86 \%$ з урахуванням викиду діоксиду сірки двома підприємствами: «Дніпрококс» та заводом ім. Петровського.

Сумарний показник забруднення $(ПЗ_{\Sigma})_D$ сумішню речовин розраховується за формулою (2.38). Було проведено розрахунки сумарного показника забруднення відповідних забруднюючих речовин, що потрапляють в повітряне середовище з викидами підприємства «Дніпрококс» табл. 2.10.

Аналіз проведених розрахунків показує, що сумарний показник забруднення $(ПЗ_{\Sigma})_D$ в розрахунковій точці D на території промислового майданчика ремонтного цеху «Дніпровського коксохімічного заводу» перевищує допустиме у 4,4 рази. Такі обчислення було проведено для кожної точки виділеного промислового майданчику ремонтного цеху, середнє значення сумарного показника забруднення $(ПЗ_{\Sigma})_{сер.}=3,8$.

В продовження досліджень проведено розрахунки сумарного показника забруднення відповідних забруднюючих речовин, що потрапляють в повітряне середовище з урахуванням викидів підприємства «Дніпрококс» і заводу Петровського табл. 2.11.

Таблиця 2.11 – Кількісні розрахунки сумарного показника забруднення $(ПЗ_{\Sigma})_D$ в розрахунковій точці D на території промислового майданчика ремонтного цеху «Дніпровського коксохімічного заводу» за 2017 р. з одночасним урахуванням викидів підприємства «Дніпрококс» і заводу Петровського

Речовина	Інтенсивність викиду, г/с	Концентрація, мг/м ³ (точка D)	K_i / клас небезпечності	$ГДК_i$, мг/м ³	$ПЗ_i$	$\sum_{i=1}^n ПЗ_i$
Оксид вуглецю, CO	8,773	0,2064	1,1/4	5	0,03753	5,711=571 %
Діоксид вуглецю, CO_2	5486,275	1464,3419	1,0/3	-	-	
<u>Сполуки азоту:</u>	<u>11,315</u>	<u>0,2662</u>				
- оксиди азоту;	10,268	0,2415	1,0/3	0,085	2,84164	
- аміак;	1,0347	0,0243	1,1/4	0,2	0,11090	
- оксид азоту;	0,0127	0,0003	0,9/2	0,4	0,00073	

Речовина	Інтенсивність викиду, г/с	Концентрація, мг/м ³ (точка <i>D</i>)	K_i / клас небезпечності	$ГДК_i$, мг/м ³	$ПЗ_i$	$\sum_{i=1}^n ПЗ_i$
<u>Діоксид та інші сполуки сірки:</u>	<u>17,808</u>	<u>0,4189</u>				
- діоксид сірки;	17,5949	0,4143	1,0/3	0,5	0,82802	
- сірководень;	0,2119	0,0051	0,8/1	0,008	0,77943	
- сірковуглець;	0,0008	0,000013	0,9/2	0,03	0,00068	
<u>Неметанові леткі органічні сполуки:</u>	<u>0,389</u>	<u>0,0091</u>				
- бензол;	0,2049	0,0048	0,9/2	1,5	0,00358	
- фенол;	0,0983	0,0023	0,9/2	0,01	0,25711	
- нафталін;	008548	0,0019	1,1/4	0,003	0,60954	
Метан	0,8782	0,02067	1,1/4	-	-	
Бензапірен	0,0002	0,0000038	0,8/1	0,01с.д.	0,00047	
Синільна кислота	0,0919	0,0022	0,9/2	0,01с.д.	0,24022	
Фтористий водень	0,0004	0,000009	0,8/1	0,02	0,00057	

Таким чином, сумарний показник забруднення $(ПЗ_{\Sigma})_D$ в розрахунковій точці *D* на території промислового майданчика ремонтного цеху «Дніпровського коксохімічного заводу» у випадку, коли одночасно враховуються викиди підприємства «Дніпрококс» і заводу Петровського перевищує допустиме у 5,7 рази.

Такі обчислення було проведено для кожної точки виділеного промислового майданчику ремонтного цеху, середнє значення сумарного показника забруднення $(ПЗ_{\Sigma})_{сеп.} = 4,9$.

Аналогічні дослідження було проведено і для промислового майданчику автотранспортного цеху. На рисунку 2.15 представлено розподіл концентрації діоксиду сірки на території вказаного промислового майданчика також для двох ситуацій: у випадку, коли враховуються викиди одного коксохімічного заводу «Дніпрококс» та у випадку, коли враховуються викиди заводу «Дніпрококс» та заводу ім. Петровського. Видно, що на усьому майданчику спостерігається перевищення $ГДКс.д.$, за точку початку відліку приймався початок промислового майданчика – точка *E* і в напрямку осі *Ox* розглядалася територія майданчику довжиною 16 м.

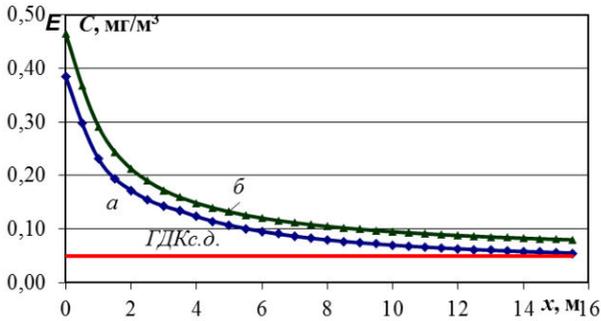


Рисунок 2.15 – Розподіл концентрації діоксиду сірки на території промислового майданчика автотранспортного цеху заводу «Дніпрококс»: *а* – враховуються викиди одного коксохімічного заводу; *б* – враховуються викиди двох заводів

Максимальна концентрація $C_{\max}=0,3569$ мг/м³, тоді показник забруднення $PZ_{SO_2} = 0,7139 = 71,39\%$ з урахуванням викиду тільки одного коксохімічного заводу. $C_{\max}=0,4641$ мг/м³, тоді показник забруднення $PZ_{SO_2} = 0,9281 = 92,81\%$ з урахуванням викиду діоксиду сірки двома підприємствами: «Дніпрококс» та заводом ім. Петровського.

Було проведено розрахунки сумарного показника забруднення для промислового майданчика автотранспортного цеху відповідних забруднюючих речовин, що потрапляють в повітряне середовище з викидами підприємства «Дніпрококс» табл. 2.12.

Таблиця 2.12 – Кількісні розрахунки сумарного показника забруднення $(PZ_{\Sigma})_E$ в розрахунковій точці *E* на території промислового майданчика ремонтного цеху «Дніпровського коксохімічного заводу» за 2017 р. з урахуванням викидів лише підприємства «Дніпрококс»

Речовина	Інтенсивність викиду, г/с	Концентрація, мг/м ³ (точка <i>D</i>)	K_i / клас небезпечності	$ГДК_i$, мг/м ³	PZ_i	$\sum_{i=1}^n PZ_i$
Оксид вуглецю, <i>CO</i>	8,773	0,177	1,1/4	5	0,0324	4,921= 492 %
Діоксид вуглецю,	5486,275	1261,5869	1,0/3	-	-	

Речовина	Інтенсивність викиду, г/с	Концентрація, мг/м ³ (точка D)	K_i / клас небезпечності	$ГДК_i$, мг/м ³	$ПЗ_i$	$\sum_{i=1}^n ПЗ_i$
CO_2						
<u>Сполуки азоту:</u>	<u>11,315</u>	<u>0,2294</u>				
- оксиди азоту;	10,268	0,2081	1,0/3	0,085	2,44819	
- аміак;	1,0347	0,0209	1,1/4	0,2	0,09554	
- оксид азоту;	0,0127	0,00022	0,9/2	0,4	0,00063	
<u>Діоксид та інші сполуки сірки:</u>	<u>17,808</u>	<u>0,3609</u>				
- діоксид сірки;	17,5949	0,3569	1,0/3	0,5	0,71337	
- сірководень;	0,2119	0,0044	0,8/1	0,008	0,67151	
- сірковуглець;	0,0008	0,00001	0,9/2	0,03	0,00058	
<u>Неметанові леткі органічні сполуки:</u>	<u>0,389</u>	<u>0,0078</u>				
- бензол;	0,2049	0,0041	0,9/2	1,5	0,00308	
- фенол;	0,0983	0,0020	0,9/2	0,01	0,22151	
- нафталін;	008548	0,0017	1,1/4	0,003	0,52515	
Метан	0,8782	0,0178	1,1/4	-	-	
Бензапірен	0,0002	0,0000032	0,8/1	0,01с.д.	0,00040	
Синильна кислота	0,0919	0,0019	0,9/2	0,01с.д.	0,20696	
Фтористий водень	0,0004	0,000008	0,8/1	0,02	0,00049	

Аналіз проведених розрахунків показує, що сумарний показник забруднення $(ПЗ_{\Sigma})_E$ в розрахунковій точці E на території промислового майданчика ремонтного цеху «Дніпровського коксохімічного заводу» перевищує допустиме у 4,9 рази. Такі обчислення було проведено для кожної точки виділеного промислового майданчику ремонтного цеху, середнє значення сумарного показника забруднення $(ПЗ_{\Sigma})_{сер.}=4,3$.

В продовження досліджень проведено розрахунки сумарного показника забруднення для промислового майданчика автотранспортного цеху відповідних забруднюючих речовин, що потрапляють в повітряне середовище з урахуванням викидів підприємства «Дніпрококс» і заводу Петровського табл. 2.13.

Таблиця 2.13 – Кількісні розрахунки сумарного показника забруднення $(ПЗ_{\Sigma})_E$ в розрахунковій точці E на території промислового майданчика автотранспортного цеху «Дніпровського коксохімічного заводу» за 2017 р. з одночасним урахуванням викидів підприємства «Дніпрококс» і заводу Петровського

Речовина	Інтенсивність викиду, г/с	Концентрація, мг/м ³ (точка E)	K_i / клас небезпечності	$ГДК_i$, мг/м ³	$ПЗ_i$	$\sum_{i=1}^n ПЗ_i$
Оксид вуглецю, CO	8,773	0,2311	1,1/4	5	0,04203	6,396= 637 %
Діоксид вуглецю, CO_2	5486,275	1640,0629	1,0/3	-	-	
<u>Сполуки азоту:</u>	<u>11,315</u>	<u>0,2981</u>				
- оксиди азоту;	10,268	0,2705	1,0/3	0,085	3,18264	
- аміак;	1,0347	0,0272	1,1/4	0,2	0,12421	
- оксид азоту;	0,0127	0,00033	0,9/2	0,4	0,00082	
<u>Діоксид та інші сполуки сірки:</u>	<u>17,808</u>	<u>0,4692</u>				
- діоксид сірки;	17,5949	0,4640	1,0/3	0,5	0,92738	
- сірководень;	0,2119	0,0057	0,8/1	0,008	0,87296	
- сірковуглець;	0,0008	0,000015	0,9/2	0,03	0,00076	
<u>Неметанові леткі органічні сполуки:</u>	<u>0,389</u>	<u>0,0102</u>				
- бензол;	0,2049	0,0054	0,9/2	1,5	0,00401	
- фенол;	0,0983	0,0026	0,9/2	0,01	0,28796	
- нафталін;	0,08548	0,0021	1,1/4	0,003	0,68268	
Метан	0,8782	0,02315	1,1/4	-	-	
Бензапірен	0,0002	0,0000043	0,8/1	0,01с.д.	0,00053	
Синильна кислота	0,0919	0,002464	0,9/2	0,01с.д.	0,26904	
Фтористий водень	0,0004	0,000010	0,8/1	0,02	0,00064	

Таким чином, сумарний показник забруднення $(ПЗ_{\Sigma})_E$ в розрахунковій точці E на території промислового майданчика автотранспортного цеху «Дніпровського коксохімічного заводу» у випадку, коли одночасно враховуються викиди підприємства «Дніпрококс» і заводу Петровського перевищує допустиме у 6,4 рази.

Такі обчислення було проведено для кожної точки виділеного промислового майданчику автотранспортного цеху, середнє значення сумарного показника забруднення $(ПЗ_{\Sigma})_{сер.} = 5,5$.

Середнє значення концентрації у другому випадку збільшується на 10–12 %.

В результаті розрахунків показника забруднення для 32 точок промислового майданчику ремонтного цеху було отримано середній сумарний показник забруднення $(ПЗ_{\Sigma})_{сер.} = 4,3$, а для 32 точок промислового майданчику автотранспортного цеху $(ПЗ_{\Sigma})_{сер.} = 5,5$, тому середнє значення показника забруднення для підприємства 4,9 або 490 %.

Дані розрахунки показують можливості розробленого чисельного методу розрахунку. Він дозволяє враховувати інтенсивність викиду декількох джерел емісії, тобто проводити більш якісну та точну оцінку рівня забруднення або прогнозувати вплив викидів на формування зон забруднення атмосферного повітря в робочих зонах на території промислових підприємств та на прилеглий території.

На рисунку 2.16–2.17 представлено зміну ризику хронічних захворювань для працівників коксохімічного заводу «Дніпрококс» на території промислового майданчика ремонтного цеху (рис. 2.13, зона 1) та автотранспортного цеху (рис. 2.13, зона 2) з урахуванням викидів одного або двох підприємств. В обох цехах працює по 20 робітників таких професій: машиністи, слюсарі, ремонтники, водії.

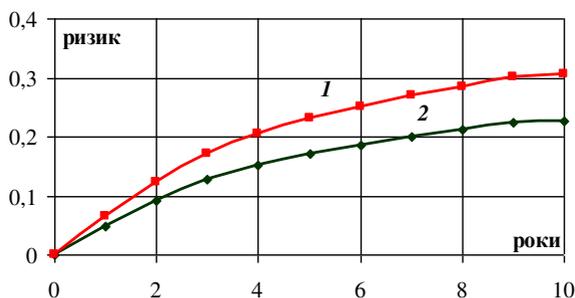


Рисунок 2.16 – Зміна ризику хронічної інтоксикації діоксидом сірки на території промислового майданчика ремонтного цеху коксохімічного заводу «Дніпрококс»: 1 – з урахуванням викидів двох підприємств; 2 – з урахуванням викидів лише заводу «Дніпрококс»

Для робітників промислового майданчика ремонтного цеху (рис. 2.16) через 1 рік ризик хронічних захворювань складає 4,7 %, а через 10 років 23 % у випадку, коли враховуються викиди лише самого коксохімічного заводу. У випадку, коли враховуються викиди двох підприємств, а саме заводу ім. Петровського і коксохімічного заводу «Дніпрококс», ризик хронічних захворювань через 1 рік складає 6,5 %, а через 10 років 31 %, тобто спостерігається збільшення ризику хронічних захворювань у працівників промислового майданчика ремонтного цеху в середньому на 35 %.

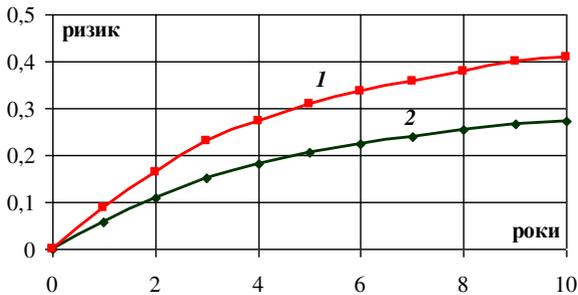


Рисунок 2.17 – Зміна ризику хронічної інтоксикації діоксидом сірки на території промислового майданчика автотранспортного цеху коксохімічного заводу «Дніпрококс»: 1 – з урахуванням викидів двох підприємств; 2 – з урахуванням викидів лише заводу «Дніпрококс»

Для робітників промислового майданчика автотранспортного цеху (рис. 2.17) через 1 рік ризик хронічних захворювань складає 5,8 %, а через 10 років 27 % у випадку, коли враховуються викиди лише самого коксохімічного заводу. У випадку, коли враховуються викиди двох підприємств, а саме заводу ім. Петровського і коксохімічного заводу «Дніпрококс», ризик хронічних захворювань через 1 рік складає 8,6 %, а через 10 років 41 %, тобто врахування викидів двох підприємств призводить до більш точних розрахунків, збільшення ризику хронічних захворювань у працівників на 51 %.

В продовження досліджень було розраховано зону забруднення на прилеглий території до промислових об'єктів.

На рисунку 2.18 представлено зону забруднення діоксидом сірки на

прилеглий території, яка формується під взаємовпливом двох джерел емісії: Дніпропетровського металургійного заводу ДМЗ ЄВРАЗ (заводу ім. Петровського) і коксохімічного заводу «Дніпрококс» [157].



Рисунок 2.18 – Зона забруднення діоксидом сірки при направленні вітру з північного заходу $\alpha=120^\circ$, два джерела забруднення (заводи ім. Петровського і «Дніпрококс»)

Хмара забруднення охоплює: пр. Свободи, пр. Мазепа, пр. Металургів, пр. Пушкіна, пр. Олександра Поля, пр. Богдана Хмельницького, пр. Гагаріна. Концентрація діоксиду сірки змінюється за такою залежності: вул. Заводська – до 75 %, вул. Київська – до 65 %, вул. Орловська – до 40 %, вул. Робоча – до 30 %, вул. Титова – до 25 %, вул. Запорізьке шосе – до 20 %, вул. Космічна – менше 12 %.

Для оцінювання впливу викидів другого підприємства на рівень забруднення атмосферного повітря була обрана розрахункова точка на відстані 5 км (по осі x) та 2,5 км (по осі y) від джерела викиду. При викиді тільки від металургійного заводу (рис. 2.11) концентрація забруднення в реперній точці становить близько 12 % від концентрації на виході з промислових труб (від $C_{max}=0,3426 \text{ мг/м}^3$), а при наявності другого джерела забруднення – коксохімічного заводу (рис. 2.12), концентрація в даній точці збільшується і становить 30 % від ($C_{max}=0,4043 \text{ мг/м}^3$). Розрахунки проводилися на висоті $z=1,7 \text{ м}$.

2.7.3 Динаміка забруднення повітряного середовища на прилеглий території Придніпровської ТЕС

Основні характеристики Придніпровської ТЕС:

- електрична потужність – 1765 МВт;
- теплова потужність – 845 Гкал / год;
- основне паливо – вугілля марки "АШ", газ, мазут;
- котельні агрегати – 4 × ТП-90, 2 × ТПП-110, 2 × ТПП-210;
- кількість енергоблоків – 7 (4 × 150 МВт, 3 × 285 МВт, 1 × 310 МВт);
- кількість і марка турбін – 4 × К-150-130, 3 × К-300-240, К-310-235.

Як відомо, при роботі теплових електростанцій, які використовують органічне паливо, в атмосферу надходять забруднюючі речовини: оксиди сірки, оксиди азоту, вуглекислий газ, тверді частки та інші речовини. Викиди ТЕС складають 40 % від сумарного викиду стаціонарних джерел забруднення (К. Уорк, С. Уорнер).



Рисунок 2.19 – Вид моделюючої області (Google Earth Image, 2019): Придніпровська ТЕС: 1 – місця викиду забруднюючих речовин (труби)

Теплоелектростанція (ТЕС) потужністю 1 ГВт при споживанні 3 млн. т. вугілля викидає в навколишнє середовище: 7 млн. т. CO_2 , 120 тис. т. SO_x , 20 тис. т. NO_x , 750 тис. т. золи. Аналіз даних по викидах в атмосферу великих підприємств міста Дніпра показав, що найбільша кількість SO_2 надходить при

роботі Придніпровської ТЕС – 55434 т/год.

Під час роботи підприємства «Придніпровської ТЕС» (рис. 2.19) до атмосферного повітря потрапляють забруднюючі речовини, порівняльний аналіз викидів за 2016–2017 рр. наведено в табл. 2.14. Загальна тенденція викидів показує їх зменшення, але це не призводить до покращення якості повітря на прилеглий території.

Таблиця 2.14 – Кількісні показники різних сполук за їх хімічною класифікацією, які надійшли в атмосферне повітря від «Придніпровської ТЕС» за 2016–2017 рр.

Вид домішки	Кількість викидів, т/рік (2016 р)	Кількість викидів, т/рік (2017 р)
1	2	3
Всього	60989,311	23963,844
Метали та їх сполуки (загальна кількість):	7,481	3,784
арсен та його сполуки	0,976	0,471
ванадій	0,006	0,130
залізо	0,118	0,134
мідь	0,687	0,325
нікель	0,785	0,371
ртуть	0,308	0,165
свинець	1,077	0,511
хром	1,013	0,481
цинк	2,503	1,186
манган	0,008	0,010
Речовини у вигляді суспендованих твердих частинок:	6121,001	2660,408
сажа	1,768	1,109
Сполуки азоту (загальна кількість):	9624,774	4714,712
оксиди азоту	9580,146	4692,126
азоту оксид	44,627	22,586
азотна кислота	0,001	0,001
Діоксид та інші сполуки сірки (загальна кількість):	44185,922	16027,152
сірки діоксид	44185,922	16027,152
Оксид вуглецю	380,706	191,615
Діоксид вуглецю	3064263,087	1541219,177

Вид домішки	Кількість викидів, т/рік (2016 р)	Кількість викидів, т/рік (2017 р)
Неметанові леткі органічні сполуки (загальна кількість):	523,407	273,052
ацетон	0,048	0,105
бутиловий ефір оцтової кислоти (бутилацетат)	0,013	0,029
етилцелозольв	0,052	0,191
ксилол	0,025	0,052
толуол	0,058	0,057
Метан	145,986	93,071
Фтор та його сполуки:	0,034	0,050
Фтористий водень	0,007	0,009

Розроблений метод чисельного розрахунку було застосовано для оцінювання зони забруднення діоксидом сірки атмосферного повітря прилеглої до Придніпровської ТЕС території. Інтенсивність викиду діоксиду сірки $Q=1,78$ кг/с. Розміри розрахункової області $15 \times 7,2$ км; коефіцієнт дифузії $\mu=(0,1 \div 1) \cdot U$; осереднення по висоті перенесення 600 м [17, 157].

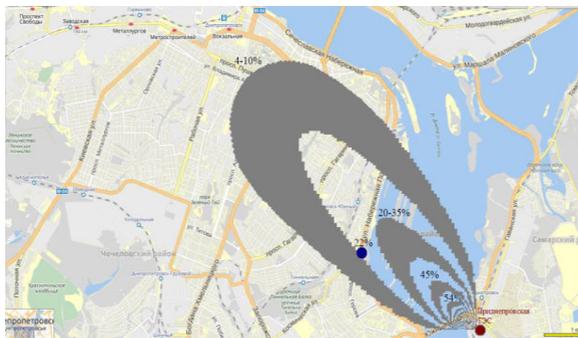


Рисунок 2.20 – Зона забруднення діоксидом сірки при направленні вітру з північного заходу $\alpha=20^\circ$ при роботі Придніпровської ТЕС

Швидкість вітру з південного сходу становила $U=6$ м/с, $C_{max}=0,582$ мг/м³, $t=52$ с. В зону забруднення потрапляють: Соборний район, пр. Героїв, пр. Гагаріна, пр. Олександра Поля, пр. Пушкіна. Концентрація діоксиду сірки змінюється за такою залежності: район південного моста – до 54 %, Січеславська набережна – до 30 %, пр. Гагаріна – до 15 %, пр. Олександра Поля

– до 10 %, вул. Володимира Антоновича менше 6 % (рис. 2.20). У реперній точці – пр. Героїв концентрація SO_2 становить 22 %, а саме $C=0,1281$ мг/м³, що менше максимально разової концентрації, але більше середньодобової в 2 рази ($ГДК_{м.р.}=0,5$ мг/м³, $ГДК_{с.д.}=0,05$ мг/м³).

2.7.4 Динаміка забруднення повітряного середовища на підприємстві «Інтерпайп Нижньодніпровського трубопрокатного заводу» та на прилеглий території з урахуванням викидів автотранспорту

Підприємство «Інтерпайп Нижньодніпровський трубопрокатний завод» – підприємство спеціалізується на виробництві безшовних труб для видобутку і транспортування продуктів в нафтогазовидобувній галузі, труб спеціального призначення для машинобудування та енергетичної промисловості, труб загального призначення для застосування в інших промислових галузях, а також коліс і бандажів для залізничного транспорту.

Виробничі потужності включають в себе:

- мартенівський цех;
- цех нафтового і газового сортаменту з ТПА-140 (діаметр труб 73–168 мм) і Пільгер-станом (діаметр труб 168–377 мм);
- цех по виробництву труб спеціального призначення на трубопрокатному агрегаті ТПА-200 (діаметр труб від 76 мм до 203 мм), колесопрокатний цех.

Продукція з торговою маркою заводу поставляється в більш, ніж 50 країн світу, відрізняється високою надійністю і довговічністю. Однак це підприємство належить до небезпечних об'єктів на території м. Дніпра. Під час роботи підприємства «Інтерпайп» до атмосферного повітря потрапляють забруднюючі речовини, порівняльний аналіз викидів за 2016–2017 рр. наведено в табл. 2.15.

Розглядалася задача відносно оцінювання впливу викидів оксидів азоту на забруднення повітряного середовища на прилеглий території до підприємства «Інтерпайп Нижньодніпровський трубопрокатний завод».

Таблиця 2.15 – Кількісні показники різних сполук за їх хімічною класифікацією, які надійшли в атмосферне повітря від «Інтерпайп Нижньодніпровського трубопрокатного заводу» за 2016–2017 рр.

Вид домішки	Кількість викидів, т/рік (2016 р)	Кількість викидів, т/рік (2017 р)
1	2	3
Всього	775,763	1153,069
<u>Метали та їх сполуки:</u>	13,580	13,856
залізо	13,329	13,586
нікель	0,001	0,001
хром	0,108	0,096
цинк	0,003	0,003
манган	0,139	0,170
<u>Речовини у вигляді суспендованих твердих частинок (мікрочастинки та волокна):</u>	40,506	96,871
речовини у вигляді суспендованих твердих частинок більше 2,5 мкм та менше 10 мкм	37,973	94,758
сажа	2,533	2,109
<u>Сполуки азоту (загальна кількість):</u>	259,978	305,532
оксиди азоту	259,958	305,516
азоту оксид	0,020	0,014
<u>Діоксид та інші сполуки сірки (загальна кількість):</u>	9,151	9,459
сульфатна кислота (H ₂ SO ₄) [сірчана кислота]	9,151	9,459
Оксид вуглецю	415,929	656,006
Діоксид вуглецю	11450,789	8448,176
Озон	0,596	0,672
<u>Неметанові леткі органічні сполуки (загальна кількість):</u>	35,530	70,165
ацетон	0,624	1,250
бутиловий ефір оцтової кислоти (бутилацетат)	0,892	1,786
етилцелозольв	0,714	1,429
толуол	4,291	8,589
Метан	0,197	0,144
<u>Хлор (загальна кількість):</u>	0,036	0,037
водню хлорид (соляна кислота за молекулою HCL)	0,036	0,037
<u>Фтор та його сполуки:</u>	0,250	0,317
Фтористий водень	0,038	0,050
Фреони	0,010	0,010

Інтенсивність викидів підприємства по NO_x згідно табл. 2.15 складає $Q=14,076$ г/с. Застосовувався розроблений метод, описаний в п. 2.3 формулами

(2.7) – (2.17). Також до уваги бралися викиди оксидів азоту, що потрапляють від автомагістралі «Слобожанський проспект», яка знаходиться на відстані 710 м від джерел викиду (труб) підприємства. Інтенсивність руху автотранспорту на ділянці дороги, що розглядається, складає 300 авт/хв з урахуванням восьмирядного руху, відносна кількість автомобілів на 1 м автомагістралі – 0,45 авт/м, з інтенсивністю викидів NO_x на 1 м $Q_{авт}=0,012$ г/с.



Рисунок 2.21 – Вид моделюючої області (Google Earth Image, 2019) «Інтепайп Нижньодніпровський трубопрокатний завод»: 1, 2 – місця викиду забруднюючих речовин (труби)

Розміри розрахункової області 3,5 км на 1,2 км, швидкість вітру зі сходу становила $U = 7$ м/с. Ізолінії концентрації NO_2 показані на рівні $z=12$ м [38, 39, 159].

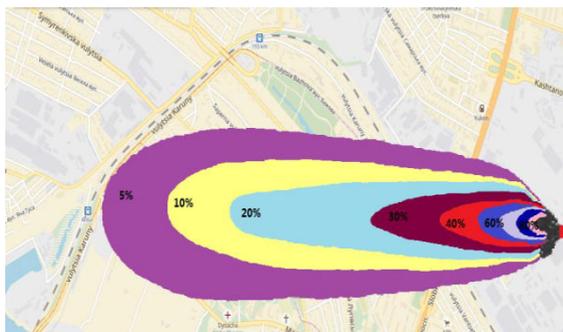


Рисунок 2.22 – Зона забруднення діоксидом азоту з рахуванням одного джерела забруднення – промислового підприємства «Інтепайп»

Було виконано розрахунки з оцінювання рівня концентрації NO_2 в атмосферному повітрі, з урахуванням потрапляння домішки тільки від промислового підприємства «Інтерпайп Нижньодніпровський трубопрокатний завод» (рис. 2.22).

В зону забруднення потрапляють: територія заводу – 90 %, вул. Столетова – 80 %, вул. Бажова і вул. Військова – 70 %, вул. Смараглова і вул. Саперна – 60 %, вул. Каразіна та вул. Луговська – 50 %, вул. Ростовська і вул. Трамвайна – 40 %, вул. Проскурівська і вул. Лесі Українки – 30 %, вул. Світла і вул. Радистів – 20 %, вул. Ясельна і Мануйлівський проспект – 10 %, вул. Каруни – 5 %.

Концентрація діоксиду азоту змінюється при віддаленні від дії джерела забруднення за напрямком вітру. При зміні напрямку вітру зона забруднення відповідно змінюється, але радіус зони залишається незмінним.

На рисунку 2.23 показана зона забруднення, яка формується під впливом викидів автомагістралі. Ізолінії концентрації NO_2 показані на рівні $z=12$ м, [18, 36, 159].

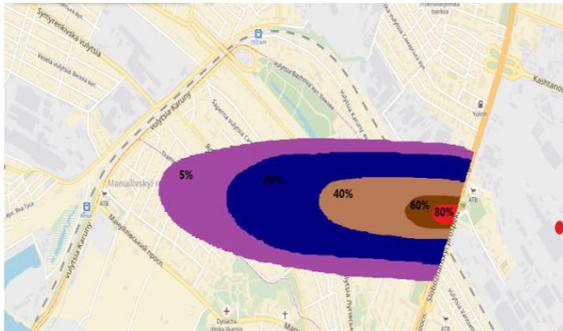


Рисунок 2.23 – Зона забруднення діоксидом азоту з урахуванням одного джерела забруднення – автомагістралі Слобожанський проспект

В зону забруднення потрапляють: вул. Бажова і вул. Військова – 80 %, вул. Смараглова і вул. Саперна – 70 %, вул. Каразіна і вул. Луговська – 60 %, вул. Ростовська і вул. Трамвайна – 40 %, вул. Проскурівська та вул. Лесі Українки – 30 %, вул. Світла і вул. Радистів – 10-20 %, вул. Ясельна – 5 %.

На рисунку 2.24 представлено зона забруднення з урахуванням взаємовпливу промислового підприємства і автомагістралі, [159].

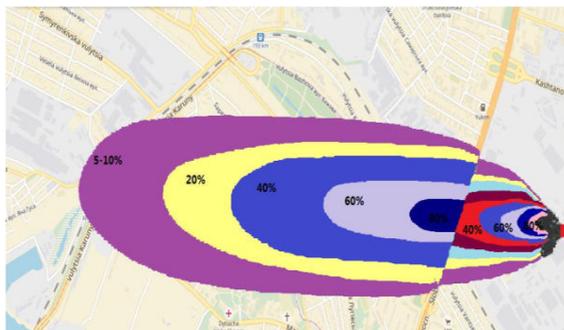


Рисунок 2.24 – Зона забруднення діоксидом азоту з урахуванням двох джерел забруднення – промислового підприємства і автомагістралі

Починаючи від першого джерела (заводу) шлейф забруднення витягується вздовж напрямку руху повітряних мас, процентний вміст домішки поступово зменшується, але дійшовши до авто-магістралі, концентрація NO_2 знову починає зростати, так як шлейф забруднення від другого джерела з урахуванням принципу суперпозиції накладається на той, який вже присутній в атмосферному повітрі, концентрація домішки і зона за-бруднення збільшується. Концентрація діоксиду азоту змінюється за такою залежністю: територія заводу – 90 %, вул. Столетова – 80 %, вул. Бажова і вул. Військова – 80-90 %, вул. Смарагдова і вул. Саперна – 70 %, вул. Каразіна та вул. Луговська – 60 %, вул. Ростовська і вул. Трамвайна – 50 %, вул. Проскурівська та вул. Лесі Українки – 40 %, вул. Світла і вул. Радистів – 30 %, вул. Ясельна і Мануйлівська проспект – 20 %, вул. Каруни – 10 %, вул. Амур-Гаванська – 5 %.

На цих малюнках показано значення концентрації, які представлені у відсотках від величини максимальної концентрації на даний момент часу $t=52,5$ хв: $C_{\max}=0,0928$ мг/м³ (рис. 2.22) – враховуються викиди NO_x тільки від промислового підприємства; $C_{\max}=0,0359$ мг/м³ (рис. 2.23) – враховуються викиди NO_x тільки від автомагістралі; $C_{\max}=0,1279$ мг/м³ (рис. 2.24) – враховуються викиди від двох джерел забруднення [159].

Знайдене поле концентрації домішки дозволило оцінити зміну ризику хронічної інтоксикації, пов'язаного із забрудненням атмосферного повітря діоксидом азоту протягом 20 років (рис. 2.25). Розрахунок ризику виникнення хронічних захворювань виконувався за моделлю (2.34) для населення території, що попадає під вплив викидів промислового об'єкту «Інтерпайп Нижньодніпровський трубопрокатний завод» і автомагістралі Слобожанський проспект. При розрахунку використовувалася обчислена матриця концентрації діоксиду азоту. Розрахунок ризику виконувався на відкритій місцевості в точках, розташованих на відстані близько 10 м від автомагістралі.

Як видно з рис. 2.25 взаємовплив викидів NO_2 від автомагістралі і від заводу призводить до зростання ризику виникнення хронічних захворювань у населення. Таким чином необхідна розробка заходів щодо зниження рівня ризику захворювання населення в даному районі [159].

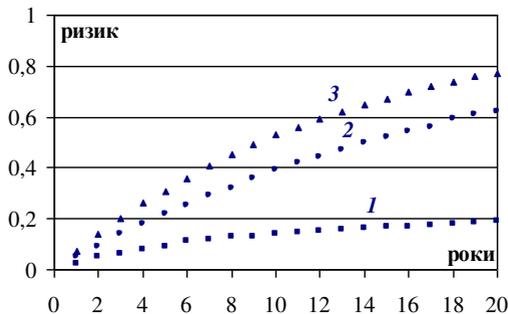


Рисунок 2.25 – Зміна ризику хронічної інтоксикації діоксидом азоту: 1 – з урахуванням викидів автомагістралі; 2 – з урахуванням викидів підприємства; 3 – з урахуванням викидів автомагістралі і підприємства

В першому випадку ризик захворювання через 1 рік становить 2 %, а через 20 років – 20 %, в другому випадку ризик захворювання через 1 рік становить 5 %, а через 20 років – 62 %, в третьому випадку ризик хронічних захворювань через 1 рік становить 7 %, а через 20 років – 77 %. Використання даного методу розрахунку дозволяє виконати комплексну оцінку ризику виникнення хронічних захворювань у населення прилеглої території з

України. Найзначнішими викидами комбінату виступає оксид вуглецю 40415,347 т/рік. Найбільш активною транспортною автомагістраллю є Широківське шосе, розташоване на відстані 940 м від комбінату і його відгалуження, які також є джерелами надходження в атмосферне повітря оксиду вуглецю.

Токсичні компоненти відпрацьованих газів бензинових двигунів легкових автомобілів складають 0,09 % від усіх викидів. А вони, у свою чергу, мають такий склад: оксиди вуглецю CO – 0,7 %, оксиди азоту NO_x – 0,1 %, вуглеводні – 0,1 %. Як видно із розподілу найбільшу частину токсичних газів складають оксиди вуглецю, що відносяться до четвертого класу небезпеки, гранично допустима середньодобова концентрація цього елемента 3 мг/м³, максимальна разова – 5 мг/м³.

У Кривому Розі, як і в багатьох містах України, розвинута торгівля різноманітними товарами впродовж усього року вздовж автомагістралей. Ці робочі зони попадають під вплив викидів не тільки автотрас, але і підприємств, тому для оцінювання ризику виникнення хронічних захворювань у робітників, що працюють на відкритих ринках, необхідно враховувати не тільки вплив викидів від автотрас, але і вплив викидів від підприємств.

В місті існує первинна система моніторингу за станом атмосферного повітря, яка повільно, але розширюється. На рисунку 2.27–2.28 показано розташування ПГЗК і трьох функціонуючих автоматизованих постів: пост № 1 – на перетині вулиць Переяславської і Наливайко; пост № 2 – на перетині вулиць Кармелюка та Панаса Мирного; пост № 3 – поблизу селища НКГОК. Дані пости передають дані по пилу, діоксиду сірки SO_2 , діоксиду азоту NO_2 та оксиду вуглецю CO . Найбільші показники простежуються для оксиду вуглецю.

Розроблений метод прогнозу був використаний для оцінювання ризику виникнення хронічних захворювань у робітників на відкритій місцевості, робочі зони яких знаходяться на вул. Переяславській, вул. Добролюбова, вул. Кармелюка, вул. Савицького і попадають під вплив викидів автомагістралі Широківське шосе та викидів від підприємства Південний ГЗК. Інтенсивність

викидів комбінату по CO становить $Q=1281,56$ г/с. Автомагістраль – Широківське шосе, знаходиться на відстані 940 м від джерел викиду (труб) комбінату, інтенсивність руху автотранспорту на даній ділянці дороги складає 180 авт/хв з урахуванням чотирирядного руху, середній викид CO від одного автомобіля складає близько 0,058 г/с, швидкість руху 40 км/год. Відносна кількість автомобілів на 1 м автомагістралі – 0,27 авт/м, з інтенсивністю викидів CO на 1 м $Q_{авт}=0,016$ г/с. Розміри розрахункової області 5 км на 5 км, швидкість вітру з півдня на північний схід становила $U =6$ м/с та $U =9$ м/с. Ізолінії концентрації CO показані на рівні $z=10$ м.

Значення концентрації CO виходить з рішення тривимірного рівняння переносу домішки (2.1) щодо викидів комбінату або автомагістралі, в залежності від того, викиди яких джерел забруднення на певній території враховуються: тільки від комбінату, автомагістралі, комбінату і автомагістралі. На початку було виконано розрахунки з оцінювання рівня концентрації CO в атмосферному повітрі, з урахуванням надходження домішки тільки від гірничо-збагачувального комбінату [19, 23, 24].

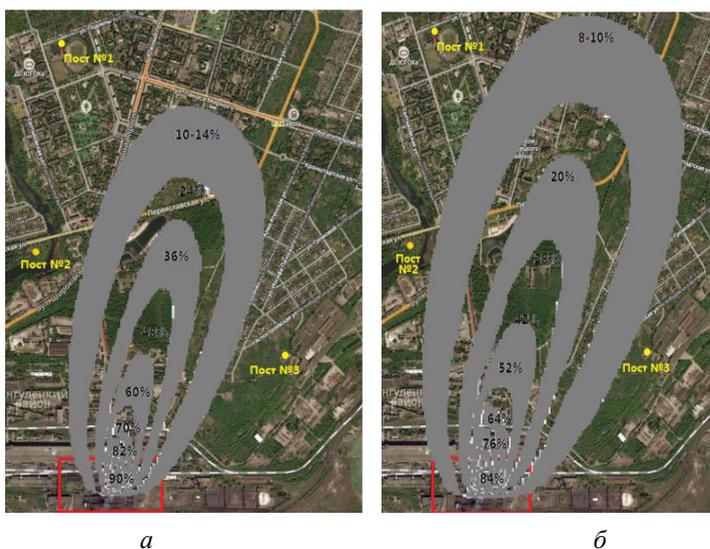


Рисунок 2.27 – Зона забруднення оксидом вуглецю, джерело забруднення – гірничо-збагачувальний комбінат: а) $U =6$ м/с; б) $U =9$ м/с

В зону забруднення при $U = 6$ м/с потрапляють (рис. 2.27 а): територія комбінату і нежитлова зона поблизу комбінату – 40-90 %, вул. Переяславська – 34 %, вул. Добролюбова – 28 %, вул. Кармелюка – 20 %, Південний проспект – 15 %, вул. Савицького – 10 %, вул. Панаса Мирного – 8 %, вул. Подлепи – 5 % і менше.

При напрямку вітру з півдня на схід в зону забруднення потрапляють житлові райони міста: вул. Алма-Атинська, вул. Йосипа-Пачовського, вул. Аглобудівська, вул. Ангарська, вул. Лумумби, вул. Громова, вул. Лисенка, вул. Кронштадтська і вул. Збагачувальна.

При зміні швидкості вітру на $U = 9$ м/с концентрація забруднення зменшується, але зона забруднення охоплює більші території міста (рис. 2.27 б) [19].



Рисунок 2.28 – Зона забруднення оксидом вуглецю, джерело забруднення – гірничо-збагачувальний комбінат і автомагістраль $U = 6$ м/с

На рисунку 2.28 представлено зону забруднення з урахуванням взаємовпливу викидів CO гірничо-збагачувального комбінату і автомагістралі. Розподіл концентрації в шлейфі забруднення до автомагістралі аналогічно випадку (рис. 2.27 а), а потім значення концентрації CO починає зростати і становить 68 % замість 24 %, зона забруднення збільшується.

Значення концентрації (рис. 2.27–2.28) представлено в відсотках від величини максимальної концентрації на даний момент часу: $C_{\max}=5,9317 \text{ мг/м}^3$ (рис. 2.27 а), $C_{\max}=5,2583 \text{ мг/м}^3$ (рис. 2.27 б), $C_{\max}=9,1264 \text{ мг/м}^3$ (рис. 2.28).

Знайдене поле концентрації домішки дозволило оцінити зміну ризику хронічної інтоксикації, пов'язаного із забрудненням атмосферного повітря оксидом вуглецю протягом 10 років (рис. 2.29). Розрахунок ризику виникнення хронічних захворювань виконувався за моделлю (2.32) для точок, розташованих на відстані близько 15 м від автомагістралі на вул. Переяславській [19].

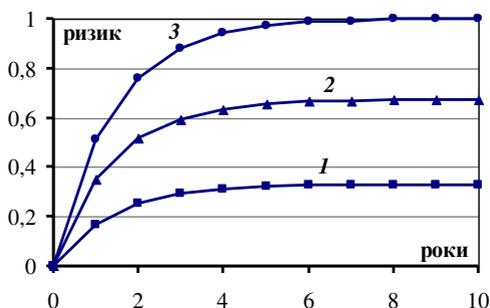


Рисунок 2.29 – Зміна ризику хронічної інтоксикації оксидом вуглецю: 1 – з урахуванням викидів автомагістралі; 2 – з урахуванням викидів комбінату; 3 – з урахуванням викидів комбінату і автомагістралі

Як видно з рис. 2.29 взаємовплив викидів CO від автомагістралі і від гірничо-збагачувального комбінату призводить до високого ризику виникнення хронічних захворювань у населення вже протягом декількох років проживання на цій території. А саме, у випадку урахування викидів лише від автомагістралі ризик захворювання через 1 рік становить 17 %, а через 5 років – 32 %, у випадку урахування лише викидів комбінату ризик захворювання через 1 рік становить 35 %, а через 5 років – 65 %, у випадку одночасного урахування викидів комбінату і автомагістралі ризик хронічних захворювань через 1 рік становить 51 %, а через 5 років – 96 %.

3. МІНІМІЗАЦІЯ РІВНЯ ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ В РОБОЧИХ ЗОНАХ НА ВІДКРИТІЙ МІСЦЕВОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕКРАНІВ ТА РОСЛИННОСТІ

Крайнє важливою задачею є мінімізація рівня хімічного забруднення в робочих зонах на відкритій місцевості. Одним із ефективних засобів є застосування екранів (рис. 3.1). Екрани дозволяють змінити траєкторію руху частинок забруднення та знизити локально хімічне забруднення в робочій зоні [160, 166, 202, 235].



Рисунок 3.1 – Розміщення екрана вздовж автомагістралі [235]

На ефективність роботи екранів впливають: метеорологічні умови (швидкість та напрямок вітру), інтенсивність емісії забруднюючих речовин, наявність локальних перешкод і таке інше. Вкрай важливо прогнозувати на етапі проектних робіт. Ефект екрана використовується до конкретних місцевих умов. За кордоном для вирішення цієї задачі використовується рівняння Нав'є-Стокса, але для реалізації таких розробок потрібні значні витрати часу на отримання результату. Час розрахунку може складати декілька днів, тому дуже важливо мати ефективні науково-обґрунтовані методи, які дозволяють швидко провести оцінку застосування екранів. В роботі пропонується новий метод для вирішення даної задачі.

3.1 Оцінювання ефективності застосування екрана для зниження загазованості в робочих зонах

Для оцінювання рівня хімічного забруднення повітря в робочих зонах, які розташовані на відкритій місцевості необхідно вирішити дві задачі:

– визначити нерівномірне поле швидкості повітряного потоку в робочих зонах;

– визначити поле концентрації хімічної речовини, яке формується під впливом швидкості повітряного потоку та атмосферної дифузії.

При розгляді практичних задач дуже важливо вміти прогнозувати рівень хімічного забруднення в робочих зонах на відкритій місцевості при наявності перешкод, однією із таких перешкод є екран.

Нижче розглядається новий метод, що дозволяє прогнозувати рівень хімічного забруднення в робочих зонах на відкритій місцевості при використанні екранів різної висоти. Особливістю даного методу є те, що нерівномірне поле швидкості повітряного потоку при наявності екрану визначається на основі точного рішення аеродинамічної задачі. Для цього будемо використовувати теорію функцій комплексного змінного. Цей метод використовується для розрахунку течій, які описуються рівнянням Лапласа для потенційної течії (2.26). Постановка крайової задачі для обтікання повітряним потоком пластини (екрана) розглянуто в роботі [73, ст. 267–271].

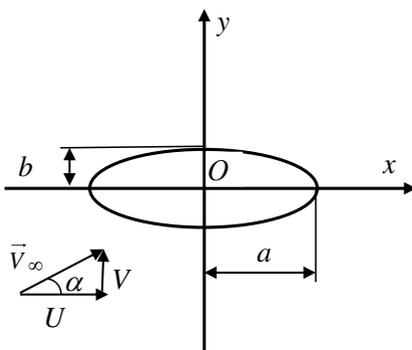


Рисунок 3.2 – Обтікання еліпсу повітряним потоком

При використанні теорії функцій комплексної змінної для вирішення поставленої задачі використовується наступний підхід. Розглядається еліпс (рис. 3.2), який знаходиться в потоці ідеальної нев'язкої рідини. Як відомо рівняння еліпсу має вигляд:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad a > b, \quad (3.1)$$

де a , b – більша та менша осі еліпсу (рис. 3.2).

Якщо швидкість на нескінченності \vec{V}_∞ складає деякий кут α з поздовжньою віссю еліпса [73, ст. 267-271], то вектор \vec{V}_∞ розкладається на складові $\vec{V}_\infty = U + iV$.

Розглядається косе обтікання, як результат додавання поздовжнього і поперечного обтікання зі швидкостями U і V в нескінченно віддалених точках. Тоді комплексний потенціал такої результуючої течії представляється як сума (3.2) і (3.3) відповідних потенціалів:

$$W(z) = \frac{U}{a-b} \left(az - b\sqrt{z^2 - c^2} \right), \quad (3.2)$$

$$W(z) = \frac{Vi}{a-b} \left(bz - a\sqrt{z^2 - c^2} \right). \quad (3.3)$$

В наслідок лінійності рівняння Лапласа, якому задовольняє потенціал $W(z) = \varphi + i\psi$, отримується потенціал виду:

$$W(z) = \frac{1}{a-b} \left[\left(az - b\sqrt{z^2 - c^2} \right) \cdot U + i \left(bz - a\sqrt{z^2 - c^2} \right) \cdot V \right]. \quad (3.4)$$

Вважаючи $c = a$, $U = 0$, $b = 0$, отримується наступний вираз для комплексного потенціалу:

$$W(z) = \frac{1}{a} \left[az \cdot U + i(-a)\sqrt{z^2 - a^2} \cdot V \right] = -i\sqrt{z^2 - a^2} \cdot V. \quad (3.5)$$

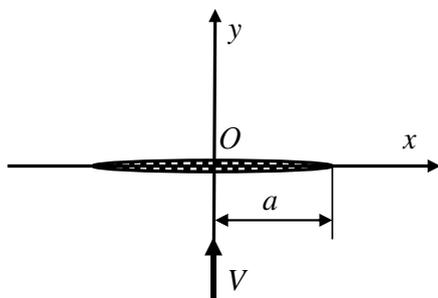


Рисунок 3.3 – Обтікання плоскої пластинки повітряним потоком

Потенціал (3.5) відповідає процесу обтікання нескінченно плоскої полоси шириною $2a$ (рис. 3.3).

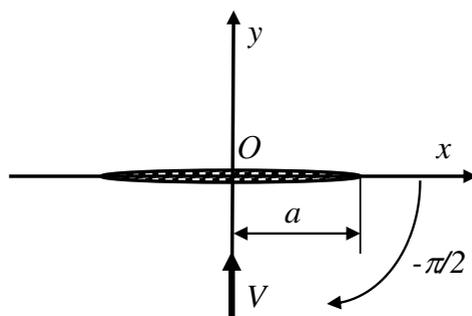


Рисунок 3.4 – Поворот системи координат при обтіканні плоскої пластинки повітряним потоком

В комплексній площині xOy , $z = x + iy$, виконується поворот на кут $-\frac{\pi}{2}$ (рис. 3.4), що дозволяє отримати систему x_1Oy_1 , де $z_1 = x_1 + iy_1$ (рис. 3.5), тобто

$$\begin{aligned} z_1 &= (x + iy)e^{i\left(-\frac{\pi}{2}\right)} = (x + iy) \cdot \left(\cos \frac{\pi}{2} - i \cdot \sin \frac{\pi}{2} \right) = \\ &= (x + iy) \cdot (-i) = -xi + y. \end{aligned} \quad (3.6)$$

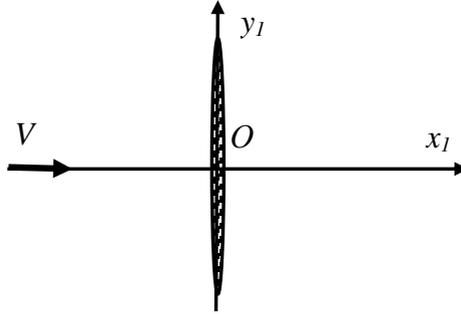


Рисунок 3.5 – Обтікання плоскої пластинки повітряним потоком в системі координат $x_1 O y_1$

Вводяться нові позначення $x_1 = y$, $y_1 = -x$, тоді $z_1 = z e^{-i\frac{\pi}{2}}$, $z = z_1 e^{i\frac{\pi}{2}} = z_1 i$.

Комплексний потенціал відносно змінної z_1 набуває виду:

$$\begin{aligned} W(z_1) &= -iV\sqrt{(z_1 i)^2 - a^2} = -iV\sqrt{-(z_1^2 + a^2)} = \\ &= -iV\sqrt{-1} \cdot \sqrt{z_1^2 + a^2} = V\sqrt{z_1^2 + a^2}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Оскільки

$$\begin{aligned} W(z_1) &= V\sqrt{z_1^2 + a^2} = \varphi + i\psi = \\ &= V\sqrt{(z_1 - ia)(z_1 + ia)} = V\sqrt{\rho_1 e^{i\theta_1} \cdot \rho_2 e^{i\theta_2}} = \\ &= V\sqrt{\rho_1 \rho_2} \cdot e^{\frac{i(\theta_1 + \theta_2)}{2}} = V\sqrt{\rho_1 \rho_2} \left(\cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} + i \sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right). \end{aligned} \quad (3.8)$$

Із співвідношення (3.8) отримаємо залежності для потенціалу швидкості φ та функції току ψ :

$$\varphi = V\sqrt{\rho_1 \rho_2} \cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}, \quad (3.9)$$

$$\psi = iV\sqrt{\rho_1\rho_2} \sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}. \quad (3.10)$$

Для того щоб отримати вираз для спряженої швидкості $\frac{dW}{dz_1} = V_x - iV_y$,

обчислюється похідна з використанням виразу (3.8).

$$\begin{aligned} \frac{dW}{dz_1} &= \frac{Vz_1}{\sqrt{z_1^2 + a^2}} = \frac{V(x_1 + iy_1)}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} \cdot e^{\frac{-i(\theta_1 - \theta_2)}{2}} = \\ &= \frac{V(x_1 + iy_1)}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} \left(\cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} - i \sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) = \\ &= \frac{V}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} \left[\left(x_1 \cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} + y_1 \sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) + \right. \\ &\quad \left. + i \left(y_1 \cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} - x_1 \sin \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Із співвідношення (3.11) отримуються вирази для компонент вектору швидкості повітряного потоку:

$$\begin{cases} V_x = \frac{V}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} \left(x_1 \cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} + y_1 \sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right); \\ V_y = \frac{V}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} \left(y_1 \cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} - x_1 \sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right). \end{cases} \quad (3.12)$$

Згідно рис. 3.6 обчислюються наступні вирази для модулів радіусів-векторів та кутів, що визначають положення точки у площині:

$$z_1 - ia = x_1 + iy_1 - ia = x_1 + i(y_1 - a), \quad (3.13)$$

$$\rho_1 = \sqrt{x_1^2 + (y_1 - a)^2}, \quad (3.14)$$

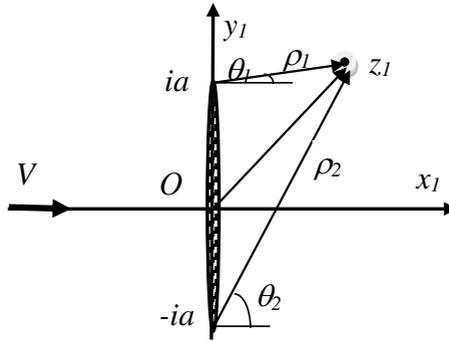


Рисунок 3.6 – Визначення параметрів довільної точки простору

$$z_1 + ia = x_1 + iy_1 + ia = x_1 + i(y_1 + a), \quad (3.15)$$

$$\rho_2 = \sqrt{x_1^2 + (y_1 + a)^2}, \quad (3.16)$$

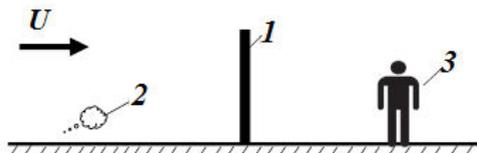
$$\theta_1 = \arctg \frac{y_1 - a}{x_1}, \quad \theta_2 = \arctg \frac{y_1 + a}{x_1}. \quad (3.17)$$

Отримані залежності (3.12)–(3.17) є базовими формулами для розрахунку поля швидкості повітряного потоку в робочій зоні при наявності екрана. При практичному використанні отриманих аналітичних залежностей для розрахунку компонент вектору швидкості поблизу екрана висотою H , необхідно врахувати, що в формулах (3.12) – (3.17), $a=H/2$.

Використовуючи отримані аналітичні співвідношення (3.12)–(3.17), розраховуються компоненти швидкості повітряного потоку u , v , щоб використати цю інформацію для моделювання розсіювання хімічного забруднення в робочих зонах. Для прогнозу рівня забруднення повітря в робочих зонах використовується двовимірне рівняння масопереносу (2.18) (профільна задача). Постановка граничних умов розглянута в пункті 2.3.

Розроблений метод прогнозу був застосований для розв'язання задачі по оцінці рівня забруднення в робочих зонах на відкритій місцевості при наявності джерела емісії, з присутністю екрана різної висоти та з його відсутністю. Схема розрахункової області показана на рис. 3.7 а. Розрахунки виконувалися при

наступних даних: швидкість повітряного потоку 5 м/с, середня інтенсивність емісії CO складала 0,058 г/с, геометричні розміри 8 м на 6 м. Реальним об'єктом, де застосовувався даний метод виступав «Дніпропетровський маслоекстракційний завод» (рис. 3.7 б.)



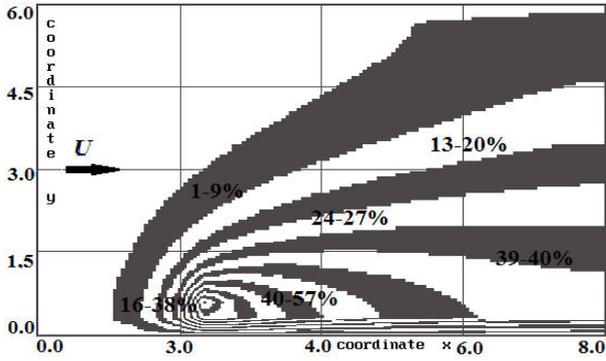
а



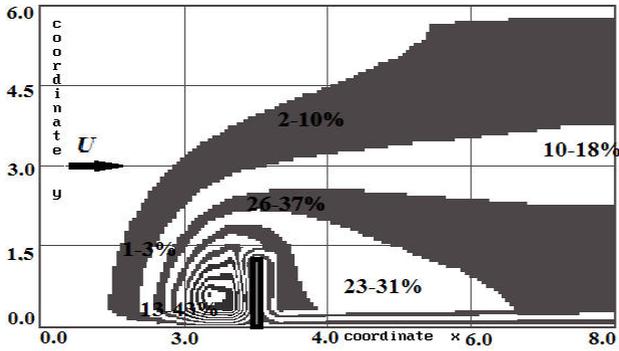
б

Рисунок 3.7 – Розрахункова область: а – схема розрахункової області: 1 – екран, 2 – джерело емісії CO , 3 – працівник в робочій зон; б – «Дніпропетровський маслоекстракційний завод»: 1 – екран (огорожа вздовж заводу), 2 – джерело емісії CO (автотранспорт Січеславської набережної), 3 – працівник на території заводу

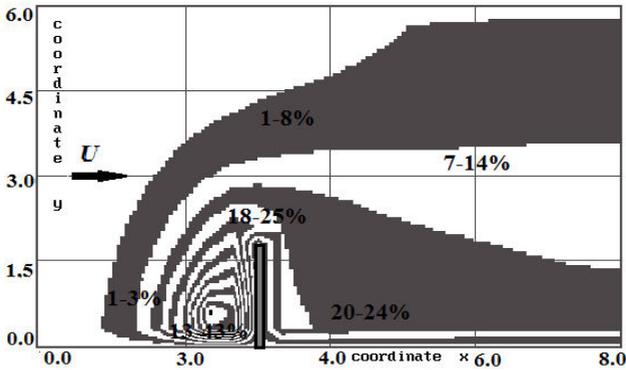
Розглядалося три сценарії: при відсутності екрана (рис. 3.8 а); при наявності екрана висотою $H = 1,2$ м та висотою 1,8 м (рис. 3.8 б-в). Нижче представлено зони забруднення, які утворюються для кожного сценарію.



a

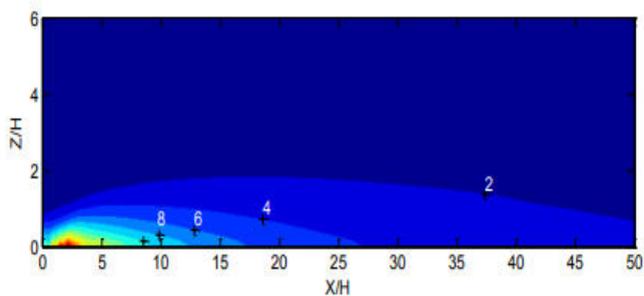


б

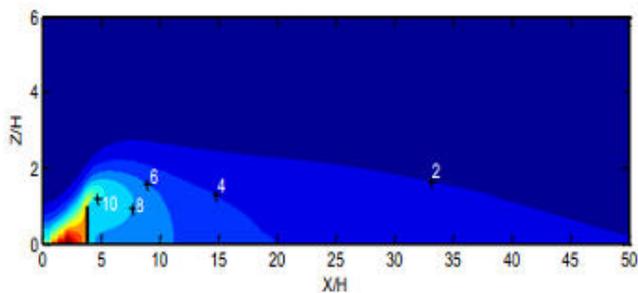


в

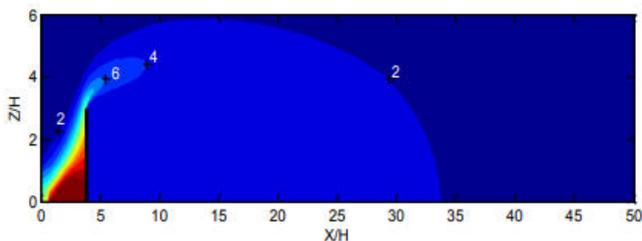
Рисунок 3.8 – Розподіл поля концентрації CO $t=9$ с: a – при відсутності екрана; $б$ – при висоті екрана $H=1,2$ м; $в$ – при висоті екрана $H=1,8$ м



a



б

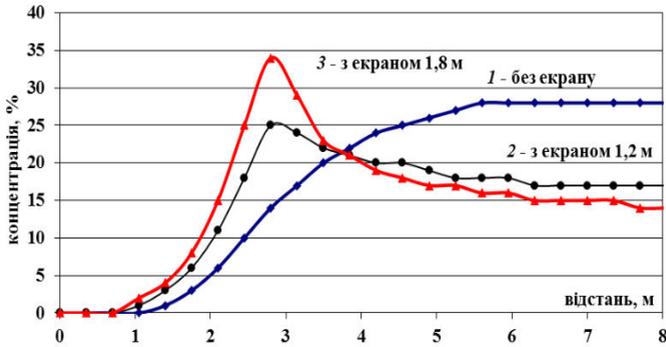


в

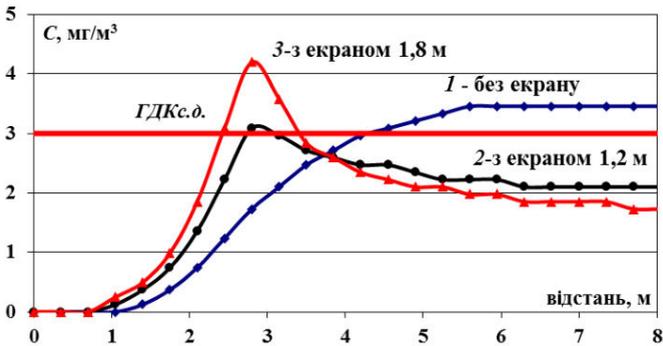
Рисунок 3.9 – Розподіл поля концентрації забруднювача, Hagler et al. 2011, CFD modeling: *a* – при відсутності екрана; *б* – при висоті екрана $H=1,2$ м; *в* – при висоті екрана $H=2,8$ м [235]

Порівнюючи результати розрахунків поля концентрації CO за розробленим чисельно-аналітичним методом (рис. 3.8) і за CFD методом Hagler (рис. 3.9), видно що якісна картина розподілу збігається, що підтверджує

адекватність в розрахунках за розробленим методом. Як видно із представлених рисунків екран викликає деформацію зони забруднення, найбільший градієнт концентрації утворюється біля джерела емісії [160].



а



б

Рисунок 3.10 – Розподіл концентрації CO на висоті 2 м: *а* – у відсотках від максимального значення концентрації; *б* – реальні значення концентрації, mg/m^3 , 1 – без екрана; 2 – з екраном $H = 1,2$ м; 3 – з екраном $H = 1,8$ м

Наявність екрана викликає розворот зони забруднення, що призводить до її зменшення і зниження концентрації CO в робочій зоні.

Це добре видно із рис. 3.10, де показано розподіл концентрації CO на різній відстані від джерела емісії на висоті від поверхні землі $H = 2$ м. В місці встановлення екрана значення концентрації зростає, тому що потік гальмується,

але поза ним значення концентрації повільно зменшується і, в порівнянні з випадком відсутності екрана, концентрація знижується на 11 % при висоті екрана 1,2 м і на 15 % при висоті екрана 1,8 м, збільшення висоти екрана призводить до зменшення рівня концентрації забруднення.

Таким чином, використання екрана призводить до зменшення рівня забруднення повітряного середовища в робочих зонах, що дозволяє зменшити ризик виникнення хронічних захворювань у робітників [160].

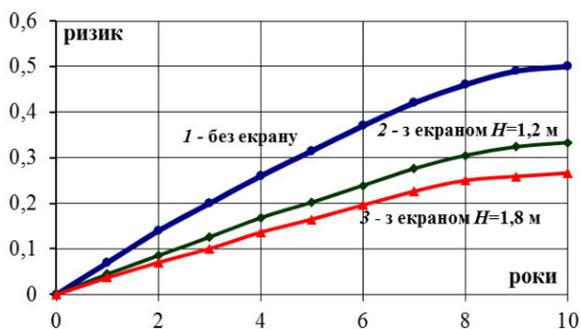


Рисунок 3.11 – Зміна ризику хронічної інтоксикації оксидом вуглецю: 1 – при відсутності екрана; 2 – при висоті екрана $H=1,2$ м; 3 – при висоті екрана $H=1,8$ м

На рисунку 3.11 показано зміну ризику хронічної інтоксикації CO впродовж 10 років на відстані 25 м від джерела забруднення і на висоті від поверхні землі $H=1,7$ м (органи дихання людини).

Через п'ять років ризик виникнення хронічних захворювань при відсутності екрана становить 0,31, при наявності екрана висотою 1,2 м ця величина дорівнює 0,21, при висоті екрана 1,8 м – 0,15. Таким чином, наявність екрана знижує ризик хронічної інтоксикації CO на 10 %, збільшення висоти екрана до 1,8 м призводить до зменшення ризику на 16 %. Ризик хронічних захворювань змінюється від небезпечного до прийняттого [1, 244].

Розрахунок задачі потребує 3 с комп'ютерного часу.

В дисертаційній роботі розроблено чисельно-аналітичний метод оцінювання ефективності застосування екрана для зменшення рівня хімічного забруднення повітря в робочих зонах на відкритій місцевості, який використано для робочих місць на відкритій місцевості «Дніпропетровського маслоекстракційного заводу» Олейна. Реальна висота загорожі (забору), що простягається вздовж заводу складає 2,2 м. Проведені розрахунки показали, що вже при висоті екрана 1,2 м концентрація забруднення зменшується на 11 % в порівнянні з його відсутністю, тоді як збільшення висоти екрана до 1,8 м зменшує концентрацію на 15 %. Більш значне збільшення висоти екрана не призведе до суттєвого зменшення концентрації домішки, але затрати на виготовлення екрана (загорожі) вище 3 м будуть набагато більшими, ніж для загорожі $H=1,8$ м затрати на яку складають 200 000 грн.

3.2 Прогнозування вітрового режиму в робочих зонах промислових майданчиків

Забудова, розташування доріг та будівель, параметри атмосферного повітря – чинники, що сприяють зміні мікроклімату міста. В межах існуючої ринкової економіки, спостерігається зростання «тимчасових споруд», а саме споруд торгового, побутового, соціально-культурного чи іншого призначення для здійснення підприємницької діяльності.

Більшість з них розміщується вздовж міських автомагістралей, на зупинках або в їх околиці, де проходить торгівля тими чи іншими видами товарів (рис. 3.12). Робота на вулиці поблизу дороги, від якої надходять шкідливі викиди автотранспорту, а також додається негативний фактор – значні швидкості вітру, що сильно відрізняються від нормативних показників в робочій зоні працівників, є головними факторами, що негативно впливають на організм, самопочуття і здоров'я людини, що працює там впродовж робочого дня. Як відомо оптимальні та допустимі значення швидкості руху повітря в робочих зонах в залежності від категорії робіт та пори року можуть змінюватися від 0,1 м/с до 0,5 м/с [147, 198–199, 242].

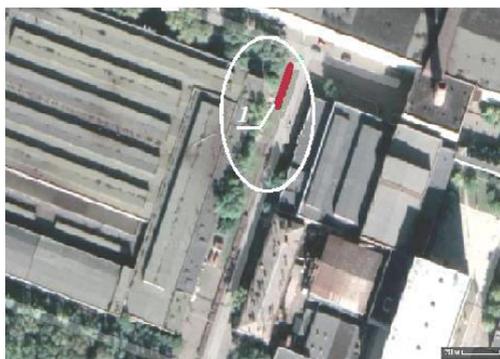


Рисунок 3.12 – Територія зони відпочинку робітників Південного машинобудівного заводу (Google Earth Image, 2019): 1 – літнє кафе

На кожному великому підприємстві на сьогодні відкриваються тимчасові споруди (кафе) для роздрібної торгівлі продуктами харчування, а також для відпочинку – відкриті кафе. Так, на території промислового об'єкту Південного машинобудівного заводу для літнього відпочинку робітників щорічно відкривається кафе з виносними столиками для харчування (рис. 13.12).

Внаслідок реконструкції «тимчасових споруд», появи нових та зникнення інших змінюється аеродинамічний режим обтікання та порушуються параметри мікроклімату. Важливо вміти виконувати прогнозування, щоб вжити заходи відносно забезпечення нормативних параметрів комфорту. Виникає питання стосовно моделювання умов комфорту для робітників, які знаходяться під впливом викидів від автотранспорту, з урахуванням двох факторів: загазованості та повітряного комфорту в робочій зоні. Моделювання виконується в масштабі *microscale*.

Для визначення поля швидкості пропонується використовувати модель на основі рівняння Нав'є-Стокса, записаного в змінних Гельмгольда [80, 143]:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u \omega}{\partial x} + \frac{\partial v \omega}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right), \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega, \quad (3.19)$$

де $Re = \frac{V_0 L}{\nu}$ – число Рейнольдса, ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості, ψ – функція току, $\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ – завихоренність, $u = \frac{\partial \psi}{\partial y}$, $v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$ – компоненти вектору швидкості повітряного потоку, L – характерний лінійний розмір, V_0 – характерна швидкість повітряного потоку.

Використання рівняння Нав'є-Стокса в такій формі дозволяє виключити із розв'язку задачі розрахунок поля тиску [143].

Початкові та граничні умови для рівнянь (3.18) – (3.19) ставляться наступним чином:

– на твердих стінках ставиться умова прилипання $\psi|_{\gamma} = const$, $\frac{\partial \psi}{\partial n}|_{\gamma} = 0$;

– завихоренність біля твердої границі визначається так, щоб виконувалась

$$\text{умова } \frac{\partial \psi}{\partial n}|_{\gamma} = 0;$$

– на вході в розрахункову область задається профіль швидкості $u = f(y)$ і відповідне значення функції току $\psi|_{\gamma} = const$;

– а вході в розрахункову область завихоренність $\omega = 0$;

– на вихідній границі ставиться «м'яка» гранична умова для функції току та завихоренності $\frac{\partial \psi}{\partial n}|_{x=L} = 0$, де L – межа розрахункової області;

– в початковий момент $t = 0$ для завихоренності $\omega|_{t=0} = 0$.

Для визначення завихоренності на твердих стінках (межах) використовується методологія В. К. Хруща. Складаємо поперемінно-трикутну різницеву схему для чисельного інтегрування рівняння (3.18) [143]. Швидкість перенесення представимо у вигляді суми двох знакопостійних величин:

$$u = u^+ + u^- = \frac{u + |u|}{2} + \frac{u - |u|}{2}, \quad v = v^+ + v^- = \frac{v + |v|}{2} + \frac{v - |v|}{2}.$$

Конвективні похідні замінюються односторонніми розділеними різницями проти потоку [143]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^+ \omega}{\partial x} &\approx \Theta_x^+ \omega = (u_{i+1,j}^+ \omega_{i,j} - u_{i,j}^+ \omega_{i-1,j}) / \Delta x, \\ \frac{\partial u^- \omega}{\partial x} &\approx \Theta_x^- \omega = (u_{i+1,j}^- \omega_{i+1,j} - u_{i,j}^- \omega_{i,j}) / \Delta x, \\ \frac{\partial v^+ \omega}{\partial y} &\approx \Theta_y^+ \omega = (v_{i,j+1}^+ \omega_{i,j} - v_{i,j}^+ \omega_{i,j-1}) / \Delta y, \\ \frac{\partial v^- \omega}{\partial y} &\approx \Theta_y^- \omega = (v_{i,j+1}^- \omega_{i,j+1} - v_{i,j}^- \omega_{i,j}) / \Delta y. \end{aligned} \quad (3.20)$$

Другі похідні будемо апроксимуються на двох часових шарах із застосуванням методу Саульєва [143]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} &\approx M_{xx}^+ \omega - M_{xx}^- \omega = \frac{-\omega_{i,j} + \omega_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{\omega_{i+1,j} - \omega_{i,j}}{\Delta x^2}, \\ \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} &\approx M_{yy}^+ \omega - M_{yy}^- \omega = \frac{\omega_{i,j-1} - \omega_{i,j}}{\Delta y^2} + \frac{\omega_{i,j+1} - \omega_{i,j}}{\Delta y^2}, \end{aligned} \quad (3.21)$$

де різницеві оператори M_{xx}^+ , M_{xx}^- , M_{yy}^+ , M_{yy}^- визначаються на різних розрахункових шарах. Згідно (3.20) і (3.21) рівняння (3.18) набуває виду [143]:

$$\frac{\omega_{i,j}^{n+1} - \omega_{i,j}^n}{\Delta t} + (\Theta_x^+ + \Theta_x^- + \Theta_y^+ + \Theta_y^-) (\omega^{n+1} \xi + (1 - \xi) \omega^n) =$$

$$= \frac{1}{\text{Re}} (M_{xx}^+ + M_{xx}^- + M_{yy}^+ + M_{yy}^-) (\omega^{n+1} \xi + (1 - \xi) \omega^n). \quad (3.22)$$

Вводяться позначення:

$$\Theta_{xy} = \Theta_x^+ + \Theta_x^- + \Theta_y^+ + \Theta_y^-, \quad M_{xy} = M_{xx}^+ + M_{xx}^- + M_{yy}^+ + M_{yy}^-.$$

Відповідно до позначень отримуються рівняння:

$$\left((1 + \Delta t \xi) \Theta_{xy} - \frac{\Delta t}{\text{Re}} \xi M_{xy} \right) \omega^{n+1} = \left(1 - \Delta t (1 - \xi) \Theta_{xy} + \frac{\Delta t}{\text{Re}} (1 - \xi) M_{xy} \right) \omega^n. \quad (3.23)$$

Різницева схема розщеплення складається так, щоб забезпечити другий порядок точності за часом при $\xi = 1/2$ [143]:

$$\begin{aligned} & \left(1 + \frac{\Delta t}{2} (\Theta_x^+ + \Theta_y^+) - \frac{\Delta t}{2 \text{Re}} (M_{xx}^+ + M_{yy}^+) \right) \omega^{n+1/2} = \\ & = \left(1 - \frac{\Delta t}{2} (\Theta_x^- + \Theta_y^-) + \frac{\Delta t}{2 \text{Re}} (M_{xx}^- + M_{yy}^-) \right) \omega^n, \\ & \left(1 + \frac{\Delta t}{2} (\Theta_x^- + \Theta_y^-) - \frac{\Delta t}{2 \text{Re}} (M_{xx}^- + M_{yy}^-) \right) \omega^{n+1} = \\ & = \left(1 - \frac{\Delta t}{2} (\Lambda_x^+ + \Lambda_y^+) + \frac{\Delta t}{2 \text{Re}} (L_{xx}^+ + L_{yy}^+) \right) \omega^{n+1/2}. \end{aligned}$$

Наступні позначення операторів [143]:

$$\Theta_1 = \frac{1}{2} (\Theta_x^+ + \Theta_y^+) - \frac{1}{2 \text{Re}} (M_{xx}^+ + M_{yy}^+),$$

$$\Theta_2 = \frac{1}{2} (\Theta_x^- + \Theta_y^-) - \frac{1}{2 \text{Re}} (M_{xx}^- + M_{yy}^-),$$

дозволяють переписати рівняння (3.23) при $\xi = 1/2$ у вигляді:

$$(1 + \Delta t(\Theta_1 + \Theta_2))\omega^{n+1} = (1 - \Delta t(\Theta_1 + \Theta_2))\omega^n. \quad (3.24)$$

Такий же розрахунок застосовується для комірок, що примикають до границі виходу з розрахункової області R , збурення на вхідний і вихідний границях області R не можуть поширюватися за рахунок дифузії, число Рейнольдса $Re \rightarrow \infty$ для повітряного потоку, що знаходиться поза розрахункової області. На вході завихореність можна вважати $\omega = 0$. На виході з розрахункової області, збурення ззовні не проникають всередину розрахункової області R .

На швидкість повітряного потоку на виході накладаються додаткові умови того, що кривизна ліній струму на виході дорівнює нулю $\frac{\partial v}{\partial x} = 0$, що дозволяє визначити в прикордонних комірках величину завихореності ω .

Для визначення функції току при заданому розподіленні завихореності в потоці в'язкої рідини необхідно вирішити рівняння (3.19) з відповідними початковими та граничними умовами. Для чого використовується метод ітерацій, еквівалентний розв'язку параболічного рівняння (3.25) з фіктивним часом η , яке прямує до розв'язку рівняння (3.19) при $\eta \rightarrow \infty$ [143].

$$\frac{\partial \psi}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \omega, \quad (3.25)$$

Враховуючи позначення різницевих операторів, наведених вище, різницева схема набуває вигляду [143]:

$$\frac{\psi_{i,j}^{n+1} - \psi_{i,j}^n}{\Delta \eta} = (M_{xx}^+ + M_{xx}^-) \frac{\psi^{n+1} - \psi^n}{2} + (M_{yy}^+ + M_{yy}^-) \frac{\psi^{n+1} - \psi^n}{2} + \bar{\omega}_{i,j},$$

$$\bar{\omega}_{i,j} = \frac{1}{4} (\omega_{i,j} + \omega_{i-1,j} + \omega_{i,j-1} + \omega_{i-1,j-1}). \quad (3.26)$$

Розщеплення рівняння (3.26) виконується наступним чином [143]:

$$\begin{aligned} \psi^{n+\frac{1}{2}} &= \psi^n + \omega \frac{\Delta\eta}{2}, \\ \left(1 - \frac{\Delta\eta}{2}(M_{xx}^+ + M_{yy}^+)\right) \psi^{n+\frac{1}{2}} &= \left(1 + \frac{\Delta\eta}{2}(M_{xx}^- + M_{yy}^-)\right) \psi^{n+\frac{1}{4}}, \\ \left(1 - \frac{\Delta\eta}{2}(L_{xx}^- + L_{yy}^-)\right) \psi^{n+\frac{3}{4}} &= \left(1 + \frac{\Delta\eta}{2}(L_{xx}^+ + L_{yy}^+)\right) \psi^{n+\frac{1}{2}}, \\ \psi^{n+1} &= \psi^{n+\frac{3}{4}} + \omega \frac{\Delta\eta}{2}. \end{aligned} \quad (3.27)$$

Для забезпечення зниження похибки до нуля на верхньому часовому кроці рекомендована величина ітераційного кроку [143]:

$$\Delta\eta = \frac{\Delta x^2 \Delta y^2}{(\Delta x^2 + \Delta y^2)}. \quad (3.28)$$

Невідомі $\psi^{n+\frac{1}{2}}$, $\psi^{n+\frac{3}{4}}$ визначаються у всіх внутрішніх вузлах методом «стрімкого» рахунку.

Після визначення функції току в вузлах різницевої сітки розраховуються компоненти вектору швидкості на вертикальних та горизонтальних гранях різницевих осередків:

$$u_{ij} = \frac{\Psi_{i,j+1} - \Psi_{i,j}}{\Delta y}, \quad v_{ij} = -\frac{\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i,j}}{\Delta x} \quad (3.29)$$

Гранична умова типу Неймана $\left. \frac{\partial \psi}{\partial n} \right|_{\gamma} = 0$ задовольняється в ході ітерацій

за рахунок визначення завихореності в приграничних осередках:

$$\omega_{ij} = \frac{1}{2} \frac{(v_2 + v_3 - v_1 - v_4)}{\Delta x} - \frac{1}{2} \frac{(u_4 + u_3 - u_1 - u_2)}{\Delta y}, \quad (3.30)$$

де u_k, v_k – компоненти швидкості на відповідних гранях різничевої комірки.

Одним із важливих параметрів мікроклімату є вміст забруднюючої речовини в мікрзоні, для прогнозування використовується 2D модель рівняння масопереносу, описана в п. 2.3 рівняння (2.18) та його різницевий аналог (2.24) [143]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v - w_s)C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \sum Q_i \delta(x - x_i)(y - y_i), \quad (3.31)$$

де C – концентрація забруднюючої речовини; u, v – компоненти вектору швидкості повітряного потоку; w_s – швидкість гравітаційного осідання забруднюючої речовини, $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коефіцієнти турбулентної дифузії; (x_i, y_i) – координати джерела викиду забруднюючої речовини; Q_i – інтенсивність емісії забруднювача в точці; $\delta(x - x_i)(y - y_i)$ – дельта-функція Дірака, за допомогою якої моделюється надходження забруднювача. Профіль

швидкості вітру на вході в розрахункову область $u = u_1 \left(\frac{Y}{Y_1} \right)^n$, де u_1 – значення швидкості вітру на висоті Y_1 м; стан атмосфери (інверсія, конвекція), тобто значення вертикального коефіцієнта дифузії $\mu_y = k \left(\frac{Y}{Y_1} \right)^m$, $k = 0, 2$, $m \approx 1$

У числовій моделі виконується моделювання реального положення працівника у вигляді пластини, виносного місця торгівлі і наявності самого товару, що є конкретною ситуацією на підприємстві *Південного машинобудівного заводу*, а також типовою ситуацією в містах біля автодороги, при відсутності та наявності тимчасової споруди в місці торгівлі.

Зазвичай, такого типу задачі розглядаються з точки зору загазованості, але в новій постановці, більш розширеній, враховується вітровий режим (мікроклімат) в зоні знаходження працівника (рис. 3.13). Як відомо, швидкість

повітряного потоку в робочій зоні не повина перевищувати 0,2 м/с, при більшому значенні виникає дискомфорт [90, 102–103, 106, 111, 153–154, 158, 164, 186, 250].



Рисунок 3.13 – Приклади «тимчасової будівлі» для торгівлі біля автомагістралі: 1 – діючий автотранспорт; 2 – бар'єр (загорожа); 3 – розташування товару; 4 – людина (продавець); 5 – місце розташування голови людини, 6 – тимчасова споруда без піддашку

Розглядається три варіанти місця торгівлі в зоні дії автотранспорту (рис. 3.14–3.16).

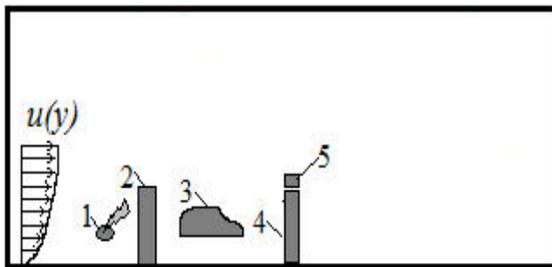


Рисунок 3.14 – Схема розташування працівника в зоні торгівлі біля автомагістралі (варіант 1): 1 – діючий автотранспорт; 2 – бар'єр (загорожа); 3 – розташування товару; 4 – людина (продавець); 5 – місце розташування голови людини

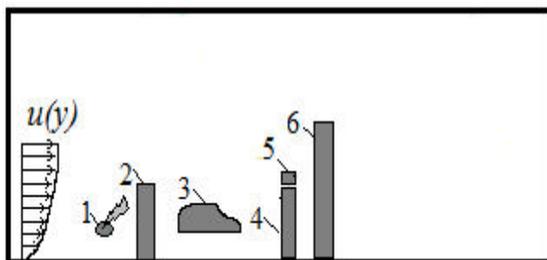


Рисунок 3.15 – Схема розташування працівника в зоні торгівлі біля автомагістралі (варіант 2): 1 – діючий автотранспорт; 2 – бар'єр (загорожа); 3 – розташування товару; 4 – людина (продавець); 5 – місце розташування голови людини, 6 – тимчасова споруда без піддашка

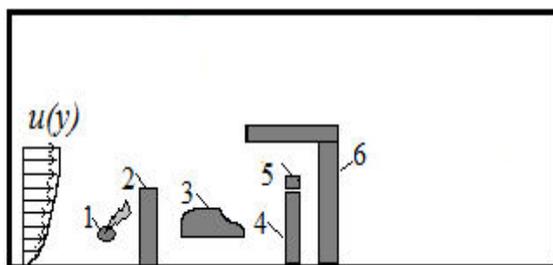


Рисунок 3.16 – Схема розташування працівника в зоні торгівлі біля автомагістралі (варіант 3): 1 – діючий автотранспорт; 2 – бар'єр (загорожа); 3 – розташування товару; 4 – людина (продавець); 5 – місце розташування голови людини, 6 – тимчасова споруда з піддашком

Перший варіант – продавець виконує торгівлю виносним товаром, без наявності «тимчасової споруди»; другий варіант – продавець виконує торгівлю виносним товаром біля «тимчасової споруди», що не має піддашку; третій варіант – продавець виконує торгівлю виносним товаром біля «тимчасової споруди», що має піддашок. У результаті проведених розрахунків було отримано поле швидкості і концентрації забруднювача в досліджуваній області. На рисунку 3.17 показано зміну швидкості повітряного потоку на рівні розташування голови працівника (локально) в залежності від варіанту

розташування місця торгівлі.

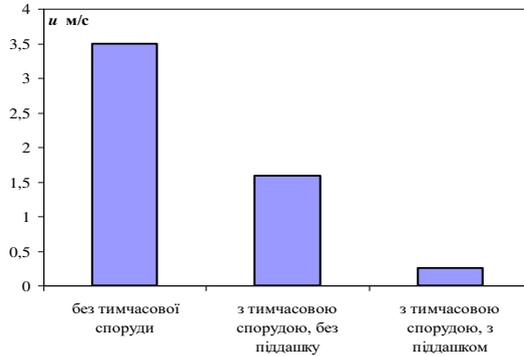


Рисунок 3.17 – Зміна швидкості повітряного потоку на рівні голови працівника

В першому варіанті $u = 3,5$ м/с, в другому $u = 1,6$ м/с, в третьому $u = 0,26$ м/с, тобто наявність «тимчасової спорути» зменшує швидкість у 2 рази, а наявність піддашку у тієї ж спорути зменшує швидкість у 5 разів, відносно ситуації, коли піддашок відсутній. З точки зору аеродинаміки, наявність піддашку призводить до сходу вихорів з його гострої кромки, щоб забезпечити кінцевість швидкості згідно постулату Чаплигіна-Жуковського, утворення завихореності конкретної потужності забезпечує зниження швидкості в зоні розташування голови працівника.

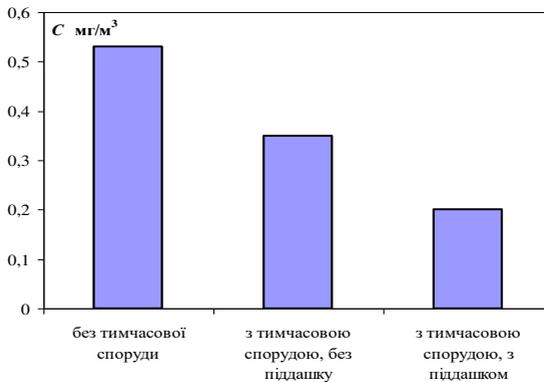


Рисунок 3.18 – Зміна концентрації діоксиду сірки на рівні голови працівника

На рисунку 3.18 показано зміну концентрації діоксиду сірки на рівні розташування голови працівника (локально) в залежності від варіанту розташування місця знаходження. В першому варіанті $C = 0,53 \text{ мг/м}^3$, в другому $C = 0,35 \text{ мг/м}^3$, в третьому $C = 0,21 \text{ мг/м}^3$, тобто наявність «тимчасової споруди» зменшує концентрацію у 1,5 рази, а наявність піддашку у тієї ж споруди зменшує концентрацію у 1,75 разів, відносно ситуації, коли піддашок відсутній. Помітно, що піддашок впливає на зміну концентрації забруднювача, але відіграє більш значну роль для зменшення швидкості повітряного потоку, забезпечуючи комфортні умови мікроклімату в робочій зоні. Тривале, або систематичне перебування в такій робочій зоні не відбивається на стані людей, забезпечує високу працездатність і комфорт.

Розроблений метод прогнозу параметрів повітряного середовища дозволив провести моделювання місця знаходження робітника на відкритій місцевості в межах або поза меж розташування «тимчасової споруди». Для програмної реалізації даного методу було застосовано кінцево-різницьвий алгоритм для розв'язання рівняння Нав'є-Стокса (гідродинамічної задачі) та рівняння масопереносу. Створено програмне забезпечення, що дозволило провести обчислювальні експерименти по дослідженню поля швидкості повітряного потоку та розподілу концентрації забруднювача в мікрзоні місця знаходження працівника. Встановлено закономірності зміни швидкості повітря на рівні голови працівника в залежності від наявності «тимчасової споруди» з піддашком чи без нього, а також в разі її відсутності. Зниження швидкості повітряного потоку до $0,26 \text{ м/с}$ за рахунок зміни аеродинаміки забезпечує комфортні умови праці для якісного виконання трудової функції працівника.

3.3 Використання рослинності для зниження рівня загазованості в робочих зонах

В теперішній час розповсюджене використання зелених насаджень біля автомагістралей (рис. 3.19) для зниження загазованості повітряного середовища в робочих зонах, які знаходяться на відкритій місцевості. Для практичного

застосування вкрай важливо використовувати методи прогнозування та оцінювання ефективності застосування рослин для зниження рівня загазованості повітряного середовища.

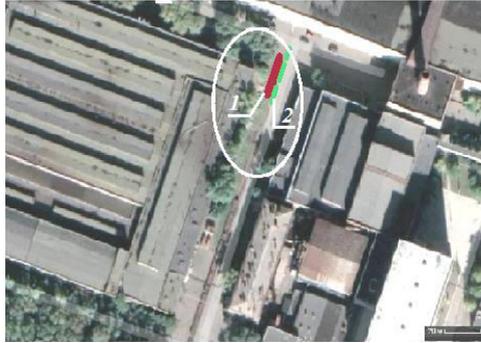


Рисунок 3.19 – Територія зони відпочинку робітників Південного машинобудівного заводу (Google Earth Image, 2019): 1 – літнє кафе; 2 – зона передбачуваної рослинності

Розв’язання даного завдання проводилося в два етапи: на першому етапі лабораторним способом вивчалися закономірності формування зон забруднення при наявності рослинності; на другому етапі розроблялася математична модель для розрахунку локальних зон забруднення від викидів автотранспорту при наявності рослинності [161].



Рисунок 3.20 – Гідравлічний лоток: 1 – жолоб; 2 – водозливи; 3 – модель рослинності

На першому етапі, використовуючи метод аналогій, лабораторним способом проводилися дослідження структури потоку в гідравлічному лотку (рис. 3.20), який знаходиться в лабораторії кафедри «Гідравліки і водовідведення» ДНУЗТ. Метою дослідження було вивчення процесу формування зон забруднення при емісії домішки біля моделі зеленої огорожі з розташованих один біля одного дерев.

На окремі ділянки лотка були встановлені два водозливи, які утворювали простір, що моделює ділянку вулиці. Усередині цього простору розміщувалася рослинність, яка представляла собою гілки ялини блакитної (*Picea pungens*), розміщені в 2 ряди (рис. 3.21) [161].



Рисунок 3.21 – Модель ялини блакитної для експерименту в гідравлічному лотку

Рослини першого ряду висотою 13 см розташовувалися на відстані 1,5 см один від одного, рослини другого ряду висотою 6 см розміщувалися між рослинами першого ряду. Вся огорожа закріплювалася на дні лотка, домішка (розчин натрій хлор) подавалася через голку, в розчин додавалася фарба для візуалізації зони забруднення, подача здійснювалася протягом 3 с. Цей процес імітував викид від автомобілів на дорозі.

При проведенні експериментів проводилася відеозйомка, число Рейнольдса потоку рідини становило $Re = 1596 > 500$, що в разі відкритих русел відповідає турбулентному режиму течії. Стрілкою на малюнках показано напрямок руху потоку.

Розглядалися два сценарії емісії забруднювача: в першому сценарії моделювався низький викид – емісія відбувалася на глибині 0,3 см від дна, у другому сценарії – середній викид, емісія відбувалася на глибині 3 см від дна [161].



Рисунок 3.22 – Динаміка формування зон забруднення $t=2$ с при низькому викиді: 1 – зона забруднення; 2 – модель рослинності

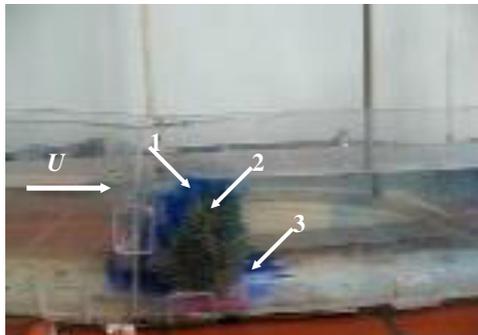


Рисунок 3.23 – Динаміка формування зон забруднення $t=6$ с при низькому викиді: 1, 3 – зони забруднення; 2 – модель рослинності

На рисунку 3.22–3.23 показано формування зони забруднення для двох послідовних моментів часу 2 с і 6 с після подачі забруднювача. Аналізуючи дані малюнки, можна прийти до наступних висновків: в початковий момент часу дерево створює перешкоду і відбувається гальмування зони забруднення з навітряного боку (рис. 3.22, зона 1), далі зона забруднення витягується вгору

уздовж моделі (рис. 3.23, зона 1), оскільки дерево – природна перепона. Одночасно починається проникнення забруднювача в нижній частині рослинності (рис. 3.23, зона 3), де опір середовища мінімальний – там знаходяться стовбури дерев.



Рисунок 3.24 – Динаміка формування зон забруднення $t=2$ с при середньому викиді: 1 – зона забруднення; 2 – модель рослинності

На рисунку 3.24–3.26 представлені зони забруднення для другого сценарію, коли розглядався середній по висоті викид. Як видно з представлених малюнків, при розташуванні викиду на середній висоті, як і в попередньому сценарії, добре простежується, що дерева формують перешкоду на шляху руху зони забруднення.



Рисунок 3.25 – Динаміка формування зон забруднення $t=4$ с при середньому викиді: 1 – зона забруднення; 2 – модель рослинності

За короткий проміжок часу зона забруднення гальмується (рис. 3.24, зона 1) і починає розвиватися вгору і вниз (рис. 3.25, зона 1), і лише з плином кількох секунд починається проникнення забруднювача через рослинність, формується зона забруднення у вигляді «язика» безпосередньо за моделлю рослинності. Найбільш інтенсивно цей процес походить в нижній частині розглянутої перешкоди, тобто там, де опір для потоку мінімальний (рис. 3.26, зона 3).

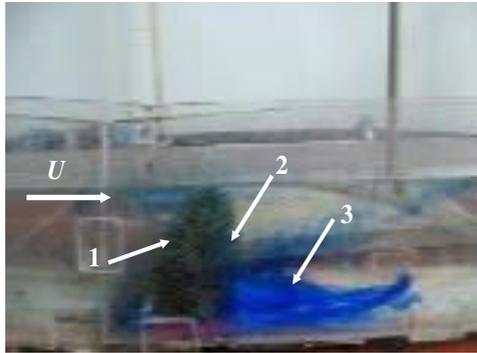


Рисунок 3.26 – Динаміка формування зон забруднення $t=7$ с при середньому викиді: 1, 3 – зони забруднення; 2 – модель рослинності

На другому етапі лабораторних досліджень в потік замість фарби надходив пиловий забруднювач і вивчався закон його осідання при наявності рослинності.



Рисунок 3.27 – Динаміка формування зон пилового забруднення $t=6$ с: 1, 3 – зони забруднення; 2 – модель рослинності; 4 – модель робочої зони

На рисунку 3.27 білим контуром показано зону забруднення пилового забруднювача, добре видно, що у верхній області (рис. 3.27, зона 3), інтенсивність забруднення вище, ніж в нижній області цієї зони, це безпосередньо пов'язано зі швидкістю осідання пилу і з тим, що в області розташування стовбурів пил проникає більш безперешкодно, але і швидше розсіюється.



Рисунок 3.28 – Динаміка формування зон пилового забруднення, яку осіло, $t=22$ с (вид зверху): 1, 3 – зони забруднення; 2 – модель рослинності; 4 – модель робочої зони

На рисунку 3.28 показано зони пилового забруднювача, що осів після його надходження в потік, знесення потоком і розсіювання в потоці. Можна спостерігати, що значна частина цього забруднювача осіла безпосередньо перед рослинністю, яка досить ефективно перешкоджає руху пилового забруднювача.

На третьому етапі лабораторних досліджень вивчалися закономірності формування зон забруднення, коли замість рослинності використовується її «еквівалент» – пластина. Однак на відміну від інших досліджень в даній роботі використовується не суцільна пластина, а пориста, де під пористістю розумілося відношення просвіту до площі поперечного перерізу рослинної зони. На рисунку 3.29 показана динаміка формування зон забруднення в разі надходження фарби в потік при наявності пористої пластини з такими характеристиками: діаметр отворів $d = 3$ мм, відстань між отворами 5 мм.

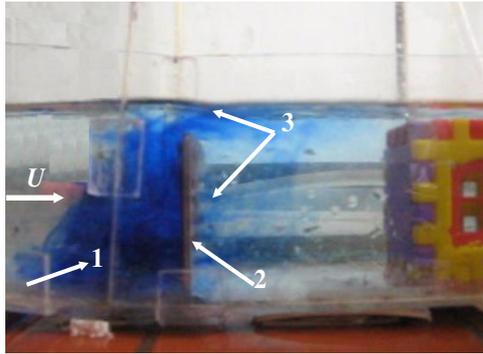


Рисунок 3.29 – Динаміка формування зон забруднення $t=6$ с при низькому викиді: 1, 3 – зони забруднення; 2 – пориста пластина

Порівнюючи рис. 3.29 і рис. 3.23 видно подібність у розвитку зон забруднення. Результати лабораторних досліджень послужили передумовою для того, щоб при математичному моделюванні зон забруднення біля насаджень використовувати «еквівалент» цих насаджень – пористу пластину (рис. 3.30).

Безумовно, це є спрощеним припущенням, але при такому підході можна побудувати модель для проведення «пілотних» або оціночних розрахунків.

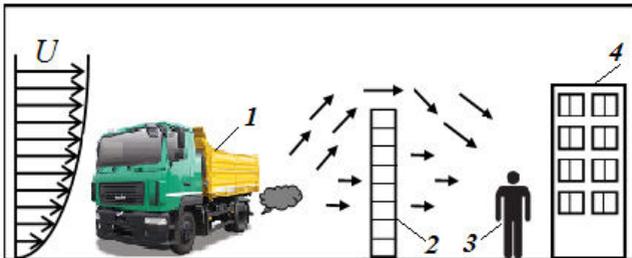


Рисунок 3.30 – Розрахункова схема обтікання: 1 – вантажний автотранспорт; 2 – рослинність; 3 – працівник на території підприємства; 4 – будівля на території підприємства

Для розрахунку локального поля швидкості при наявності рослинності біля автомагістралі використовується модель потенційного течії [143]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (3.32)$$

де P – потенціал швидкості.

Чисельне інтегрування рівняння (3.32) проводиться з використанням прямокутної різницевої сітки. Для чисельного інтегрування рівняння Лапласа (3.32) використовується метод Лібмана. Апроксимуюче рівняння має наступний вид:

$$\frac{P_{i+1,j} - 2P_{i,j} + P_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1} - 2P_{i,j} + P_{i,j-1}}{\Delta y^2} = 0 \quad (3.33)$$

Невідоме значення потенціалу швидкості визначається за такою залежністю:

$$P_{i,j} = \frac{\frac{P_{i+1,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1} - P_{i,j-1}}{\Delta y^2}}{\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{2}{\Delta y^2}} \quad (3.34)$$

Для початку розрахунку за методом Лібмана задається «початкове» значення потенціалу швидкості в розрахунковій області $P_{i,j}^0$. Розрахунок припиняється при виконанні умови: $|P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n| \leq \varepsilon$, де $\varepsilon=0.001$, n – номер ітерації. Знайдені значення потенціалу швидкості дозволяють розрахувати компоненти вектору швидкості на гранях різницевих осередків по співвідношенню:

$$u_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, v_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y} \quad (3.35)$$

Граничні умови для даного рівняння розглянуті п. 2.4.

Для розрахунку розсіювання газоподібних і пилових викидів поблизу автомагістралі при наявності рослинності (пористої пластини) використовується модель 2D рівняння масопереносу (3.36), описана в п. 2.3 рівняння (2.18) та його різницевий аналог (2.24) [143]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v - w_s)C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \sum Q_i \delta(x - x_i)(y - y_i), \quad (3.36)$$

де C – концентрація забруднюючої речовини; u , v – компоненти вектору швидкості повітряного потоку; w_s – швидкість гравітаційного осідання забруднюючої речовини, $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коефіцієнти турбулентної дифузії; (x_i, y_i) – координати джерела викиду забруднюючої речовини; Q_i – інтенсивність емісії забруднювача в точці (x_i, y_i) ; $\delta(x - x_i)(y - y_i)$ – дельта-функція Дірака, за допомогою якої моделюється надходження забруднювача.

Чисельне інтегрування рівняння масопереносу (3.36) проводиться за допомогою неявної поперемінно-трикутної різницевої схеми розщеплення [143]. Постановка крайових умов для даного рівняння розглянута в роботах Г. І. Марчука и О. О. Самарського Вихідними даними для розрахунків є:

профіль швидкості вітру на вході в розрахункову область $u = u_1 \left(\frac{Y}{Y_1} \right)^n$, де

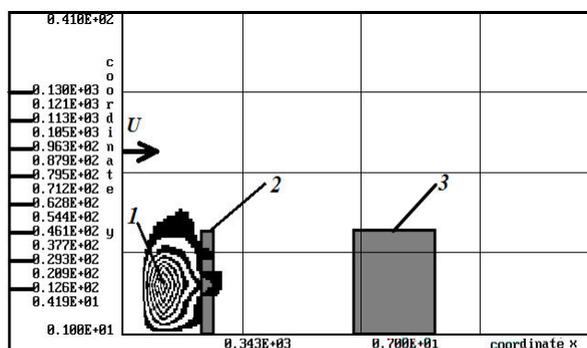
$u_1 = 4,5$ м/с – значення швидкості вітру на висоті $Y_1 = 10$ м, $n = 0,15$; стан атмосфери (інверсія, конвекція), тобто значення вертикального коефіцієнта

дифузії $\mu_y = k_1 \left(\frac{Y}{Y_1} \right)^m$, $k_1 = 0,2$, $m \approx 1$; середній викид CO від одного

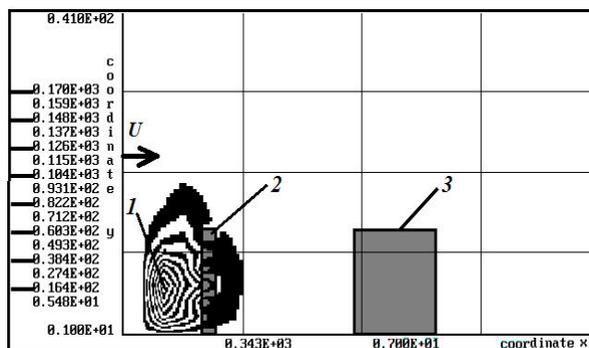
автомобіля складає близько 0,058 г/с; положення джерела викиду – положення вихлопної труби автомобіля.

Для зниження рівня загазованості на території промислового підприємства Південного машинобудівного заводу пропонується висаджування кущів вздовж дороги (бирючина «звичайна» – *Ligustrum*, самшит вічнозелений – *buxus sempervirens*). Наявність таких кущів буде створювати локальну перешкоду на шляху руху вихлопних газів при русі автотранспорту. Оцінку ефективності зниження рівня загазованості на промислових майданчиках можна виконати за допомогою розробленого математичного методу.

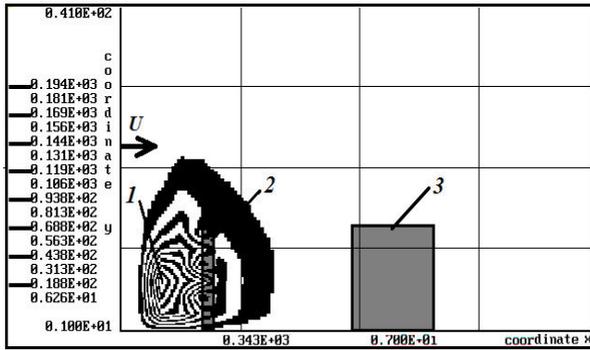
На рисунку 3.31 представлена динаміка формування зон забруднення для різних моментів часу, розрахована за допомогою запропонованого підходу (положення рослинності моделюється розміщенням пористої пластини) [161].



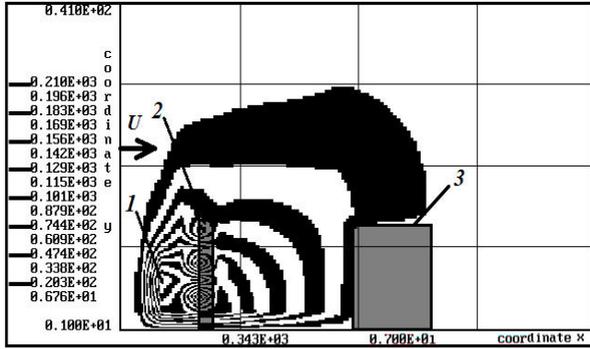
a



б



6



2

Рисунок 3.31 – Поле концентрації CO на промисловому майданчику при наявності рослинності: $a - t=2$ с; $b - t=6$ с; $в - t=8$ с; $г - t=22$ с; 1 – викид вихлопних газів автотранспорту; 2 – рослинність; 3 – будівля на території [161]

Порівнюючи дані малюнки з результатами лабораторних досліджень щодо поширення фарби і пилу в потоці видно, що спостерігається узгодження за формою і структурою формування зони забруднення біля зелених насаджень і пористої пластинки. Чітко виділяється підзона забруднення, яка на початковому етапі взаємодії повітряного потоку з рослинністю витягується вгору (рис. 3.31 a), а потім відбувається проникнення домішки через пористу перешкоду (рис. 3.31 b - $г$). Отримані результати показують, що метод прогнозу «відстежує» процес проникнення

домішки через пористу пластину за таким же принципом, як проникнення забруднення через зелені насадження рис. 3.22–3.26.

Аналізуючи зони забруднення, представлені на рисунку 3.31, видно, що наявність рослинності (пористої пластини) призводить до часткового розвороту забрудненого потоку від джерела емісії наверх і часткового проникнення забруднювача через отвори в пластині. Такий випадок є аналогічним проникненню забруднювача через гілки рослинності, що й узгоджується з результатами експерименту.

На рисунку 3.32 показано розрахункові значення концентрації CO на промисловому майданчику підприємства для обраної точки, що розташована на відстані 10 м від автомагістралі і на висоті 1,7 м під час наявності та відсутності рослинності.

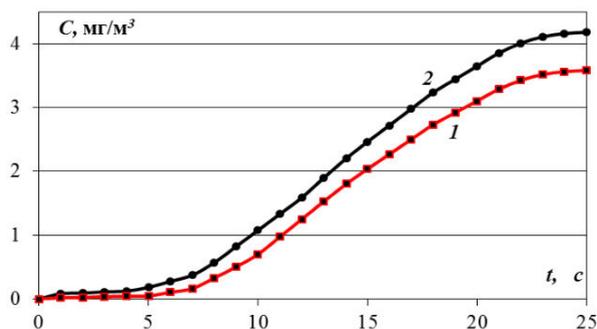


Рисунок 3.32 – Зміна концентрації CO з часом на промисловому майданчику: 1 – з рослинністю; 2 – без рослинності

Із рисунка 3.32 видно, що рослинність призводить до зниження концентрації забруднювача в робочій зоні приблизно на 5–12 % з часом.

Запропонований метод чисельного розрахунку дає можливість розрахувати рівень загазованості робочих зон біля автомагістралей при наявності зелених насаджень.

Як відомо, дерева можуть видаляти газоподібне забруднення повітря різними шляхами [40]. Вологі, грубі або електрично заряджені поверхні найбільше поглинають частинки забруднювача з повітря. Деякі частинки потім

поглинаються в середині листа, де газоподібні речовини дифундують у міжклітинних просторах і можуть бути поглинені, утворюючи кислоти, але більшість частинок залишаються на поверхні рослини. Ці «перехоплені» частинки часто повертаються в атмосферу, вимиті дощем або скинуті на землю з опалим листям у ґрунт. В табл. 3.1 наведені швидкості осадження та показники видалення для дерев різних видів. Накопичення частинок на листях для різних фракцій (розмірів) частинок PM_{10} , $PM_{2,5}$, $PM_{0,2}$ відрізняється в залежності від видів рослинності в 10–15 разів.

Таблиця 3.1 – Швидкість осадження та показники видалення для дерев різних видів

Вид дерева	Швидкість осадження	Показники видалення, мкг/см ² /рік
Верба	0,5 см/с	24
Дуб	0,8 см/с	-
Плаган	1,3 см/с	9
Клен	1,9 см/с	8 – 19
Бук	3,0 см/с	-
Береза	4,6 см/с	38,4
Сосна	-	24 – 55

Дослідження лабораторних експериментів (рис. 3.23, 3.26, 3.27, 3.29) показують, що забруднення проходить вільно крізь рослинність. Згідно результатів спостережень для проведення експрес розрахунку область, яка займає рослинність, моделювалася як зона, через яку вільно рухається забруднене повітря, але в середині цієї зони відбувається сорбція забруднення листями. Швидкість такого виду сорбції визначається константами, числові значення яких отримуються експериментально [175].

Для моделювання такого процесу використовувався наступний підхід: на першому етапі розглядався рух викидів від автотранспорту на примігстральній території, згідно двовимірного рівняння масопереносу (3.36); на другому – в зоні знаходження рослинності виконувався розрахунок зниження концентрації в наслідок сорбції листями рис. 3.33 [40].

Профіль швидкості повітряного потоку на вході в розрахункову область задавався співвідношенням $u = u_1 \left(\frac{Y}{Y_1} \right)^n$, де $u_1 = 4,5$ м/с – значення швидкості вітру на висоті $Y_1 = 10$ м, $n = 0,15$; стан атмосфери (інверсія, конвекція), тобто значення вертикального коефіцієнта дифузії $\mu_y = k \left(\frac{Y}{Y_1} \right)^m$, $k = 0,2$, $m \approx 1$.

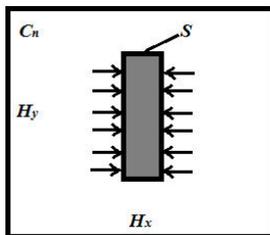


Рисунок 3.33 – Схема процесу сорбції в розрахунковій комірці [40]

Згідно з тим, що об'єм комірки $W = H_y \cdot H_x \cdot 1$, потік маси

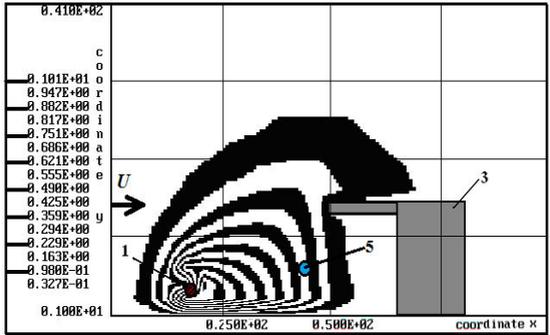
$dm = dt \cdot S \cdot \mu \cdot \frac{\partial C}{\partial z}$, витрата через комірку $\frac{dm}{dt} = \frac{C^{n+1} - C^n}{dt}$, а з іншої сторони

$\mu \frac{\partial C}{\partial z} = \beta \cdot C$ [80], тому $\frac{C^{n+1} - C^n}{dt} = S \cdot \beta \cdot C$.

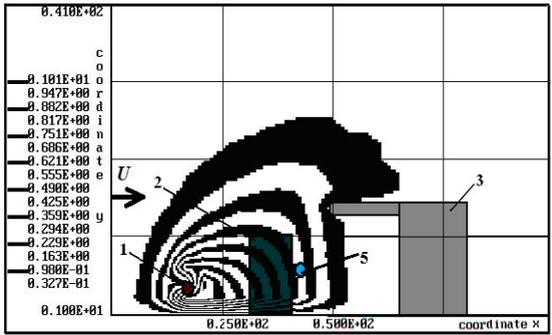
$$\frac{\partial C}{\partial t} = \sigma \cdot C, \quad (3.37)$$

де $\sigma = S \cdot \beta$ – коефіцієнт сорбції.

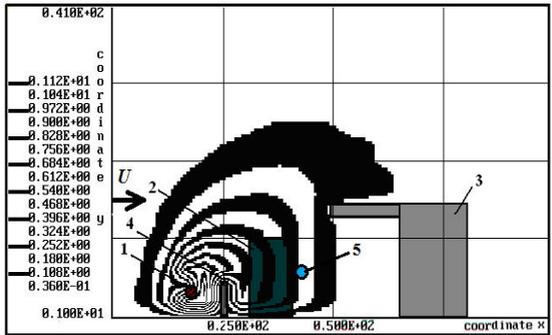
Розглядалися три варіанти процесу емісії забруднювача біля автомагістралі рис. 3.34 а–в, розмір ділянки 100 м на 42 м, розглядалася емісія CO від автотранспорту: перший варіант – без наявності рослинності, другий варіант – з урахуванням рослинності, третій варіант – з рослинністю та бар'єром (загрожею).



a



б



в

1 – джерело емісії забруднення (автотранспорт), 2 – рослинність, 3 – будівля, 4 – бар’єр (загорожа), 5 – точка спостереження

Рисунок 3.34 – Зона забруднення: а – без наявності рослинності, б – при наявності рослинності, в – при наявності рослинності і загорожі

У кожному варіанті розрахунків порівнювалося значення концентрації забруднювача в точці спостереження, що позначена цифрою 5. Вона знаходилася на відстані $x=42$ м, $y=7$ м, числові значення представлені на рис. 3.35.

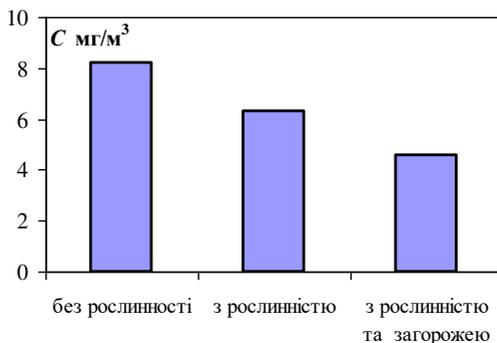


Рисунок 3.35 – Значення концентрації оксиду вуглецю в точці спостереження

У першому варіанті $C = 8,216$ мг/м³, у другому $C = 6,317$ мг/м³, у третьому $C = 4,562$ мг/м³, тобто наявність рослинності зменшує концентрацію у 1,3 рази, а наявність рослинності та бар'єру зменшує концентрацію у 1,8 рази, відносно ситуації, коли відсутня рослинність, і у 1,4 рази відносно до наявності рослинності. Зміна значення концентрації домішки обумовлена як процесом сорбції рослинністю, так і зміною аеродинаміки повітряного потоку.

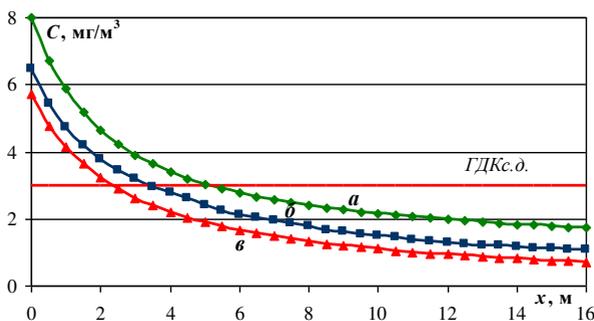


Рисунок 3.36 – Розподіл концентрації CO : *a* – без наявності рослинності, *b* – при наявності рослинності, *v* – при наявності рослинності і сорбції

При сталому русі розподіл концентрації CO без рослинності, з урахуванням рослинності, як пористої пластини, та з урахуванням процесу сорбції рослинністю представлено на рис. 3.36.

Аналіз розподілу концентрації оксиду вуглецю показав, що без наявності рослинності перевищення $ГДКс.д.$ спостерігається на відстані 5,5 м від точки спостереження, при наявності рослинності – на відстані 3,5 м, при наявності рослинності і сорбції – на відстані 3 м. Тобто, при наявності рослинності рівень концентрації знижується в середньому на 7–14 %, а при урахуванні процесу сорбції – на 11–20 %.

Відповідно отриманої матриці розподілу концентрації, було обчислено ризик виникнення хронічних захворювань у робітників. Значення ризику при сталому русі показано на рис. 3.37.

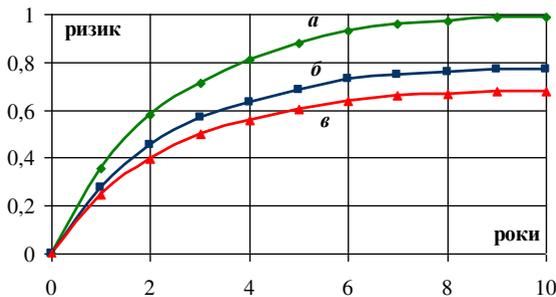


Рисунок 3.37 – Ризик виникнення хронічних захворювань: *а* – без наявності рослинності, *б* – при наявності рослинності, *в* – при наявності рослинності і сорбції

Таким чином, робиться оцінка ризику в зоні відпочинку робітників в двох наближеннях: без урахування сорбції рослинністю, коли рослинність використовується лише як механічна перешкода – пористий екран; з урахуванням процесу сорбції рослинністю. У першому наближенні ризик зменшується на 28 %, а у другому на 32 %. Аналіз розрахунків показав, що наявність рослинності відіграє суттєву роль для зниження рівня концентрації забруднювача, тоді як урахування процесу сорбції знижує концентрацію лише на 4–6 %.

3.4 Методи оцінювання вітрового режиму в робочих зонах

Як відмічалось у п. 3.2 CFD моделювання може бути використано для оцінювання поля швидкості вітру навколо будівель, а також для оцінювання теплового комфорту, вентиляції повітря, мікрокліматичних умов [237]. За останні два десятиліття поряд з удосконаленням CFD моделювання, багато досліджень зосереджені на чисельному моделюванні повітряного потоку поблизу однієї будівлі, їх дослідження показують складні явища потоку [165, 214, 220]. CFD моделювання ведеться на базі програмних пакетів, які вимагають для проведення розрахунків великих витрат часу, дуже дрібної сітки і універсальних моделей турбулентності [229] для розглянутого даного класу задач. В даний час для досліджень використовують комерційний код Fluent Code [212] і k-ε модель турбулентності [214, 197], вибір якої заснований на рекомендаціях [165]. Ця модель турбулентності підтверджується дослідженнями, проведеними для умов на пішохідному рівні [163–164].

При виконанні дисертаційних досліджень було розроблено три методи дослідження поля швидкості повітряного потоку в робочій зоні на відкритій місцевості: вихровий, Нав'є-Стокса та потенційний.

Дані методи дозволили провести порівняння результатів розв'язання задачі відносно дослідження поля швидкості повітряного потоку в зоні розташування «тимчасової споруди» у вигляді навісу, що відіграє роль бар'єру, та будівлі, що розташовується в околі даної робочої зони (рис. 3.38) [102–103, 106]. Геометричні розміри споруди з навісом та будівлі 1:1, тобто довжина та ширина сумірні величини.

На практиці представляє інтерес визначення швидкості вітру в будь-якій точці розрахункової області (рис. 3.38, позначка 3). Розроблені методи дозволяють отримати таку інформацію, яка представлена в табл. 1. В точці 3 наведено значення локальної швидкості для трьох значень швидкості набігаючого потоку.

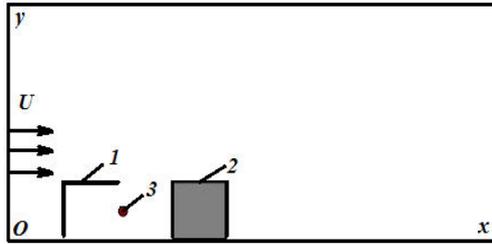


Рисунок 3.38 – Схема розрахункової області: 1 – тимчасова споруда (навіс); 3 – будівля; 2 – будівля; 3 – точка спостереження

Таблиця 3.2 – Порівняльні значення локальної величини швидкості в точці спостереження на висоті $0,5 h$ в залежності від швидкості набігаючого потоку за різними методами

Метод	Швидкість, U , м/с			
	$U=3$ м/с	$U=5$ м/с	$U=7$ м/с	$U=9$ м/с
вихровий	0,16	0,22	0,28	0,38
Нав'є-Стокса	0,12	0,19	0,24	0,33
потенційний	0,14	0,2	0,26	0,35

Аналіз результатів показує, що при вибраних геометричних параметрах споруд при швидкості набігаючого потоку $U=7-9$ м/с спостерігається перевищення порогового комфортного значення $0,2$ м/с, тобто дані параметри висоти навісу та довжини його піддашку не ефективні. Таким чином, розроблені методи дозволяють оперативного за допомогою обчислювального експерименту отримувати рішення задачі стосовно «вітрового комфорту» в робочих зонах з урахуванням габаритів будівель і їх взаємного розташування. На підставі такої інформації можна вибрати оптимальні параметри та місце розташування робочих зон, щоб швидкість вітрового потоку не перевищувала допустимих значень.

Як видно із даних представлених у табл. 3.2 має місце задовільне узгодження результатів за трьома методами. Даний розрахунок можна також вважати верифікацією розроблених методів, але слід відмітити наступне,

застосування вихрового методу для задач, що характеризуються складною геометричною формою (розділ 3, 4, 5), є недоцільним, оскільки реалізація граничних умов непротікання для даного методу не дозволяє розробити універсальну чисельну модель (з широким робочим діапазоном), особливо при наявності комплексу перешкод на шляху повітряного потоку.

ВИСНОВКИ

В монографії проаналізовано газовий склад повітряного середовища у робочих зонах на промислових майданчиках та на відкритій місцевості промислових регіонів. Показано, що зміна газового складу повітря відбувається в результаті техногенного впливу викидів промислових підприємств та автотранспорту, що знаходяться в околі робочих зон.

Показано, що склад викидів забруднювачів повітря змінюється в залежності від галузі промисловості. Зроблено аналіз шкідливих речовин, що потрапляють у повітря під час роботи різних видів промисловості: кольорової металургії, хімічної промисловості, нафтопереробної, виробництва будівельних матеріалів, деревообробної та целюлозно-паперової промисловості.

Проаналізовано підприємства міста Дніпра, що поділяються за сферою діяльності і є активними джерелами забруднення атмосферного повітря. Також показано, що для пересувних джерел забруднення (автомобілів) характерна більш висока токсичність викидів в порівнянні з викидами стаціонарних джерел. Доведено, що працівники на промислових майданчиках та на відкритій місцевості промислових регіонів одночасно потрапляють під дію шкідливих викидів підприємств і автотранспорту, з одночасним урахуванням взаємовпливу домішок та їх хімічної трансформації в атмосфері.

Проаналізовано методи оцінювання ризику захворювань працівників в робочих зонах на промислових майданчиках та на відкритій місцевості промислових регіонів, що є однією з основних проблем як в сфері охорони праці так і захисту навколишнього середовища. Показано, що існує підвищений ризик розвитку захворювань та виникнення несприятливих наслідків для людей даної категорії.

Показано, що для вирішення практичних завдань по оцінці параметрів комфортності мікроклімату в робочих зонах працівників на промислових майданчиках використовуються фізичні, аналітичні та чисельні методи. Показано їх переваги та недоліки.

На основі проведених досліджень розроблено метод чисельного розрахунку концентрації домішки в робочих зонах на відкритій місцевості промислових майданчиків на основі тривимірного рівняння масопереносу, який дозволяє проводити розрахунок окремо, як для постійно діючого точкового джерела забруднення або для лінійно розподіленого джерела забруднення, так і з урахуванням їх взаємного впливу та хімічної трансформації. Розроблений метод застосовано для вивчення динаміки забруднення повітряного середовища на підприємствах: Дніпропетровському металургійному заводі «ДМЗ ЄВРАЗ», Коксохімічному заводі «Дніпрококс», Придніпровській ТЕС, «Інтерпайп Нижньодніпровському трубопрокатному заводі», «ПАТ Південному гірничо-збагачувальному комбінаті» та на прилеглий території. Метод дозволяє оцінити вплив величини і напрямку швидкості вітру, вертикального коефіцієнту дифузії, специфіку хімічних перетворень забруднюючих речовин на їх розсіювання в повітряному середовищі.

Також розроблено метод комплексного просторово-часового оцінювання ризику виникнення хронічних захворювань для робітників на промислових майданчиках та на житловій території в зоні впливу викидів автомагістралей та підприємств. Проведено оцінку зміни ризику хронічної інтоксикації, пов'язаної із забрудненням атмосферного повітря конкретними видами домішок впродовж 10 або 20 років на основі розрахованого поля концентрації. Встановлено, що ризик виникнення хронічних захворювань для працівників на відкритій місцевості розглянутих промислових об'єктів є небезпечним та надзвичайно небезпечним. Даного класу розрахунки є необхідним інструментом для діагностування, прогнозування та моделювання небезпечних умов праці при проєктуванні робочих місць на промислових майданчиках та на відкритій місцевості промислових регіонів, що знаходяться під впливом шкідливих забруднюючих речовин, які потрапляють в повітря від промислових підприємств та автомагістралей.

Запропоновано використання чисельно-аналітичного методу, що базується на теорії функцій комплексного змінного, для розрахунку поля швидкості повітряного потоку біля екрана. Застосування екрана призводить до зменшення зони забруднення та зниження його рівня. Концентрація знижується на 11 % при висоті екрана 1,2 м і на 15 % при висоті екрана 1,8 м в порівнянні з випадком відсутності екрана.

Розроблено метод прогнозу параметрів повітряного середовища в робочій зоні на основі розв'язання гідродинамічної задачі за допомогою рівняння Нав'є-Стокса. Встановлено закономірності зміни швидкості повітря та концентрації забруднювача на рівні голови працівника в залежності від наявності «тимчасової споруди» з піддашком чи без нього, а також в разі її відсутності: наявність «тимчасової споруди» зменшує швидкість у 2 рази, а концентрацію у 1,5 рази; наявність піддашку у тієї ж споруди зменшує швидкість у 5 разів, а концентрацію у 1,75 разів відносно ситуації, коли піддашок відсутній. Зниження швидкості повітряного потоку до 0,26 м/с за рахунок зміни аеродинаміки забезпечує комфортні умови праці для якісного виконання трудової функції працівника.

На основі проведених лабораторних досліджень виявлено закономірності проникнення забруднення через рослинність для різної висоти розташування джерела емісії забруднювача. Проаналізовано результати осадження пилового забруднення біля рослинності. Лабораторним шляхом встановлено, що використання пористої пластини дозволяє проводити моделювання зон забруднення аналогічно, як при наявності рослинності.

Розроблено числовий метод для проведення експрес-розрахунку зон забруднення біля автомагістралі при наявності рослинності, що дозволяє оперативно оцінювати формування зон забруднення в робочих зонах на відкритій місцевості з урахуванням викидів від автотранспорту. Встановлено, що присутність рослинності призводить до зниження концентрації забруднювача в робочій зоні приблизно на 5–7 %, а з урахуванням процесу сорбції рослинністю – на 11–20 %. Ризик виникнення хронічних захворювань зменшується при наявності рослинності на 28 %, а з урахуванням сорбції рослинністю на 32 %.

Розроблено такі математичні методи прогнозу параметрів мікроклімату, які задовольняють вимогам: зручність практичного застосування, невелика база вихідних даних, швидкість розрахунку, зручність в обробці і трактуванні кількісних результатів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алымов В. Т., Тарасова Н. П. Техногенный риск. Москва : ИКЦ «Академкнига», 2004. 118 с.
2. Андреева Е. Г., Шамец С. П., Колмогоров Д. В. Расчет стационарных магнитных полей и характеристик электротехнических устройств с помощью программного пакета Ansys. *Нефтегазовое дело*. 2004. С. 1–10.
3. Антошкина Л. И., Беляев Н. Н., Гунько Е. Ю. Оценка экологического риска при авариях с химически опасными веществами. Днепропетровск : Наука и образование, 2008. 136 с.
4. Аргучинцев В. К., Аргучинцев А. В. Моделирование мезомасштабных гидротермодинамических процессов и переноса примесей в атмосфере и гидросфере региона оз. Байкал. Иркутск : Изд-во Иркутского гос. ун-та, 2007. 255 с.
5. Басмано А. Е., Говаленков С. С. Оценка концентрации опасных химических веществ в воздухе при непрерывной активности источника. *Збірник наукових праць «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. 2010. Вип. 12. С. 21–27.
6. Безкровна О. В., Скопенко В. П. Організація моніторингового дослідження забруднення повітря автотранспортом у Деснянському районі м. Києва. *Збірник наукових праць*. 2011. Вип. 57. С. 72–76.
7. Беликов А. С., Рагимов С. Ю., Акиншин В. Д. Некоторые аспекты оптимизации исследования условий труда по микроклимату в промышленной индустрии. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування*. 2010. Вип. 52, Ч. 2. С. 3–9.
8. Охрана труда на предприятиях строительной индустрии / Беликов А. С. та ін. Дніпропетровськ : «Федорченко А. А.», 2010. 528 с.
9. Белов И. А. Взаимодействие неравномерных потоков с преградами. Ленинград : Машиностроение, 1983. 144 с.
10. Беляев Н. Н., Цыганкова С. Г. Calculation of air ion regime in the case of artificial air ionization. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2015. № 10 (211). С. 61–67.

11. Беляєв Н. Н., Цыганкова С. Г. CFD моделювання аеріонного режиму в приміщеннях. *Технічні науки та технології: науковий журнал*. 2015. №2 (2). С. 242–247.
12. Беляєв Н. Н., Цыганкова С. Г. Оцінка аеріонного режиму в робочій зоні при штучній іонізації повітря в приміщенні. *Науковий вісник будівництва*. 2015. № 3 (81). С. 158–161.
13. Беляєв Н. Н., Цыганкова С. Г. Численні моделі для експрес розрахунку концентрації аеріонів в приміщенні. *Науковий вісник будівництва*. 2015. №4 (82). С. 190–193.
14. Беляєв Н. Н., Цыганкова С. Г. Математичне моделювання аеріонного режиму в приміщенні при штучній іонізації повітря. *Збірник наукових праць: Стrojительство, матеріалознавство, машинобудування*. Серія: *Безпека життєдіяльності*. 2015. Вип. 83. С. 40–46.
15. Беляєв Н. Н., Русакова Т. И., Кириченко П. С. Моделювання забруднення атмосферного повітря вибросами автотранспорту на вулицях міст : монографія. Дніпропетровськ : Акцент ПП, 2014. 159 с.
16. Беляєв Н. Н., Русакова Т. И. Математичне моделювання процесу вентиляції тупикової підземної виробки. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2015. Вип. 47. С. 35–41.
17. Беляєв Н. Н., Русакова Т. И. Дослідження техногенного впливу на навколишнє середовище газів вибросів Придніпровської ТЭС. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Механіка*. 2016. Вип. 20, т. 24, № 5. С. 53–60. ISSN 2312–2897.
18. Беляєв Н. Н., Русакова Т. И., Колесник В. Е., Павличенко А. В. Прогноз рівня забруднення атмосферного повітря в зоні впливу міських автомагістралей. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2016. №1. С. 90–97. ISSN 2071-2227 (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).
19. Беляєв Н. Н., Русакова Т. И. Інформаційна система оцінки

уровня загрязнения воздушной среды выбросами горно-обогатительного комбината. *Геотехнічна механіка: Міжвідомчий збірник наукових праць*. 2017. Вип. 135. С. 149–159. ISSN 1607-4556.

20. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Исследование изменения концентрации кислых сточных вод в процессе их нейтрализации. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Механіка*. 2017. Вип. 21, т. 25, № 5. С. 104–113. ISSN 2312-2897.

21. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Исследование процесса нейтрализации кислотных сточных вод на базе численной модели. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2017. Вип. 99. С. 146–152. ISSN 2415-7031.

22. Беляев Н. Н., Русакова Т. И., Якововська З. Н. Численное моделирование процессов массопереноса при нейтрализации сточных вод. *Науковий вісник будівництва*. 2017. Т. 87, №1. С. 159–165. ISSN 2311-7257.

23. Біляев М. М., Русакова Т. І. Оцінка стану атмосферного повітря в промисловій зоні. *Науковий вісник будівництва*. 2017. Т. 89, №3. С. 136–141. ISSN 2311-7257.

24. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Прогнозирование уровня загрязнения воздушной среды города от действующих техногенных источников. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2018. Вип. 53. С. 250–256. ISSN 2071-1859.

25. Біляев М. М., Русакова Т. І. Зниження рівня загазованості повітряного середовища. *Геотехнічна механіка: Міжвідомчий збірник наукових праць*. 2018. Вип. 139. С. 135–144. ISSN 1607-4556.

26. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Численное и экспериментальное исследование загрязнения атмосферного воздуха на улицах при выбросах от автотранспорта. *Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: тезисы докл. 75 Междунар. научно-практ. конф., 14–15 мая 2015 г.* Днепропетровск: ДНУЖТ, 2015. С. 336–337.

27. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Оценка уровня экологической безопасности атмосферного воздуха при чрезвычайных ситуациях. *Экология и защита окружающей среды*: сб. тез. докл. III Междунар. научно-практ. конф., 19 мая 2016 г. Минск: БГУ, 2016. С. 231–235.

28. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Численное моделирование процессов очистки воды. *Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта*: тезисы докл. 76 Междунар. научно-практ. конф., 19–20 мая 2016 г. Днепропетровск: ДНУЖТ, 2016. С. 265–266.

29. Беляев Н. Н., Русакова Т. И., Гурина Е. В. Компьютерная модель процесса очистки воды и сушки осадка в псевдосжиженном слое. *Современные информационные и коммуникационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании*: тезисы докл. X Междунар. научно-практ. конф., 14–15 дек. 2016 г. Днепропетровск: ДНУЖТ, 2016. С. 91–92.

30. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Моделирование нейтрализации сточных вод. *Неделя эколога – 2017*: доклады междунар. научн. симпоз., 10–13 апреля 2017 г. Каменское: ДГТУ, 2017. С. 47–48.

31. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Прогнозирование экологического состояния атмосферного воздуха в зоне промышленных предприятий. *Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств*: тези доповідей VI Міждунар. научн.-практ. конф., 29–30 лист. 2017 р. Дніпро: ДНУЗТ, 2017. С. 19–20.

32. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Управление потоками транспортных систем для обеспечения экологически безопасного состояния воздушной среды. *Современные информационные и коммуникационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании*: тезисы Междунар. научно-практ. конф., 13–14 декабря 2017 г. Днепр: ДНУЖТ, 2017. С. 90.

33. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Метод прогнозирования экологически безопасного состояния атмосферного воздуха выбросами приземных источников загрязнения. *Экология и защита окружающей среды*: тезисы докл.

IV-ой Междунар. научно-практ. конф., 16–17 мая 2018 г. Минск: БГУ, 2018. С. 140–144.

34. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1985. 273 с.

35. Берлов О. В., Калашніков І. В., Кіріченко П. С., Козачина В. А., Русакова Т. І. Прогнозування рівня забруднення атмосфери на базі чисельної моделі. *International Trends in Science and Technology: Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference*, Vol. 1. April 30. Warsaw. Poland. 2019. P. 41–44.

36. Біляєв М. М., Русакова Т. І. Вплив автомагістралей на рівень забруднення атмосферного повітря в мікрорайонах міста. *Архітектурний вісник Київського національного університету будівництва і архітектури*. 2016. Вип. 8-9. С. 145–155.

37. Біляєв М. М., Русакова Т. І. Зменшення концентрації оксиду вуглецю у вихлопних газах автотранспорту. *Науковий вісник будівництва*. 2018. Т. 93, №3. С. 247–252. ISSN 2311-7257.

38. Біляєв М. М., Русакова Т. І. Комп'ютерна оцінка рівня забруднення атмосферного повітря під дією техногенних джерел. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2018. Вип. 54. С. 337–344. ISSN 2071-1859.

39. Біляєв М. М., Русакова Т. І. Математичне моделювання процесу розсіювання викидів від постійно діючого стаціонарного джерела забруднення. *Математичне моделювання*. 2018. Т. 38, №1. С. 77–82. ISSN 2519-8106 (Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*).

40. Біляєв М. М., Русакова Т. І. Прогноз локальних зон забруднення біля автомагістралі з урахуванням рослинності. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2018. Вип. 55. С. 333–341. ISSN 2071-1859.

41. Біляєв М. М., Русакова Т. І. Розрахунок електричного поля на вулиці. *Математичне моделювання*. 2018. Т. 39, № 2. С. 37–45. ISSN 2519-8106,

DOI:10.31319/2519-8106.2(39)2018.154205. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*).

42. Біляєв М. М., Русакова Т. І. Способи зменшення рівня інтоксикації працівників в робочих зонах біля автомагістралі. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2018. Вип. 56. С. 231–240. ISSN 2071-1859.

43. Біляєв М. М., Русакова Т. І. Прогнозування параметрів мікроклімату в робочих зонах методом обчислювального експерименту. *Науковий вісник будівництва*. 2019. Т. 95, № 1. С. 233–240. ISSN 2311-7257, DOI:10.29295/2311-7257-2019-95-1-233-240.

44. Біляєв М. М., Русакова Т. І. Математичне моделювання процесів переносу забруднюючих речовин в промислових зонах міста. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем*: матері ІІІ Міжнар. наук.-техн. конф., 1–3 листопада 2017 р. Дніпропетровськ: УДХТУ, 2017. С. 27–29.

45. Біляєв М. М., Русакова Т. І. Оцінка техногенного стану атмосферного повітря в містах. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2018*: тези доп. десятої міжнар. наук.-практ. конф., 27-29 березня 2018 р. Дніпро, 2018. С. 52.

46. Біляєв М. М., Русакова Т. І. Чисельне дослідження рівня забруднення повітря міста та оцінка його територіальних масштабів. *Проблеми математичного моделювання*: матер. Всеукр. наук.-метод. конф., 23-25 травня 2018 р. Кам'янське: ДДТУ, 2018. С. 22–24.

47. Біляєв М. М., Русакова Т. І. Математичне моделювання процесу нейтралізації оксиду вуглецю у вихлопних газах автотранспорту. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем*: матер. ІV Міжнар. наук.-техн. конф., 1-2 лист. 2018 р. Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2018. С. 32–35.

48. Біляєв М. М., Русакова Т. І. Інформаційна система прогнозування рівня забруднення атмосферного повітря і параметрів мікроклімату в робочих зонах. *Сучасні інформаційні і комунікаційні технології на транспорті, в*

промисловості та освіти: тези допов. XII Міжнар. наук.-практ. конф., 12-13 грудня 2018 р. Дніпро: ДНУЗТ, 2018. С. 87.

49. Букі О. О., Квітковський Ю. В. Захист населення і територій від екологічної небезпеки в залежності від розташування джерел хімічних надзвичайних ситуацій. *Науковий вісник будівництва*. 2014. № 3(77). С. 211–214.

50. Внукова Н. В., Желновач Г. М. Вибір екологічно значимих параметрів автотранспортних систем для оцінки екологічної небезпеки придорожного простору. *Екологічна безпека*. 2011. Вип. 2/2011 (12). С. 119–123.

51. Водяник А. О., Віднічук Т. В. Методи визначення концентрацій аероіонів та вмісту пилу у повітрі виробничих приміщень. *Містобудування та територіальне планування: наук.-техн. збірник*. 2013. Вип. 50. С. 77–81.

52. Водяник А. О., Бесараб О. М., Сербінова Л. А. Методи і засоби визначення аероіонного складу повітря та концентрацій пилу у виробничих умовах. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2011. Вип. 20. С. 66–70.

53. Вплив транспортних чинників на екологічний стан великих міст. В. Ф. Бабій, В. М. Худова, О. С. Кондратенко, А. М. Пономаренко. *Збірник наукових праць*. 2011. Вип. 58. С. 57–60.

54. Геніхович Е. Л. К вопросу о применимости гауссовой модели для расчета загрязнения воздуха. *Труды ГГО*. 1982. Вип. 450. С. 35–40.

55. Глива В. А. Дослідження впливу мікрокліматичних параметрів повітрообміну на аероіонний склад повітря робочих приміщень. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2011. Вип. 20. С. 58–65.

56. Глива В. А. Дослідження просторових розподілів аероіонів навколо джерел іонізації повітря у робочих приміщеннях. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2010. Вип. 19. С. 123–127.

57. Глива В. А., Клапченко В. І., Теренчук С. А., Пономаренко С. М. Моделювання динаміки аероіонного складу повітря виробничих приміщень. *Техніка будівництва*. 2009. Вип. 23. С. 114–117.

58. Глива В. А., Коваленко В. В., Тихенко О. М., Лук'яненко С. О. Розрахункові методи визначення захисних властивостей електромагнітних екранів у дальній зоні електромагнітного поля. *Системи обробки інформації*. 2016. № 7 (144). С. 55–57.

59. Глива В. А., Коваленко В. В., Тихенко О. М. Сучасні підходи до розроблення і впровадження матеріалів для екранування електромагнітних полів. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2017. Вип. 2. С. 176–178.

60. Глива В. А., Ніколаєв К. Д., Колумбет В. П., Левченко Л. О. Методологія дослідження низькочастотних електромагнітних полів в умовах сталого розвитку технологій. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2017. Вип. 6. С. 219–223.

61. Голинько В. И., Дранников Л. В., Стоецкий В. Ф. Оценка риска при авариях техногенного характера. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2014. №3. С. 117–23.

62. Голінько В. І. Основи охорони праці: підручник. 2-ге вид. Дніпропетровськ : НГУ, 2014. 271 с.

63. Головне управління статистики у Дніпропетровській області. URL: <http://www.dnprstat.gov.ua> (дата звернення: 29.12.18)

64. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища». *Відомості Верховної Ради*. 1991. № 41. ст. 546.

65. Запорожець О. І., Глива В. А., Сидоров О. В. Нормування аероіонного складу повітря робочих приміщень та основні напрями його вдосконалення. *Вісник національного авіаційного університету*. 2011. № 1. С. 139–143.

66. Запорожець О. І., Глива В. А., Сидоров О. В. Принципи моделювання динаміки аероіонного складу повітря у приміщеннях. *Вісник національного авіаційного університету*. 2011. № 2. С. 120–124.

67. Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды. Москва : Гидрометеониздат, 1984. 560 с.

68. Ковалец И. В. Численная гидродинамическая модель атмосферной дисперсии загрязнений вокруг зданий. *Сборник Института проблем математических машин и систем НАН Украины*. 2010. Вып. 1. С. 3–10.

69. Ковеня В. М., Яненко Н. Н. Метод расщепления в задачах газовой динамики. Новосибирск : Наука, 1981. 304 с.

70. Колесник И. А., Беликов А. С., Стрежекуров Э. Е. Пути повышения микроклиматических параметров в помещении при его теплодефицитном отоплении. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2009. Вып. 49. С. 44–46.

71. Концепція реформування системи управління охороною праці в Україні. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/989-2018-p/print> (дата звернення: 07.02.2019).

72. Косенков В. М. Граничные условия при математическом моделировании электромагнитного поля внутри и вне разрядной камеры высоковольтной электрогидравлической установки. *Техн. електродинаміка*. 2016. № 3. С. 25–32.

73. Кочин Н. Е. Теоретическая гидромеханика, ч.1. Москва : Гос. изд. ф.-м. литературы, 1963. 727 с.

74. Кузнецов С. Г., Назаров Г. А. Методы моделирования распределения загрязнения в городской застройке. *Проблеми архітектури і містобудування. Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури*. 2010. Вып. 2. С. 158–161.

75. Лапшин О. Є., Гурін А. О., Лапшин О. О., Радіоненко Б. М. Підвищення ефективності управління охороною праці на підприємстві у гірництві. *Гірничий вісник*. 2014. Вып. 98. С. 169–174.

76. Лапшин О. Є., Гурін А. О., Лапшин О. О. Удосконалення профілактичних заходів щодо попередження нещасних випадків і аварій на гірничих підприємствах. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. №. 3. С. 128–133.

77. Логачев И. Н., Логачев К. И. Аэродинамические основы расприрации. Санкт-Петербург: Химиздат, 2005. 659 с.
78. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газов. Москва : Наука, 1978. 735 с.
79. Майер Р. В., Романов А. А. О численном решении уравнения Пуассона при моделировании электростатических полей. *Научный альманах*. 2017. № 1-2(27). С. 138–141.
80. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. Москва : Наука, 1982. 320 с.
81. Математична модель ефективності роботи фільтра твердих частинок дизеля / Кондратенко О. М., Вамболь С. О., Строков О. П. Авраменко А. М. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2015. №6. С. 55–61.
82. Меньшиков В. В., Швыряев А. А., Захарова Т. В. Анализ риска при систематическом загрязнении атмосферного воздуха опасными химическими веществами. Москва : Из-во МГУ, 2003. 245 с.
83. Методи розрахунку концентрації повітряних забруднень на міській території: навч. посібник / Абрамовський Є. Р., Гринчишин Ю. Л., Єгоров Є. В., Загній О. А. Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2010. 223 с.
84. Методика расчета концентрации в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. Госкомгидромет. Ленинград : Гидрометео издат, 1987. 93 с.
85. Методика визначення ризиків та їх приятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки. Наказ № 637 від 04.12.2002. Міністерство праці та соціальної політики України. 25 с.
86. Методика оцінки збитків від наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру. Постанова Кабінету Міністрів України від 04.06.2003 р. № 862. Київ, 2003. 23 с.

87. Методика прогнозування наслідків виливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті. Київ, 2001. 33 с.

88. Методика розрахунку викидів забруднюючих речовин та парникових газів у повітря від транспортних засобів. Наказ №452 від 13.11.2008. *Державний комітет статистики України*. 27 с.

89. Михнюк Т. Ф. Охрана труда. Минск: ИВЦ МинФина, 2007. 358 с.

90. Мягков М. С., Алексеева Л. И. Особенности ветрового режима типовых форм городской застройки. *АМИТ 1 (26)*. 2014. С. 1–15.

91. Мунтян Л Я. Удосконалення методів оцінки екологічної безпеки при емісії небезпечних речовин на залізничному транспорті: дис. ... канд. техн. наук: 21.06.01 Дніпров. держ. техн. ун-т. Кам'янське, 2018. 145 с.

92. Нутерман Р. Б., Бакланов А. А., Старченко А. В. Моделирование аэродинамики и распространения выбросов от автотранспорта в городском подслое. *Математическое моделирование*. 2010. Т. 22, № 4. С. 3–22.

93. Особливості формування канцерогенного ризику для населення, що проживає в зоні впливу автомагістралі / Черниченко І. О., Першегуба Я. В., Литвиненко О. М., Швагер О. В. *Збірник наукових праць*. 2010. Вип. 56. С. 159–167.

94. Перспективи впровадження системи оперативного інформування населення про якість атмосферного повітря промислових міст за міжнародними стандартами / Павличенко А. В., Бучавий Ю. В., Ангурець О. В., Хазан П. В. *Збірник наукових праць національного гірничого університету*. 2019. № 57. С. 178–191.

95. Пантелят М. Г., Шульженко Н. Г. Использование векторного магнитного потенциала в конечноэлементном анализе нестационарных трехмерных электро магнитных полей в проводящих средах. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2007. №5. С. 42–47.

96. Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря: методичні рекомендації. 2007. Затв. наказом МОЗ України від 13.04.2007 р. №184.28.

97. Пляцук Л. Д., Бойко В. В. Аналіз методів математичного моделювання розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері. *Вісник КНУ ім. Михайла Остроградського*. 2010. Вип. 6. С. 1–4.

98. Прищепов О. Ф., Левицька О. С. Оцінка стану забруднення атмосферного повітря оксидом вуглецю на автомагістралях міста Миколаєва. *Наукові праці : науково-методичний журнал. Техногенна безпека*. 2008. Т. 77. Вип. 64. С. 70–74.

99. Прищепов О. Ф., Левицька О. С. Особливості розсіювання шкідливих речовин викидів автотранспорту у повітрі в умовах міста. *Наукові праці: наук.-метод. журнал. Техногенна безпека*. 2009. Т. 111. Вип. 98. С. 139–146.

100. Реттер Э. И. Архитектурно-строительная аэродинамика. Москва : Стройиздат, 1984. 294 с.

101. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. Москва: Мир, 1980. 616 с.

102. Русакова Т. И. Исследование структуры ветрового потока на улицах города. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2014. Вип. 44. С. 146–152.

103. Русакова Т. И., Беляев Н. Н. Оценка ветрового режима при обтекании зданий. *Архітектурний вісник Київського національного університету будівництва і архітектури*. 2014. Вип. 4. С. 177–186.

104. Русакова Т. И. Влияние автотранспорта на качество воздушной среды в городах. *Перспективы развития и безопасность автотранспортного комплекса*: матер. IV Междунар. научно-практ. конф., 27-29 ноября 2014 г. Новокузнецк, 2014. С. 330–333.

105. Русакова Т. И. Оценка качества воздушной среды в микрорайонах города. *Природные опасности: связь науки и практики*: матер. II Междунар. научно-практ. конф., 23-25 апреля 2015 г. Саранск, 2015. С. 374–377.

106. Русакова Т. И. Исследование закономерностей обтекания зданий воздушным потоком. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2015. Вип 49. С. 224–230.

107. Русакова Т. И., Беляев Н. Н. Численное исследование проветривания горной выработки. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Механіка*. 2015. Вип. 19, т. 23, № 5. С. 21–28.

108. Біляев М. М., Русакова Т. І. Комплексна оцінка впливу інгредієнтів викидів промислових підприємств на рівень забруднення повітря внутрішніх майданчиків. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2019. Вип. 57. С. 158–168. ISSN 2071-1859, DOI:10.33271 /srpnmu/57.158.

109. Русакова Т. І. Математичне моделювання розсіювання в атмосфері викидів підземної виробки. *Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості: тези доп. II Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених і студентів, 6-9 жовтня 2015 р. Івано-Франківськ, 2015. С. 212–213.*

110. Бреус І. В., Русакова Т. І. Дослідження техногенної ситуації за умови поширення забруднення поблизу поверхні землі. *Пожежна та техногенна безпека: наука і практика: матер. Всеукр. наук.-практ. конф. курсантів та студентів, 15-16 травня 2018 р. Черкаси, 2018. С. 149–150.*

111. Русакова Т. І. Дослідження стану мікроклімату в робочих зонах біля автомагістралей. *Сучасні проблеми енергоресурсозбереження в будівництві, містобудуванні та житлово-комунальному господарстві: матер. Всеукр. наук.-практ. конф. 6-8 грудня 2018 р. Запоріжжя, 2018. С. 193–195.*

112. Русакова Т. И. Оценка показателя загрязнения промышленных площадок. *Экология и защита окружающей среды: тезисы докладов V Междунар. научно-практ. конф., 15 мая 2019 г. Минск: БГУ, 2019. С. 11–15.*

113. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование. Москва : Физматлит, 2001. 320 с.

114. Самарский А. А. Теория разностных схем. Москва : Наука, 1983. 616 с.

115. Сидоров О. В. Дослідження впливу чинників деіонізації на концентрацію легких аероіонів у приміщеннях. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2012. № 6. С. 163–167.

116. Сидоров О. В. Методика измерения концентрации легких аэроионов на рабочем месте оператора персонального компьютера. *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности*. 2014. № 1. С. 36–41.

117. Сидоров О. В. Нормалізація аероіонного складу повітря в офісних приміщеннях: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.26.01. Київ, 2014. 20 с.

118. Совершенствование системы управления производством и охраной труда / Бунько Т. В., Шевченко В. Г., Ященко И. А., Кокоулин И. Е. *Геотехнічна механіка: міжвід. зб. наук. пр.* 2016. Вип. 127. С. 3–17.

119. Степаненко С. Н., Волошин В. Г., Типцов С. В. Решение уравнения турбулентной диффузии для стационарного точечного источника. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2008. № 3. С. 13–24.

120. Строкань О. В. Програмно-інформаційна система оптимізації мікроклімату у виробничому приміщенні. *Вісник Національного технічного університету. Харківський політехнічний інститут. Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. 2014. №. 48 (1090). С. 91–96.

121. Строкань О. В., Дубініна О. В. Розробка програмного забезпечення для аналізу розподілення концентрації від'ємних аеронів у приміщеннях з нахиленою площиною. *Вісник Національного технічного університету. Харківський політехнічний інститут. Збірник наукових праць. Серія: Інформатика та моделювання*. 2014. № 62 (1104). С. 117–122.

122. Сукач С. В., Козловська Т. Ф. Оцінювання впливу мікроклімату навчальних приміщень на розумову працездатність студентів. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2016. Вип. 31. С. 105–112.

123. Сукач С. В. Дослідження температурно-вологісного режиму приміщення під час роботи вентиляційного комплексу. *Системи обробки інформації: збірник наукових праць*. 2016. Вип. 9 (146). С. 197–202.

124. Сукач С. В., Сидоров О. В. Методологічні засади підвищення якості контролю аероіонного складу повітря виробничого середовища. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2016. Вип. 32. С. 127–133.

125. Сукач С. В., Гусев В. М., Левківський Р. М. Дослідження динаміки аероіонного складу повітря навчальних приміщень. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2016. Вип. 3 (39). С. 126–128.

126. Запорожець О. І., Сукач С. В., Галаган О. Г., Козловська Т. Ф. Визначення параметрів оптимальної комфортності у робочій зоні приміщення за показниками повітряного середовища. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2017. Вип. 1/2017 (102). С. 17–21.

127. Толкунов И. А., Попов И. И., Барбашин В. В. Исследование и разработка управляемых генераторов аэроионов для помещений оперативного управления силами и средствами МЧС Украины. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2009. №10. С. 186–194.

128. Толкунов И. А., Попов И. И., Барбашин В. В. Теоретическое исследование процессов переноса аэроионов в потоках воздуха в помещениях специального назначения МЧС Украины. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2010. №11. С. 137–145.

129. Толкунов І. О. Біполярна іонізація повітряного середовища приміщень функціональних підрозділів мобільного госпіталю МНС України. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2011. № 14. С. 161–171.

130. Толкунов І. О., Попов І. І. Вплив природних джерел аероіонізації на процеси формування полів концентрації аероіонів у повітряному середовищі приміщень. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба*. 2011. Вип. №1 (27). С. 243–246.

131. Толкунов І. О. Дослідження шляхів удосконалення аероіонного режиму робочого середовища приміщень спеціального призначення. *Наука і техніка повітряних сил, збройних сил України*. 2015. №. 1. С. 197–201.

132. Толкунов І. О. Моделювання процесів формування полів концентрації аероіонів у повітряному середовищі приміщень спеціального призначення МНС України. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2010. №12. С. 175–184.

133. Толкунов І. О. Нормалізація умов праці у приміщеннях спеціального призначення методами штучної аероіонізації. *Восточно-европейский журнал передовых технологий. Серия: Экология*. 2014. Вып. №1/10. С. 21–25.

134. Уорк К., Уорнер С. Загрязнение воздуха. Источники и контроль. Москва : Мир, 1980. 539 с.

135. Хміль Г. А. Концептуально-методичний апарат аналізу і оцінка техногенного та природного ризиків. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2007. № 5. С. 47–65.

136. Чеберячко С. І., Радчук Д. І., Чеберячко Ю. І. Теоретичні дослідження опору дихання фільтрувального респіратору на циклічному потоці повітря. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2015. № 36 (1145). С. 121–127.

137. Чеберячко С. І., Яворська О. О., Чеберячко Ю. І., Столбченко О. В. Розрахунок двоступеневих фільтрувальних систем протипилових респіраторів. *Геотехнічна механіка*. 2016. № 129. С. 256–270.

138. Чеберячко С. І., Фрундін В. Ю., Чеберячко Ю. І. Оцінка впливу конструкції клапанів вдихання на перепад тиску респіраторів. *Вісник Національного технічного університету. Харківський політехнічний інститут*. 2017. № 7 (1229). С. 119–224.

139. Черный К. А. К вопросу о методах оценки и коррекции аэроионного состава воздушной среды на рабочих местах операторов ПЭВМ. *Известия Южного Федерального университета. Технические науки*. 2010. № 9. С. 70–75.

140. Черный К. А. Методологический подход к применению коронных аэроионизаторов при проведении коррекции аэроионного состава воздуха помещений. *Инженерно-строительный журнал*. 2012. № 6. С. 48–53.

141. Черный К. А. Проблема оценки и взаимосвязи аэрозольного загрязнения и аэроионного состава воздуха рабочей зоны: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.26.01. Санкт-Петербург, 2013. 43 с.

142. Чабан В. Й., Сазанська С. В. Соціально-економічні основи охорони праці: навч. пос. Рівне: НУВГП, 2012. 224 с.

143. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. Київ : Наук. думка, 1997. 368 с.

144. Швыряев А. А., Меньшиков В. В. Оценка риска воздействия загрязнения атмосферы в исследуемом регионе. Москва : Изд-во МГУ, 2004. 124 с.

145. Шимони К. Теоретическая электротехника. Москва : Мир, 1964. 775 с.

146. Яковлев И. А. Промышленное загрязнение: невозможно изменить, невозможно контролировать. URL: [http://bellona.ru/2016/04/20/industrial pollution](http://bellona.ru/2016/04/20/industrial%20pollution) (дата звернення 22.12.18)

147. Alwetaishi M., Balabel A. Effect of Microclimates Conditions on Architectural Design of Residential Buildings in Saudi Arabia European. *Journal of Advances in Engineering and Technology*. 2016. Vol. 3. No. 8. P. 29–32.

148. Analysis of air quality data near roadways using a dispersion model / Venkatram A., Isakov V., Thoma E., Baldauf R. *Atmospheric Environment*. 2007. Vol. 41. Iss. 40. P. 9481–9497.

149. Venkatram A., Horst T. W. Approximating dispersion from a finite line source. *Atmospheric Environment*. 2006. Vol. 40. Iss. 13. P. 2401–2408.

150. Association of outdoor air pollution and indoor renovation with early childhood ear infection in China / Deng Q. et al. *Chemosphere*. 2017. Vol. 169. P. 288–296.

151. Back-Calculation of Traffic-Related PM10 Emission Factors Based on Roadside Concentration Measurements / Wang Y. et al. *Atmosphere*. 2017. No. 8. P. 99.

152. Baseline Repeated Measures from Controlled Human Exposure Studies: Associations between Ambient Air Pollution Exposure and the Systemic Inflammatory Biomarkers IL-6 and Fibrinogen Aaron / Thompson M. et al. *Environmental Health Perspectives*. 2010. Vol. 118, No 1, P. 120–124.

153. Berkowicz R. 2000a OSPM is a parameterised street pollution model. Environmental Monitoring and Assessment. *Solutions and Facts*. 2014. Vol. 65. P. 323–331.

154. Berkowicz R. 2000b. A simple model for urban background pollution. Environmental Monitoring and Assessment. *Solutions and Facts*. 2014. Vol. 65. P. 259–267.

155. Berlov O. V. Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 1. P. 48–54. DOI: 10.15802/stp2016/60953

156. Biliaiev M. M., Rostochilo N., Kharytonov M. Expert Systems for Assessing Disaster Impact on the Environment. *Improving Disaster Resilience and Mitigation – IT Means and Tools. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. Springer, Dordrecht, Chapter 10. 2014. P. 153–165.

157. Biliaiev M. M., Rusakova T. I., Kolesnik V. Ye., Pavlichenko A. V. Determination of areas of atmospheric air pollution by sulfur oxide emissions from mining and metallurgical and energy generating enterprises. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2017. №3. С. 100–106. ISSN 2071-2227 2227 (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).

158. Biliaiev M. M., Rusakova T. I. Prediction of microclimate near small architectural constructions. *Вісник Дніпровського університету. Серія: Механіка*. 2018. Вип. 22, т. 26, № 5. С. 42–50. ISSN 2312-2897.

159. Biliaiev M. M., Rusakova T. I. Determining zones of chemical pollution in the cities and assesment of chronic diseases risks. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2019. Вип. 1 (79). С. 7–16. ISSN 2307-3489, DOI:

10.15802/STP2019/159508 (Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*).

160. Biliaiev M. M., Rusakova T. I., Shunkarenko V. I. Minimization of the chemical pollution level at the working zones in open areas using screens. Наука та прогрес транспорту. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2019. Вип. 2 (80). С. 17–26. ISSN 2307-3489, DOI:10.15802/STP2019/164923 (Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*).

161. Biliaiev M. M., Rusakova T. I. The study of the protective function of vegetation near the motorway. *East European scientific journal. Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe*. 2019. No. 1(41) part I. P. 28–35.

162. Biliaiev M., Rusakova T. Mathematical modeling of diffusion emissions of thermal power. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем: матер. II Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю*, 1-3 лист. 2016 р. Дніпропетровськ: УДХТУ, 2016. С. 18–20.

163. Blocken B., Roels S., Carmeliet J. Modification of pedestrian wind comfort in the silvertop tower passages by an automatic control system. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2004. Vol. 92, No. 10. P. 849–873.

164. Blocken B., Persoon J. Pedestrian wind comfort around a large football stadium in an urban environment: CFD simulation, validation and application of the new dutch wind nuisance standard. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2009. Vol. 97, No. 5-6. P. 255–270.

165. Bosch G, Rodi W. Simulation of vortex shedding past a square cylinder with different turbulence models. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 1998. Vol. 28, No. 4. P. 601–616.

166. Bruno L., Fransos D., Giudice A. Lo. Solid barriers for windblown sand mitigation: Aerodynamic behavior and conceptual design guidelines. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*. 2018. № 173. P. 79–90.

167. Integrated environmental risk assessment and whole-process management system in chemical industry parks / Chaofeg S. et al. *International Journal of*

Environmental Research and Public Health. 2013. Vol. 10, Iss.4. P. 1609-1630. DOI:10.3390/ijerph 10041609 10.

168. Chew L., Nazarian N., Norford L. Pedestrian-Level Urban Wind Flow Enhancement with Wind Catchers. *Atmosphere*. 2017. No. 8. P. 159.

169. Chun-Ho Liu., Dennis Y., Leung C. Numerical study on the ozone formation inside street canyons using a chemistry box model. *Journal of Environmental Sciences*. 2008. Vol. 20. P. 832–837.

170. Concentration and size distribution of ultrafine particles near a major highway / Zhu Y., Hinds W. C., Kim S., Sioutas C. *Journal of the Air and Waste Management Association*. 2002. Vol. 52, No. 9. P. 1032–1042.

171. Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations – Evaluation of CFD data with experimental data / Gromke C., Buccolieri R., Sabatino S. D., Ruck B. *Atmospheric Environment*. 2008. Vol. 42, Is. 37. P. 8640–8650.

172. Drexler P., Fiala P., Bartušek K. Numerical modeling of accuracy of air ion field measurement. *Journal of Electrical Engineering*. 2006. Vol. 57, no 8/S, P. 62–65.

173. Ecological aspects of the neutralization of gas emissions leaving from the resin storehouse of joint – stock company "Zaporozhkoks". Rumiantsev V. et al. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. Vol. 4. P. 105–109.

174. Effectiveness of green infrastructure for improvement of air quality in urban street canyons / Pugh T. A. M., MacKenzie A. R., Whyatt J. D., Hewitt C. H. *Environmental science and technology*. 2012. No. 46. P. 7692–7699.

175. Efficiency of ionizers in removing airborne particles in indoor environments / Pushpawela B., Jayaratne R., Nguy A., Morawska L. *Journal of Electrostatics*. 2017. Vol. 90. P. 79–84. DOI:10.1016/j.elstat.2017.10.002.

176. Environmental assessment of the intermetallic catalysts utilization efficiency for deactivation of the pollutants emitted by electrode production enterprises / Belokon K. V., Belokon Y. A., Kozhemyakin G. B., Matukhno E. V. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytet*. 2016. Vol. 3. P. 87–94.

177. Estimating near-road pollutant dispersion: A model inter-comparison / Heist D. et al. *Owen Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2013. Vol. 25. P. 93–105.

178. Estimating the height of the nocturnal urban boundary layer for dispersion applications / Pournazeri S. et al. *Atmospheric Environment*. 2012. Vol. 54. P. 611–623.

179. Evaluation of the Danish AirGIS air pollution modeling system against measured concentrations of PM_{2.5}, PM₁₀, and black carbon / Ulla Arthur et al. *Environmental Epidemiology*. 2018. Vol. 2, Iss. 2. P. 11–23. DOI:10.1097/EE9.000000000000014

180. Evolution of particle number distribution near roadways / Zhang K. M. et al. *Part II: the «Road-to-Ambient» process. Atmospheric Environment*. 2004. Vol. 38. P. 6655–6665.

181. Experiments with Accuracy of the Air Ion Field Measurement / Fiala P., Steinbauer M., Bartusek K., Szabo Z. *Advances in Electrical and Electronic Engineering. – Czech Republik*, 2008. Vol. 7, No. 1. P. 276–279.

182. Fast simulation of 3D electromagnetic problems using potentials / Haber E., Ascher U. M., Aruliah D. A., Oldenburg D. W. *Journal of Computational Physics*. 2000. Vol. 163. No. 1. P. 150–171.

183. Filipczyk J. Some issues of road emission for passenger cars and light duty vehicles sector in the aspects of environmental protection. *Transport Problems*. 2015. Vol. 10, no. 2. P. 117–123.

184. Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases / Dominici F. et al. *JAMA*. 2006. Vol. 295. P. 1127–1134.

185. Air ion behavior in ventilated rooms / Fletcher L. A. et al. *Indoor and Built Environment*. 2008. Vol. 17. No. 2, P. 173–182.

186. Franke J., Hirsch C., Jensen A. G. Recommendations on the use of CFD in wind engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2004. Vol. 81. No. 1-3. P. 295–309.

187. Gallagher J., Gill L. W. and Nabola A. Mc. The passive control of air pollution exposure in Dublin, Ireland: A combined measurement and modelling case study. *Science of the Total Environment*. 2013. Vol. 458-460. P. 331–343.

188. Gibson M. D., Kundu S., Satish M. Dispersion model evaluation of PM_{2.5}, NO_x and SO₂ from point and major line sources in Nova Scotia, Canada using AERMOD Gaussian plume air dispersion model. *Atmospheric Pollution Research*. 2013. Vol. 4. No. 2. P. 157–167.

189. Gómez-Losada Á., Pires M. José Carlos, Pino-Mejías R. Modelling background air pollution exposure in urban environments: Implications for epidemiological research. *The Science for Environmental Modelling & Software*. 2018. Vol. 2. P. 13–21. DOI:10.1016/J.ENVSOF.2018.02.011.

190. How to Visualize the Invisible Simulating Air Pollution Dispersions in a 3D City Model / Stahre Wästberg B. et al. *13th International Conference On Computers In Urban Planning And Urban Management*. 2013.

191. Impact of roof height non-uniformity on pollutant transport between a street canyon and intersections / Nosek Š. Et al. *Environ. Pollut.* 2017. No. 227. P. 125.

192. Impact of wind direction on near-road pollutant concentrations / Venkatram A., Snyder M., Isakov V., Kimbrough S. *Atmospheric Environment*. 2013. Vol. 80, P. 248–258.

193. Impacts of traffic tidal flow on pollutant dispersion in a non-uniform urban street canyon / Tingzhen M. Et al. *Atmosphere*. 2018. No. 9. P. 1–21. DOI:10.3390/atmos9030082.

194. Improving local air quality in cities: To tree or not to tree? / Vos P. E. J., Maiheu B., Vankerkom J., Janssen S. *Environmental Pollution*. 2013. No. 183. P. 113–122.

195. Influence of urban vegetation on air pollution and noise exposure – A case study in Gothenburg Sweden / Klingberg J. et al. *Science of The Total Environment*. 2017. Vol. 599-600. P. 1728–1739. DOI:10.1016/j.scitotenv.2017.05.051 4444.

196. Janhäll S. Review on urban vegetation and particle air pollution – Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment*. 2015. No. 105. P. 130–137.
197. König M., Bush K. The Discontinuous Galerkin Time-Domain Method for Maxwell's Equations with Anisotropic Materials. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals*. 2010. P. 239–254.
198. Kuismanen K. Climate-Conscious Architecture – Design And Wind Testing Method For Climates In Change. OULU Finland, 2008. 445 p.
199. Lepore M. Urban microclimate parameters for buildings energy strategies. *Vitruvio International journal of Architecture Technology and Sustainability*. 2016. Vol. 1. No. 2. P. 1–11.
200. Grundström M., Pleijel H. Limited effect of urban tree vegetation on NO₂ and O₃ concentrations near a traffic route. *Environmental Pollution*. 2014. Vol. 189. P. 73–76. DOI:10.1016/j.envpol.2014.02.026 P2.
201. Liu Chunho, Leung Dennis Y. C. Numerical study on the ozone formation inside street canyons using a chemistry box model. *Journal of Environmental Sciences*. 2008. No. 20. P. 832–837.
202. Li B., Sherman D. J. Aerodynamics and morphodynamics of sand fences: A review. *Aeolian Research*. 2015. No. 17. P. 33–48.
203. Liu Chun-Ho, Leung Dennis Y. C. Numerical study on the ozone formation inside street canyons using a chemistry box model. *Journal of Environmental Sciences*. 2008. No. 20. P. 832–837.
204. Low-resistance dual-purpose air filter releasing negative ions and effectively capturing PM_{2.5} / Zhao X. et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2017. Vol. 9. Iss. 13. P. 12054–12063. DOI: 10.1021/acsami.7b00351.
205. Mapping leaf area of urban greenery using aerial LiDAR and ground-based measurements in Gothenburg, Sweden / Klingberg J. Et al. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2017. Vol. 26. P. 31–40.
206. MăruŃălu O., Lăzăroiu G., Bondrea D. A. Mathematical model for air pollutants dispersion emitted by fuel combustion. *U.P.B. Sci. Bull., Series D*. 2015. Vol. 77. Iss. 4. P. 229–236.

207. Measuring and modeling wet deposition fluxes in the Netherlands and Europe / Eric van der Swaluw et al. *Conf. Abstracts of 31st NATO. SPS Intern. Technical Meeting on Air Pollution Modelling and it's Application*, 27 September – 01 October, Italy. Torino. 2010. № 2.8. P. 12–32.
208. Merah A., Nouredine A. Modeling and Analysis of NO_x and O₃ in a Street Canyon. *Der Pharma Chemica*. 2017. No. 9 (19). P. 66–72.
209. Mesa F., Alzate P. P. C., Varela C. A. R. Numerical Solution of the Laplace Equation: Electrostatic Potential. *Advanced Studies in Theoretical Physics*. 2017. Vol. 11. P. 717–723.
210. Modeling the impact of roadway emissions in light wind, stable and transition conditions / Venkatram A. et al. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2013. Vol. 24. P. 110–119.
211. Modeling the impacts of traffic emissions on air toxics concentrations near roadways / Venkatram A., Isakov V., Seila R., Baldauf R. *Atmospheric Environment*. 2009. Vol. 43, Iss. 20. P. 3191–3199.
212. Mohamed S. F., Karadelis J. CFD Simulation for Wind Comfort and Safety in Urban Area: A Case Study of Coventry University Central Campus. *International Journal of Architecture, Engineering and Construction*. 2013. Vol 2, no. 2. P. 131–143.
213. Momani S., Abuasad S. Application of He's Variational Iteration Method to Helmholtz Equation. *Chaos, Solitons and Fractals*. 2005. Vol. 27. P. 1119–1123.
214. Murakami S. Overview of turbulence models applied in CWE. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1998. № 74-76. P. 1–24.
215. Nagel J. R. Solving the Generalized Poisson Equation Using the Finite-Difference Method (FDM), February 15. 2012. P. 1–18.
216. Nechausov A. S. The information model of the system for local atmospheric air pollution monitoring. *Системи обробки інформації*. 2016. Вип. 2(139). С. 190–195.

217. Numerical and experimental study on airborne disinfection by negative ions in air duct flow / Zhou P., Yang Y., Huang G., Lai A. C. K. *Building and Environment*. 2018. Vol. 127. P. 204–210. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.11.006.

218. Overman H. T. Simulation model for NO_x distribution in a street canyon with air purifying pavement. *University Twente, Netherlands*. 2009. Master thesis. P. 1–99.

219. Patankar S. V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. *CRC press: Boca Raton, FL, USA*. 1980. P. 125–126.

220. Paterson D. A., Apelt C. J. Computation of wind flows over three-dimensional buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1986. Vol. 24, no. 3. P. 193–213.

221. Reformulation of plume spread for near-surface dispersion. Venkatram A., Snyder M. G., Heist D. K., Perry S. G., Petersen W. B., Isakov V. *Atmospheric Environment*. 2013. Vol. 77. P. 846–855.

222. RLINE: A line source dispersion model for near-surface releases / Snyder M. G. Et al. *Atmospheric Environment*. 2013. Vol. 77. P. 748–756.

223. Rusakova T. I. Method for predicting parameters of the aeroionic mode in open terrain ground areas. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2019. Вип. 3 (81). С. 16–26. ISSN 2307-3489, DOI:10.15802/STP2019/170273 (Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*).

224. Rusakova T., Biliaiev M. Mathematical modeling of air pollution on the streets of city. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем: Матер. І Всеукр. наук.-техн. конф., 3-5 лист. 2015 р. Дніпропетровськ: УДХТУ*, 2015. С. 17–20.

225. Rusakova, T. Mathematical modeling of thin profile in a flow of an inviscid fluid. *Информационные технологии в металлургии и машиностроении: матер. Міжнар. наук.-техн. конф., 28-30 березня 2017 р. Дніпропетровськ: НМА*, 2017. С. 73.

226. Sadiku M. Numerical techniques in electromagnetics. *2nd edition, CRC Press*. 2000. P. 635–684.
227. Sharma J., Singh K. Partial Differential Equations for Engineers and Scientists. *2nd edition, Narosa Publishing House*. 2009. P. 346–358.
228. Shi J. P., Khan A. A., Harrison R. M. Measurements of ultrafine particle concentration and size distribution in the urban atmosphere. *The Science of the Total Environment*. 1999. Vol. 235. P. 51–64.
229. Shih T., Liou W. W., Shabbir A. A new k-e eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. *Computers and Fluids*. 1995. Vol. 24, no. 3. P. 227–238.
230. Shupranova L. V., Khlopova V. M., Kharytonov M. M. Air pollution assessment in the Dnepropetrovsk industrial megapolice of Ukraine. *Pollution Modeling and its Application XXII. NATO Science for Peace and Security Series. – C: Environmental Security*. Springer, Dordrecht. Chapter 10. 2014. P. 101–104.
231. Sidorov A. V. The technique of small air ions concentration measurement at the PC operator working place. *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности*. 2014. № 1. С. 36–41.
232. Simplified CFD Modeling of Air Pollution Reduction by Means of Greenery in Urban Canyons. Excerpt from the Proceedings of the 2016 COMSOL / Lazzari S., Perini K., Rossi di Schio E., Roccotiello E. *Conference in Munich 4*. 2016.
233. Sioutas C., Delfino R. J., Singh M. Exposure assessment for atmospheric ultrafine particles (UFP) and implications in epidemiologic research. *Environmental Health Perspectives*. 2005. Vol. 113, no. 8. P. 947–955.
234. Source influence on emission pathways and ambient PM 2.5 pollution over India (2015–2050) / Venkataraman C. et al. *Atmos. Chem. Phys.* 2018. Vol. 18. P. 8017–8039. DOI:10.5194/ACP-18-8017-2018.
235. Spatial Heterogeneity of Roadway Pollutant in Los Angeles / Wonsik C., Shishan Hu, Meilu He, Kozawa K. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default->

source/technologyresearch/TechnologyForums/near-road-mitigationmeasures/near_road_mitigation-agenda-presentations.pdf (Last accessed: 16.12.18)

236. Srivastava A., Padma B., Rao S. Urban Air Pollution Modeling. *Air Quality – Models and Applications*. 2011. No. 6. P. 15–34.

237. Stathopoulos T. Pedestrian level winds and outdoor human comfort. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2006. Vol. 9, no. 11. P. 769–780.

238. Study of ultrafine particles near a major highway with heavy-duty diesel traffic / Zhu Y. et al. *Atmospheric Environment*. 2002. Vol. 36. P. 4323–4335.

239. Sweilam N., Khader M. Convergence of Variational Iteration Method Applied to Non-Linear Coupled System of Partial Differential Equations. *Int. J. of Computer Math*. 2010. Vol. 87(s). P. 1120–1130.

240. Sweilam N., Khader M. Variational Iteration Method for One-Dimensional Non-Linear Thermo-Elasticity. *Solitons and Fractals*. 2007. Vol. 32. P. 145–149.

241. Taflove A. Computational Electromagnetics: The Finite-Difference Time-Domain Method. *Artech House*, Boston. 1995. P. 149–161.

242. Thakur K., Sanyal A. J. Urban Microclimate and Thermal Comfort in Buildings. *Challenges and Issues ARCHITECTURE – Time Space & People*. 2014. Vol. 3. No. 6. P. 24–29.

243. The impact of the air distribution method in ventilated rooms on the aerosol particle dispersion and removal: The experimental approach / Jurelionis A. et al. *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 86. P. 305–313. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.10.014.

244. Thepanondh S., Toruksa W. Proximity analysis of air pollution exposure and its potential risk. *Journal of Environmental Monitoring*. 2011. Iss. 5. P. 1264–1270. DOI:10.1039/C0EM00486C.

245. Use of gaussian mathematical model in the distribution of sulphur dioxide into the atmosphere from point source / Jaćimovski S., Miladinović S., Radovanović R., Ilijazi V. *Tehnički vjesnik* 24. Suppl. 1. 2017. P. 157–162.

246. Using a dispersion model to estimate emission rates of particulate matter from paved roads / Venkatram A. et al. *Atmospheric Environment*. Vol. 33, Iss. 7. 1999. P. 1093–1102.
247. Ventilation Processes in a Three-Dimensional Street Canyon / Nosek Š. et al. *Bound.-Layer Meteorol.* 2016. No. 159. P. 1–26.
248. Wu H., Kriksic F. Designing for pedestrian comfort in response to local climate. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2012. P. 104–106, 394–407.
249. Y Qu, Millez M, Musson-Genon L. Development of building resolving atmospheric CFD code taking into account atmospheric radiation in complex geometric. *Air Pollution Modeling and it's Application, NATO SPS Series. – C. : Environmental Security*. 2010. P. 1–5.
250. Yoshie R., Mochida A., Tominaga Y. Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the architectural institute of Japan. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2007. Vol. 95. No. 9-11. P. 1551–1578.
251. Zhong J., Cai X., Bloss W. Modelling the dispersion and transport of reactive pollutants in a deep urban street canyon. *Environmental Pollution*. 2015. Vol. 200. P. 42–52.
252. Wagner K., Collins G. Final report east hertfordshire council. *Engineering*. 2005. P. 134–178.

Наукове видання

Біляєв Микола Миколайович
Русакова Тетяна Іванівна
Берлов Олександр Вікторович

МІНІМІЗАЦІЯ РІВНЯ ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ
АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ НА ВІДКРИТІЙ МІСЦЕВОСТІ
Монографія

Матеріал друкується в авторській редакції

Підписано до друку 24.03.2021. Формат 60x80/16. Папір офсетний.
Умовн. друк. арк. 9,3. Обл-від. арк. 8,4
Тираж 300 пр. Зам № 504

Видавництво
“Журфонд”
49000, Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60.
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
ДК №684 від 21.11.2001 р.

Відруковано в ПП Вахмістров О.Є
Адреса видавництва та друкарні:
49000, м. Дніпро, вул.
Писаржевського, 18.

М. М. Біляєв, Т. І. Русакова, О. В. Берлов

М79 Мінімізація рівня хімічного забруднення атмосферного повітря на відкритій місцевості. Дніпро: Журфонд, 2021. 198 с.

ISBN 978-966-934-301-7

В монографії розглянуті важливі науково-прикладні методи і засоби управління та контролю шкідливими виробничими чинниками, що виявляються під час виробництва у процесі трудової діяльності людини. Сукупність цих методів і засобів можна використовувати при атестації робочих місць за умовами праці та паспортизації підприємств, що мають шкідливі виробничі чинники внутрішнього та зовнішнього походження та можуть погіршити умови праці на відкритій місцевості; при аналізі або прогнозуванні стану безпеки об'єкта для вироблення управлінських рішень та вибору форм організаційно-розпорядчих дій. Для використання в навчальному процесі вищих навчальних закладів при підготовці фахівців за спеціальністю 183 «Технології захисту навколишнього середовища», 263 «Цивільна безпека», 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

УДК УДК 638.345:[502.3:658.5]