

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

РУСАКОВА ТЕТЯНА ІВАНІВНА

УДК 658.345:[502.3:658.5(043.5)]

ДИСЕРТАЦІЯ

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ТА ПРАКТИЧНОЇ ОЦІНКИ
ШКІДЛИВИХ ФАКТОРІВ В РОБОЧИХ ЗОНАХ
НА ТЕРИТОРІЇ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ**

05.26.01 – охорона праці
19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 Т. І. Русакова
(підпс, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий консультант: Біляєв Микола Миколайович, доктор технічних наук,
професор

Дніпро – 2019

АНОТАЦІЯ

Русакова Т. І. Розвиток наукових основ та практичної оцінки шкідливих факторів в робочих зонах на території промислових підприємств. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.26.01 – охорона праці (19 – Архітектура та будівництво). – Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Міністерства освіти і науки України, Дніпро, 2019.

Дисертація присвячена науково-теоретичному обґрунтуванню та розробці методичних основ для оцінки параметрів повітряного середовища та забезпечення допустимих умов праці на робочих місцях промислових майданчиків та при проектуванні робочих місць на відкритій місцевості промислових регіонів.

Такого типу робочі місця знаходяться під впливом комплексу факторів, а саме, швидкості руху повітряного потоку, турбулентної дифузії, наявності різних перешкод, джерел емісії різного виду та типу. Прогнозування параметрів мікроклімату в даних робочих зонах виявляється особливо складною задачею, оскільки присутність такого комплексу факторів суттєво ускладнює розроблення методів прогнозу параметрів повітряного середовища в робочих зонах промислових майданчиків та на відкритій місцевості промислових регіонів. Тому існує необхідність в розробці методів прогнозу, які б комплексно враховували перелічені фактори, а також дозволяли оперативно аналізувати умови праці на цих робочих місцях та виконувати оцінку ризику хронічної інтоксикації працівників.

Також потрібна розробка технологій для зниження рівня забруднення повітряного середовища та забезпечення допустимих умов праці на робочих місцях, що знаходяться в зоні впливу викидів автотранспорту.

Поряд з вищевказаним існує необхідність в розробці методів для оцінки напруженості електричного поля в робочих зонах промислових майданчиків та на відкритій місцевості, особливо в перспективі збільшення кількості електромобілів.

В роботі проаналізовано газовий склад повітряного середовища в робочих зонах на промислових майданчиках та на відкритій місцевості. Показано, що склад викидів залежить від галузі промисловості. Зроблено аналіз шкідливих речовин, що потрапляють у повітря під час роботи різних видів промисловості. Проведено аналіз зміни викидів підприємств різних сфер діяльності у місті Дніпро, які є активними джерелами забруднення атмосферного повітря. Доведено, що працівники в робочих зонах на промислових майданчиків та на відкритій місцевості в околі промислових підприємств потрапляють під довготривалий вплив викидів цих джерел емісії. Також показано, що високі темпи зростання чисельності автомобілів, їх просторова розосередженість, більш висока токсичність викидів в порівнянні з викидами стаціонарних джерел, низьке розташування призводять до того, що відпрацьовані гази автомобілів накопичуються в зоні дихання людей і повільніше розсіюються вітром у порівнянні з промисловими викидами. Доведено, що працівники даних робочих місць одночасно потрапляють під вплив шкідливих викидів підприємств і автотранспорту.

Проаналізовано методи оцінки ризику захворювань працівників в робочих зонах промислових майданчиків та на відкритій місцевості, оскільки питання ризику є одним з основних питань в охороні праці. Показано підвищений ризик розвитку хронічних захворювань та виникнення несприятливих наслідків для людей даної категорії.

Показано, що для вирішення практичних завдань по оцінці параметрів комфортності повітряного середовища в робочих зонах використовуються фізичні, аналітичні та чисельні методи. Показано їх переваги та недоліки. Доведено необхідність розробки таких математичних методів прогнозу

параметрів повітряного середовища, які б задовольняли вимогам: широким можливостям практичного застосування, невеликій базі вихідних даних, швидкості розрахунку, зручності в обробці і трактуванні кількісних результатів.

На основі проведеного вищевказаного аналізу в роботі розроблено метод чисельного розрахунку концентрації домішки в робочих зонах на відкритій місцевості, 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.

Проведено дослідження розробленого методу на основі оцінки показника забруднення в робочих зонах промислових майданчиків та на прилеглий території на різних відстанях від промислових підприємств та автомагістралі, що дозволяє враховувати специфіку хімічних перетворень забруднюючих речовин в повітрі.

В роботі набув подальшого розвитку метод оцінки рівня хімічного забруднення повітряного середовища в робочих зон на промислових майданчиках, який дозволяє врахувати хімічну трансформацію забруднюючих речовин на базі тривимірного розрахунку полів концентрації домішки. В форматі створеної методології удосконалено метод оцінки ризику хронічної інтоксикації працівників, робочі зони яких розміщуються на промислових майданчиках та на відкритій місцевості в околі промислових підприємств.

Науково-теоретична цінність роботи полягає в тому, що вперше розроблено чисельно-аналітичний метод, який дозволяє проводити дослідження по ефективності застосування екранів на промислових майданчиках біля автомагістралей, які використовуються для зменшення рівня забруднення повітря в робочих зонах.

На основі проведених експериментальних 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 прогнозу локальних зон забруднення з урахуванням процесу сорбції рослинністю, що знаходиться поблизу джерела емісії. В наслідок цього одержав подальший розвиток метод оцінки рівня хімічного забруднення повітря в робочих зонах на промислових майданчиках з урахуванням впливу рослинності на формування зон забруднення.

В роботі розв'язана задача мінімізації рівня хімічного забруднення в робочих зонах на промислових майданчиках та відкритій місцевості за допомогою усмоктувачів. На основі проведених експериментальних досліджень виявлено основні закономірності поведінки повітряного потоку в робочій зоні в залежності від геометрії усмоктувача, а саме за рахунок застосування не одного, а двох отворів відбору газів. Встановлено, що при наявності горизонтальних та вертикальних пластин на отворах зменшується рівень забруднення в робочій зоні. Оскільки вертикальний екран затримує забруднення, а верхня більш видовжена пластина спрямовує його в зону розташування отворів. Тим самим підтверджується об'єктивність застосування другого отвору. У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень удосконалено технологію зниження хімічного забруднення в робочих зонах за рахунок використання дворівневих усмоктувачів та спеціальних напрямних пластин. Внаслідок цих досліджень вперше розроблено метод оцінки ефективності використання дворівневих усмоктувачів, які використовуються для зниження рівня хімічного забруднення повітря в робочих зонах на промислових майданчиках.

В роботі розв'язана задача про моделювання процесу нейтралізації угарного газу, що потрапляє від автотранспорту до робочих зон промислових майданчиків. Проведено числові дослідження процесу зменшення концентрації

оксиду вуглецю за рахунок його нейтралізації водяною парою з урахуванням форми камери, розташування форсунок подачі водяної пари, потужності джерел емісії та їх місця знаходження. На базі проведених обчислювальних експериментів виявлено наявність «застійних» зон в камерах проведення реакцій та запропоновано заходи щодо їх ліквідації, а саме розташування додаткових форсунок подачі водяної пари знизу ємкості. В наслідок цього набув подальшого розвитку метод розрахунку процесу нейтралізації угарного газу в спеціальній камері, що використовується з метою зменшення рівня хімічного забруднення в робочих зонах.

Сформульована та розв'язана задача прогнозування параметрів мікроклімату в робочих зонах на промислових майданчиках та на відкритій місцевості при використанні процесу зволоження. Проведено експериментальні та чисельні дослідження, що підтвердили достовірність розробленого методу прогнозу. В наслідок цього вперше розроблено комплексний метод оцінки параметрів повітряного середовища в робочих зонах на відкритій місцевості промислових майданчиків, який дозволяє прогнозувати вітровий режим, вологість та температуру в робочих зонах за наявності використання штучного зволожувача повітря.

Набув подальшого розвитку метод оцінки аероіонного режиму в робочих зонах на промислових майданчиках, який дозволяє при розрахунку враховувати взаємодію аероіонів різної полярності, наявність перешкод в робочих зонах, нерівномірність поля швидкості повітряного потоку та турбулентну дифузію. Запропонований метод прогнозу аероіонного режиму в робочих зонах базується на тривимірному моделюванні розповсюдження негативних, позитивних ієроіонів та пилу під дією вітру та дифузії. Особливістю запропонованого методу є можливість прогнозу аероіонного режиму з урахуванням практично всіх фізичних факторів, що суттєво впливають на формування концентраційних полів аероіонів в робочих зонах на промисловому майданчику. Набув подальшого розвитку метод оцінки напруженості електричного поля в робочих зонах, який дозволяє

враховувати вплив перешкод різної геометричної форми на формування електричних полів. Враховано, що даний метод дозволяє визначати інтенсивність напруженості електричного поля від декількох джерел на промисловому майданчику, що дає можливість прогнозувати рівень електричного поля при збільшенні кількості електромобілів на території підприємства. Особливістю запропонованого методу чисельного розрахунку є швидкість проведення обчислень, що дозволяє використовувати розроблене програмне забезпечення для проведення великої кількості розрахунків при розв'язанні комплексу задач, пов'язаних із забезпеченням нормативних параметрів повітряного середовища в робочих зонах, що розташовані на відкритій місцевості поблизу транспортної магістралі на території підприємства.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблені методи оцінки параметрів мікроклімату в робочих зонах реалізовані у вигляді комп'ютерних програм. Це дозволяє методом обчислювального експерименту оперативно розраховувати параметри повітряного середовища в робочих зонах на відкритій місцевості з комплексним урахуванням таких факторів, які раніше не приймалися до уваги: нерівномірного поля швидкості повітряного потоку, турбулентної дифузії, наявності екранів, різного роду перешкод, джерел зволоження, джерел емісії аероіонів різної полярності.

Розроблені методи можуть бути використані для покращення параметрів мікроклімату в робочих зонах за рахунок раціонального вибору положення, розмірів екранів, усмоктувачів, рослинності, іонізаторів.

Розроблені методи оцінки параметрів мікроклімату в робочих зонах на промислових майданчиках та на відкритій місцевості дозволяють зменшити кількість коштовних лабораторних або натурних експериментів при проведенні досліджень в області охорони праці.

Результати досліджень реалізовано в практику діяльності компанії «РИН». Модулі програмного комплексу було застосовано для оцінки

параметрів повітряного середовища в робочих зонах при аналізі використання площадок машино-транспортного парку та їх реконструкції. Розроблені математичні методи та пакети програм було впроваджено для прогнозу рівня хімічного забруднення на території ТОВ «Енергосервіс-КР» при плануванні та реінжинірингу робочих зон на відкритій місцевості підприємства. Було отримано прогнозні дані відносно аероіонного режиму, які не можливо отримати на базі існуючих методів прогнозу. Результати дисертаційного дослідження, а саме розроблені методи прогнозу рівня електромагнітного випромінювання та програми чисельного розрахунку використовуються в службі охорони праці АТ ДТЕК Дніпровські електромережі. Вони дозволяють шляхом обчислювального експерименту розраховувати інтенсивність напруженості електричного поля з урахуванням необхідної кількості джерел електричного поля. При обслуговуванні чергово-ремонтним персоналом силового обладнання, яке знаходиться під напругою 150 кВ, можливо спрогнозувати рівень електромагнітного поля та оцінити його величину в порівнянні з гранично допустим значенням. Наукові розробки впроваджено в товаристві з обмеженою відповідальністю «ЛУГОВСЬКЕ» у вигляді рекомендацій щодо покращення якості повітря в робочих зонах на відкритих майданчиках під час обслуговування автомобільної техніки. Матеріали дисертаційної роботи, алгоритми та пакети програм використовуються при підготовці студентів, які навчаються за спеціальністю «Будівництво та цивільна інженерія» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. А саме при проведенні лекційних та практичних занять з дисциплін «Охорона природного середовища від забруднення промисловими підприємствами», «Прогнозування та ліквідація аварійних ситуацій», що дозволило підвищити ефективність навчального процесу та якість викладання матеріалу при вивченні вказаних дисциплін.

При проведенні досліджень використовувались методи натурного та лабораторного вимірювання, а також чисельні та чисельно-аналітичні методи

модельовання полів концентрації забруднюючої речовини та електричного напруження в робочих зонах. Результати експериментальних досліджень порівнювалися з чисельними результатами, отриманими за розробленими методами. Виконувалась практична перевірка розроблених алгоритмів, методів, моделей та технологій в процесі впровадження результатів дослідження.

Ключові слова: промисловий майданчик, чисельний та аналітичний методи, ризик хронічної інтоксикації, вплив рослинності, напруженість електричного поля, аероіонний режим, параметри мікроклімату, хімічне забруднення повітря.

SUMMARY

Rusakova T. I. Development of scientific bases and practical estimation of harmful factors in working areas on the territory of industrial enterprises. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.26.01 – Labor protection (19 – Architecture and Civil Engineering). – Dnipropetrovsk National University of Railway Transport Named After Academician V. Lazaryan. – State higher educational establishment «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture» of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2019.

The dissertation is devoted to the scientific and theoretical development of methodical bases for evaluation of microclimate parameters and provision of permissible working conditions in the workplaces on industrial sites and in the design of workplaces in open areas of industrial regions.

Such type of workplaces are influenced by a set of factors, namely, the velocity of air flow, turbulent diffusion, the presence of various obstacles, sources of emissions of different types. Forecasting the microclimate parameters in these working areas is particularly challenging, since the presence of such a complex of factors significantly impedes the development of methods for forecasting the

parameters of the microclimate in the working areas of industrial sites and in open areas of industrial regions. Therefore, there is a need for the development of methods for forecasting microclimate parameters, which would take into account the listed factors in a comprehensive manner, as well as to allow the operative analysis of working conditions at these workplaces and to carry out an assessment of the risk of chronic intoxication.

It is also necessary to develop technologies for reducing the level of air pollution and to ensure acceptable working conditions in the workplaces located in the area influenced by emissions of vehicles.

Along with the above, there is a need to develop methods for assessing the intensity of the electric field in the working areas of industrial sites and in the open air, especially in the future increasing in the number of electric vehicles.

The paper analyzes the gas composition of the air environment in the working areas at industrial sites and in the open air. It has been shown that the composition of emissions and changes in air pollutants depend on the industry. The analysis of harmful substances entering the air during the work of various types of industry is made.

The analysis of the enterprises of Dnipro that are divided in the scope of activity and are active sources of pollution of atmospheric air. It has been proved that workers on industrial sites and in the open air in the vicinity of industrial enterprises are exposed to the long-term impact of emissions from these sources of emissions. It has also been shown that high growth rates of cars, their spatial dispersion, higher emissions toxicity compared with stationary source emissions, low location lead to the fact that exhaust gases are accumulated in the breathing zone of people and more slowly dissipated by the wind compared with industrial emissions. It is proved that employees of these jobs simultaneously fall under the influence of harmful emissions of enterprises and vehicles.

The methods for assessing the risk of diseases in the working areas of industrial sites and in the open air are analyzed, since risk issues are one of the main issues in the Occupational safety. The increased risk of diseases and the

occurrence of adverse effects for people in this category are shown.

It is shown that for solving practical problems on the estimation of the parameters of comfort of a microclimate in working zones physical, analytical and numerical methods are used. Their advantages and disadvantages are shown. The necessity of developing such mathematical methods for predicting microclimate parameters that meet the requirements is proved: convenience of practical application, small bases of initial data, calculation speed and convenience in processing and treatment of quantitative results.

On the basis of the above analysis in the work, the method of numerical calculation of impurity concentration in working areas in open areas is developed, which allows to calculate separately as for permanently operating point source of pollution or for a linearly distributed source of pollution, and taking into account their mutual influence and chemical transformation.

The research of the developed method on the basis of estimation of the pollution index in the working areas of industrial sites and adjoining territory at different distances from industrial enterprises and highway is carried out, which allows taking into account the specifics of chemical transformations of pollutants in the air.

The method of assessing the level of chemical pollution of the air environment in the working areas at industrial sites has been further developed, which allows taking into account the chemical transformation of pollutants on the basis of the three-dimensional calculation of the impurity concentration fields.

In the format of the developed methodology, the method of assessing the risk of chronic intoxication of workers, whose working areas are located on industrial sites and in open areas in the vicinity of industrial enterprises, has been improved. The scientific and theoretical value of the work is that for the first time a numerical-analytical method was developed, which allows conducting research on the efficiency of the use of screens at industrial platforms near highways used to reduce the level of air pollution in the working areas.

On the basis of conducted experimental studies, patterns of contamination penetration through vegetation for different height of location of the source of pollutant emissions were revealed. The results of precipitation of dust pollution near vegetation are analyzed. Laboratory method has found that the use of a porous plate allows simulation of pollution zones similar to those in the presence of vegetation. The numerical method for forecasting of local pollution zones is developed, taking into account the process of sorption by vegetation located near the source of emissions. As a result, the method of assessing the level of chemical pollution in working areas at industrial sites has been further developed, taking into account the influence of vegetation on the formation of pollution zones.

The task of minimizing the level of chemical contamination in working areas on industrial platforms and open areas with the help of suction devices is solved in this work. On the basis of experimental researches, the basic regularities of the behavior of air flow in the working zone, depending on the geometry of the suction cup, namely, due to the application of not one, but two openings of gas sampling, were revealed. It is established that in the presence of horizontal and vertical plates on the holes, the level of pollution in the working zone decreases. Since the vertical screen holds off the contamination, and the upper, longer elongated plate directs it to the zone of rotation of the holes. Thus, the objectivity of the use of the second hole is confirmed. As a result of theoretical and experimental research, technology for reducing chemical pollution in working areas has been improved due to the use of two-level suction and special guide plates. As a result, the method for assessing the effectiveness of two-level suction units used to reduce the level of chemical pollution in working areas at industrial sites was first developed.

The problem of modeling the carbon monoxide neutralization process, coming from motor transport to the working areas of industrial platforms, is solved in this work. Numerical studies of the process of reducing the concentration of carbon monoxide due to its neutralization with water vapor taking into account the shape of the chamber, the location of water vapor supply nozzles, the power of emission sources and their location. On the basis of computational experiments,

the presence of "stagnant" zones in the reaction chambers was discovered, and measures were taken to eliminate them, namely the location of additional water vapor inlets from the bottom of the tank. As a result, the method of calculating the carbon monoxide neutralization process in a special chamber, which is used to reduce the level of chemical pollution in the working areas, has been further developed.

The task of microclimate parameters forecasting in working areas on industrial sites and in outdoor areas with the use of humidification is formulated. Experimental and numerical studies were carried out, which confirmed the reliability of the developed forecast method. As a consequence, for the first time, a comprehensive method for evaluating the microclimate parameters in working areas in outdoor areas of industrial platforms has been developed for the first time, which allows predicting the wind regime, humidity and temperature in the working zones if the use of artificial humidifier is used.

The method for assessing the aerionic regime in the working areas at industrial sites has been further developed, which allows to take into account the interaction of aeroions of different polarity, the presence of obstacles in the working areas, the unevenness of the field of air velocity and turbulent diffusion. The proposed method for forecasting aerial mode in working areas is based on three-dimensional modeling of the distribution of negative, positive ion and dust under the influence of wind and diffusion. A feature of the proposed method is the possibility of forecasting the aerionic regime, taking into account almost all physical factors, which significantly affect the formation of concentration fields of aeroions in the working areas on the industrial site.

The method of estimating the intensity of the electric field in working areas has been further developed, which allows taking into account the effect of interferences of different geometric forms on the formation of electric fields.

It is taken into account that this method allows to determine the intensity of the electric field strength from several sources at the industrial site, which makes it possible to predict the level of the electric field with the increase in the number

of electric vehicles in the enterprise. The peculiarity of the proposed numerical calculation method is the speed of computing, which allows using the developed software for a large number of calculations when solving a set of tasks related to ensuring the normal conditions of the microclimate in the working areas located in the open area near the transport highway in the territory enterprises.

The practical significance of the obtained results is that the developed methods for evaluating microclimate parameters in working areas are implemented in the form of computer programs. This allows the method of computational experiment to calculate quickly the parameters of the microclimate in the working areas in the open area with a comprehensive consideration of factors that were previously not taken into account: uneven field of air flow velocity, turbulent diffusion, the presence of screens, various kinds of obstacles, sources of humidification, sources of aeroion emissions different polarity.

The developed methods can be used to improve the microclimate parameters in the working areas due to the rational choice of position, screen sizes, absorbents, vegetation, ionizers.

The developed methods for evaluating the microclimate parameters in the work areas at industrial sites and in the open areas allow to reduce the amount of valuable laboratory or field experiments in conducting research in the field of labor protection.

The research results are realized in the practice of the company "RIN". Modules of the software complex were applied to assess the parameters of the microclimate in the working areas when analyzing the use of the areas of the car transport park and their reconstruction. The developed mathematical methods and software packs were introduced to predict the level of chemical pollution in the territory of LTD "Energoservis-KP" in planning and reengineering working places in the open areas of the enterprise. Projections were obtained for the aerionic regime, which can not be obtained based on existing prognostic methods. The results of the doctoral thesis, namely the developed methods for predicting the level of electromagnetic radiation and the numerical calculation program, are used

in the labor protection service of DTEK Dnipro electricity networks. They allow, by means of a computational experiment, to calculate the electric field intensity, taking into account the required number of electric field sources. When servicing power equipment at a voltage of 150 kV, it is possible to predict the level of an electromagnetic field and estimate its value in comparison with the maximum allowable value. The results of the doctoral thesis were introduced in the agricultural company with limited liability "LUGOVSKA" in the form of recommendations for improving the air quality in working zones on open areas. The dissertation materials, algorithms and software packages are used in the preparation of students studying in the specialty "Industrial and Civil Construction" of Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. Namely, during lectures and practical classes on subjects "Environmental protection from pollution by industrial enterprises", "Forecasting and elimination of emergencies", which allowed to increase the efficiency of the educational process and the quality of teaching material in the study of these disciplines.

In conducting researches, methods of natural and laboratory measurement, as well as numerical and numerical-analytical methods for modeling the fields of concentration of pollutants and electrical stress in working areas were used. The results of experimental studies were compared with the numerical results obtained by the developed methods. Practical testing of developed algorithms, methods, models and technologies was carried out in the process of survey implementation of research results.

Key words: industrial site, numerical-analytical method, risk of chronic intoxication, vegetation influence, electric field strength, aerionic mode, microclimate parameters, chemical pollution of air.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Статті в наукових фахових виданнях України

1. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Исследование техногенного влияния на окружающую среду газовых выбросов Приднепровской ТЭС. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Механіка*. 2016. Вип. 20, т. 24, № 5. С. 53–60. ISSN 2312-2897.
2. Беляев Н. Н., Русакова Т. И., Колесник В. Е., Павличенко А. В. Прогноз уровня загрязнения атмосферного воздуха в зоне влияния городских автомагистралей. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2016. №1. С. 90–97. ISSN 2071-2227 (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).
3. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Информационная система оценки уровня загрязнения воздушной среды выбросами горно-обогатительного комбината. *Геотехнічна механіка: Міжвідомчий збірник наукових праць*. 2017. Вип. 135. С. 149–159. ISSN 1607-4556.
4. 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.
5. 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.
6. Беляев Н. Н., Русакова Т. И., Якубовська З. Н. Численное моделирование процессов массопереноса при нейтрализации сточных вод. *Науковий вісник будівництва*. 2017. Т. 87, №1. С. 159–165. ISSN 2311-7257.
7. Біляєв 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.

8. 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).

9. 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.

10. Біляєв 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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).

14. 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.

15. 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*).

16. 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.

17. 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.

18. Біляєв 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/crpnmu/57.158.

19. 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.

20. 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*).

21. 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*).

22. 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*).

Стаття у зарубіжному науковому періодичному виданні:

23. Biliaiev N. N., 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 1. P. 28–35.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

24. 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 : Филиал КузГТУ, 2014. С. 330–333.

25. 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 : изд-во Мордов. ун-та, 2015. С. 374–377.

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. Русакова Т. И. Математичне моделювання розсіювання в атмосфері викидів підземної виробки. *Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості*: матер. II Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених і студентів, 6-9 жовтня 2015 р. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2015. С. 212–213.

28. Rusakova T., Biliaiev M. Mathematical modeling of air pollution on the streets of city. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем*:

Матер. I Всеукр. наук.-техн. конф., 3-5 листопада 2015 р. Дніпропетровськ: УДХТУ, 2015. С. 17–20.

29. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Оценка уровня экологической безопасности атмосферного воздуха при чрезвычайных ситуациях. *Экология и защита окружающей среды*: Сб. тезисов докл. III Междунар. научно-практ. конф., 19 мая 2016 г. Минск: БГУ, 2016. С. 231–235.

30. 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.

31. Biliaiev M., Rusakova T. Mathematical modeling of diffusion emissions of thermal power. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем*: матер. II Всеукр. науково-техні. конф. з міжнар. участю, 1-3 листопада 2016 р. Дніпропетровськ: УДХТУ, 2016. С. 18–20.

32. 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 докладов X Междунар. научно-практ. конф., 14-15 декабря 2016 г. Днепропетровск: ДНУЖТ, 2016. С. 91–92.

33. Rusakova T. Mathematical modeling of thin profile in a flow of an inviscid fluid. *Информационные технологии в металлургии и машиностроении*: матер. Междунар. науково-техн. конф., 28-30 марта 2017 г. Дніпропетровськ: НМА, 2017. С. 73.

34. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Моделирование нейтрализации сточных вод. *Неделя эколога – 2017*: докл. Междунар. научн. симп-ма, 10-13 апреля 2017 г. Каменское: ДГТУ, 2017. С. 47–48.

35. Біляєв М. М., Русакова Т. І. Математичне моделювання процесів переносу забруднюючих речовин в промислових зонах міста. *Комп'ютерне*

модельовання та оптимізація складних систем: матер. III Міжнар. науково-техн. конф., 1-3 листопада 2017 р. Дніпропетровськ: УДХТУ, 2017. С. 27–29.

36. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Прогнозирование экологического состояния атмосферного воздуха в зоне промышленных предприятий. *Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств*: тези допов. VI Міждунар. наук.-практ. конф., 29-30 листопада 2017 р. Дніпро: ДНУЗТ, 2017. С. 19–20.

37. 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.

38. Біляєв М. М., Русакова Т. І. Оцінка техногенного стану атмосферного повітря в містах. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2018*: тези допов. десятої Міжнар. наук.-практ. конф., 27-29 березня 2018 р. Дніпро: НМетАУ, 2018. С. 52.

39. 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., 15-16 травня 2018 р. Черкаси: НУЦЗУ, 2018. С. 149–150.

40. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Метод прогнозирования экологически безопасного состояния атмосферного воздуха выбросами приземных источников загрязнения. *Экология и защита окружающей среды*: тезисы докладов IV Междунар. научно-практ. конф., 16-17 мая 2018 г. Минск: БГУ, 2018. С. 140–144.

41. Біляєв М. М., Русакова Т. І. Чисельне дослідження рівня забруднення повітря міста та оцінка його територіальних масштабів. *Проблеми математичного модельовання*: матер. Всеукр. наук.-метод. конф., 23-25 травня 2018 р. Кам'янське: ДДТУ, 2018. С. 22–24.

42. Біляєв М. М., Русакова Т. І. Математичне моделювання процесу нейтралізації оксиду вуглецю у вихлопних газах автотранспорту. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем*: матер. IV Міжнар. наук.-техн. конф., 1-2 листопада 2018 р. Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2018. С. 32–35.

43. 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: ЗНТУ, 2018. С. 193–195.

44. 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 освіті*: тези допов. XII Міжнар. наук.-практ. конф., 12-13 грудня 2018 р. Дніпро: ДНУЗТ, 2018. С. 87.

45. Берлов О. В., Калашніков І. В., Кіріченко П. С., Козачина В. А., Русакова Т. І. Прогнозування рівня забруднення атмосфери на базі чисельної моделі. *Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference «International Trends in Science and Technology»*, 30 April 2019, Warsaw, Poland, 2019. P. 41–44.

46. Русакова Т. И. Оценка показателя загрязнения промышленных площадок. *Экология и защита окружающей среды*: тезисы докл. Междунар. научно-практ. конф., 15 мая 2019 г. Минск: БГУ, 2019. С. 11–15.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

47. Русакова Т. И. Исследование структуры ветрового потока на улицах города. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2014. Вип. 44. С. 146–152.

48. Русакова Т. И., Беляев Н.Н. Оценка ветрового режима при обтекании зданий. *Архітектурний вісник Київського національного університету будівництва і архітектури*. 2014. Вып. 4. С. 177–186.

49. Бе́ляев Н. Н., Ру́сакова Т. И. Математическое моделирование процесса вентиляции тупиковой подземной выработки. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2015. Вип. 47. С. 35–41.

50. Ру́сакова Т. И. Исследование закономерностей обтекания зданий воздушным потоком. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2015. Вип. 49. С. 224–230.

51. Ру́сакова Т. И., Бе́ляев Н. Н. Численное исследование проветривания горной выработки. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Механіка*. 2015. Вип. 19, т. 23, № 5. С. 21–28.

52. Бі́ляєв М. М., Ру́сакова 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.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	27
ВСТУП	28
РОЗДІЛ 1 АКТУАЛІЗАЦІЯ РОЗВИТКУ НАУКОВИХ ОСНОВ ТА ПРАКТИЧНОЇ ОЦІНКИ ШКІДЛИВИХ ФАКТОРІВ В РОБОЧИХ ЗОНАХ НА ТЕРИТОРІЇ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ	37
1.1 Аналіз нормативно-правових основ охорони праці та необхідність розробки методів оцінювання ризиків хронічних захворювань у робітників на відкритих майданчиках промислових підприємств	39
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	41
1.3 Сучасні методи оцінювання вітрового режиму в робочих зонах та методи зменшення забруднення повітря	69
1.4 Іонізація повітря в робочих зонах	77
1.5 Природні і штучні джерела неіонізуючого електромагнітного випромінювання, способи і засоби захисту.....	80
1.6 Необхідність зволоження повітря в робочих зонах.....	90
1.7 Методи моделювання та оцінювання параметрів повітряного середовища в робочих зонах	91
Висновки до розділу 1	98
Список використаних джерел у розділі 1	100
РОЗДІЛ 2 ПРОГНОЗУВАННЯ РІВНЯ ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ В РОБОЧИХ ЗОНАХ.....	101
2.1 Метод прогнозу хімічного забруднення повітря в робочих зонах	102
2.2 Метод розрахунку концентрації хімічних речовин в робочих зонах	106
2.3 Метод розрахунку хімічної трансформації забруднюючих речовин в робочих зонах	109
2.4 Методи розрахунку поля швидкості вітру в робочих зонах.....	118
2.5 Метод оцінювання ризику хронічної інтоксикації робітників.....	122
2.6 Верифікація розроблених методів	126
2.7 Оцінка рівня забруднення в робочих зонах промислових майданчиків .	130

2.7.1 Динаміка забруднення повітряного середовища на підприємстві Дніпропетровського металургійного заводу «ДМЗ ЄВРАЗ» та на прилеглій території	130
2.7.2 Динаміка забруднення повітряного середовища на підприємстві коксохімічного заводу «Дніпрококс» та на прилеглій території	144
2.7.3 Динаміка забруднення повітряного середовища на прилеглій території Придніпровської ТЕС.....	158
2.7.4 Динаміка забруднення повітряного середовища на підприємстві «Інтерпайп Нижньодніпровського трубопрокатного заводу» та на прилеглій території з урахуванням викидів автотранспорту	161
2.7.5 Динаміка забруднення повітряного середовища на прилеглій території «ПАТ Південного гірничо-збагачувального комбінату» з урахуванням викидів автотранспорту.....	168
Висновки до розділу 2	173
Список використаних джерел у розділі 2	174
РОЗДІЛ 3 МІНІМІЗАЦІЯ РІВНЯ ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ В РОБОЧИХ ЗОНАХ НА ВІДКРИТІЙ МІСЦЕВОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕКРАНІВ ТА РОСЛИННОСТІ.....	175
3.1 Оцінювання ефективності застосування екрана для зниження загазованості в робочих зонах	176
3.2 Прогнозування вітрового режиму в робочих зонах промислових майданчиків	187
3.3 Використання рослинності для зниження рівня загазованості в робочих зонах	198
3.4 Методи оцінювання вітрового режиму в робочих зонах	216
Висновки до розділу 3	218
Список використаних джерел у розділі 3	219
РОЗДІЛ 4 МІНІМІЗАЦІЯ РІВНЯ ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ В РОБОЧИХ ЗОНАХ НА ПРОМИСЛОВИХ МАЙДАНЧИКАХ ЗА ДОПОМОГОЮ УСМОКТУВАЧІВ, НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ ТА ЗВОЛОЖЕННЯ	220
4.1 Удосконалення локальних усмоктувальних систем для зменшення забруднення повітря в робочих зонах гаражів.....	220

4.2 Моделювання процесу нейтралізації угарного газу, що потрапляє від автотранспорту до робочих зон на промислових майданчиках	248
4.3 Прогнозування параметрів мікроклімату в робочих зонах на відкритій місцевості при використанні зволожувача	257
Висновки до розділу 4	271
Список використаних джерел у розділі 4	273
РОЗДІЛ 5 АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ ПРИ НАЯВНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ	274
5.1 Метод прогнозу параметрів аероіонного режиму в робочих зонах	275
5.2 Засоби оцінювання параметрів аероіонного режиму.....	279
5.3 Метод прогнозу напруженості електричного поля в робочих зонах.....	289
5.4 Алгоритм розв’язання задачі по прогнозуванню аероіонного режиму в робочих зонах промислових майданчиків.....	292
5.5 Верифікація розроблених методів прогнозування	295
5.6 Моделювання аероіонного режиму в робочих зонах на промислових майданчиках.....	298
5.7 Оцінювання величини напруженості електричного поля в робочих зонах на промислових майданчиках	306
Висновки до розділу 5	310
Список використаних джерел у розділі 5	311
ВИСНОВКИ.....	312
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	316
Додатки.....	344
Додаток А Документи щодо впровадження результатів дисертаційної роботи	345
Додаток Б Економічний розрахунок встановлення екранів та дворівневого усмоктувача на підприємстві «Дніпровського олійноекстракційного заводу Олейна»	350
Додаток В Оцінювання соціальної та економічної ефективності використання дворівневих усмоктувачів по створенню безпечних умов праці в товаристві «Луговське»	353
Додаток Г Список публікацій здобувача за темою дисертації	360

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВГ – відпрацьовані гази автотранспорту;

FDTDM – метод скінченних елементів;

VIM – варіаційно-інтеграційний метод;

FDM – метод кінцевих різниць;

СП – сухе повітря;

ВП – вологе повітрям (ВП);

ТР – точка роси;

CFD (CWE) Model – Computational Fluid (Dynamics) Model;

ЕМП – електромагнітне поле;

E – напруженість електричного поля, В/м;

H – напруженість магнітного поля, $[(В \cdot с)/м^2]$;

$P_{джер}$ – потужність джерела випромінювання, Вт;

IPE – інтенсивність (щільність) потоку енергії, Вт/м²;

ЕМЕ – екранування (поглинання) електромагнітної енергії;

P – показник полярності;

$PЗ$ – показник забруднення, %;

$(PЗ_{\Sigma})_{сер.}$ – сумарний показник забруднення, %;

$ГДК_{с.д.}$ – гранично допустима концентрація, середньо-добова, мг/м³;

$ГДК_{м.р.}$ – гранично допустима концентрація, максимально-разова, мг/м³;

C – концентрація забруднюючої речовини в одиниці об'єму повітря, мг/м³;

$Q_i(t)$ – інтенсивність викиду кг/с;

u, v, w – компоненти вектору швидкості повітряного середовища, м/с;

w_s – швидкість гравітаційного осідання вагомих частинок, м/с;

σ – коефіцієнт розпаду, 1/с;

$\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$ – коефіцієнти турбулентної дифузії, м²/с;

x_i, y_i, z_i – координати місця розташування джерела забруднення, м;

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

ВСТУП

Сутність науково-прикладної проблеми, яка розглядається в роботі, 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.

Актуальність теми. 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 є розроблення методів прогнозування ризиків хронічних захворювань робітників та визначення закономірностей розподілу шкідливих виробничих чинників.

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, які визначають поширення та 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.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана згідно з Законом України від 4 квітня 2013 року № 178-VII «Про затвердження Загальнодержавної соціальної програми поліпшення стану безпеки, гігієни праці та виробничого середовища на 2014-2018 роки», згідно з розпорядженням Кабінету Міністрів України від 12 грудня 2018 року № 989-р «Про схвалення Концепції реформування системи управління охороною праці в Україні та затвердження плану заходів щодо її реалізації». Наукові дослідження, викладені в дисертації, виконані згідно з напрямом наукової роботи кафедри гідравліки та водопостачання Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, відповідно до програм науково-дослідних робіт: «Моделювання процесів забруднення навколишнього середовища при

надзвичайних ситуаціях та організованих викидах забруднюючих речовин» (№ держреєстрації 0115U007226, 2016-2018 рр.), «Захист навколишнього середовища на об'єктах транспортної інфраструктури» (№ держреєстрації 0115U007227, 2016-2018 рр.); «Розробка методів аналізу та прогнозу якості повітряного середовища в робочих та цивільних приміщеннях» (№ держреєстрації 0115U007224, 2016-2018 рр.) у рамках договору № 07/2014-У від 03.11.2014 р. про науково-технічну співпрацю між Дніпровським національним університетом залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна і Головним управлінням Державної служби з надзвичайних ситуацій у Дніпропетровській області.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка теоретичного інструментарію для оцінювання шкідливих факторів у робочих зонах на відкритій території промислових підприємств, прогнозування ризиків хронічних захворювань робітників та створення ефективних інженерних засобів захисту від впливу шкідливих чинників.

Поставлена мета зумовила необхідність вирішення наступних завдань дослідження:

- розробити метод оцінювання рівня хімічного забруднення повітря в робочих зонах на промислових майданчиках для визначення закономірностей формування зон забруднення та оцінювання ризику виникнення хронічних захворювань працівників;

- встановити закономірності формування аероіонного режиму в робочих зонах на відкритій місцевості промислових підприємств на основі методу чисельного моделювання;

- встановити закономірності розподілу напруженості електричного поля в робочих зонах на основі створеної чисельної моделі розрахунку;

- розробити чисельно-аналітичний метод, який дозволить визначити ефективність використання захисних екранів для зниження загазованості повітря в робочих зонах;

- розробити в створеному інструментарії окремі складові (модулі), що базуються на застосуванні екоінжинірингу для зниження загазованості в робочих зонах;

- опрацювати технологію зниження хімічного забруднення в робочих зонах на промислових майданчиках за рахунок використання дворівневих усмоктувачів;

- удосконалити технологію нейтралізації чадного газу у спеціальній камері відбору повітря для зниження рівня загазованості повітряного середовища в робочих зонах;

- розробити комплексний метод оцінювання параметрів повітряного середовища в робочих зонах на відкритій місцевості, який дозволить прогнозувати вітровий режим, вологість та температуру в робочих зонах;

- провести верифікацію розроблених методів.

Об’єкт дослідження – процеси техногенного забруднення в робочих зонах на території промислових підприємств.

Предмет дослідження – встановлення закономірностей розподілу шкідливих факторів в робочих зонах та розробка методів зниження їх негативного впливу для забезпечення нешкідливих умов праці.

Методи дослідження: методи натурного та лабораторного вимірювання, а також чисельні та чисельно-аналітичні методи моделювання полів концентрації забруднюючої речовини та електричного напруження в робочих зонах, математичні методи теорії функцій комплексного змінного для знаходження поля швидкості повітряного потоку біля екранів. Результати експериментальних досліджень порівнювалися з чисельними розрахунками, отриманими за розробленими методами.

Наукова новизна отриманих результатів визначається комплексним підходом до оцінювання та прогнозування впливу шкідливих факторів у робочих зонах на відкритій місцевості промислових підприємств, а саме:

- вперше розроблено чисельно-аналітичний метод, який дозволяє проводити дослідження щодо ефективності застосування на промислових

майданчиках поблизу автомагістралей екранів, які використовуються для зменшення рівня забруднення повітря в робочих зонах при виконанні робіт;

– вперше обґрунтовано та розроблено метод оцінювання аероіонного режиму в робочих зонах на відкритій місцевості промислових підприємств, який дозволяє при розрахунку враховувати взаємодію аероіонів різної полярності, наявність перешкод у робочих зонах, нерівномірність поля швидкості повітряного потоку та турбулентну дифузію;

– вперше розроблено комплексну методологію оцінювання рівнів шкідливих чинників у робочих зонах на відкритій місцевості промислових підприємств, яка дозволяє прогнозувати вітровий режим, вологість та температуру в робочих зонах за наявності використання штучного зволожувача повітря;

– удосконалено методологічні засади технології зниження хімічного забруднення у робочих зонах за рахунок використання дворівневих усмоктувачів та спеціальних напрямних пластин; розроблено чисельний метод для оцінювання ефективності використання дворівневих усмоктувачів;

– одержала 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 домішок та виконати оцінювання ризику виникнення хронічних захворювань працівників;

– одержав подальший розвиток метод оцінювання напруженості електричного поля в робочих зонах, який дозволяє враховувати вплив перешкод різної геометричної форми на формування електричних полів;

– одержав подальший розвиток метод зниження загазованості в робочих зонах із урахуванням впливу рослинності (екоінжинірингу) на формування зон забруднення та зниження рівня хронічних захворювань;

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

Практичне значення отриманих результатів:

– усі розроблені методи оцінювання шкідливих факторів та прогнозування ризиків хронічних захворювань робітників в робочих зонах на відкритій місцевості промислових підприємств реалізовані у вигляді комп'ютерних програм;

– проведення обчислювальних експериментів дозволяє оперативно розраховувати параметри повітряного середовища в робочих зонах на промислових майданчиках та на відкритій місцевості з комплексним урахуванням таких факторів, які раніше не приймалися до уваги: нерівномірного поля швидкості повітряного потоку, турбулентної дифузії, наявності екранів, різного роду перешкод, джерел зволоження, джерел емісії аероіонів різної полярності;

– розроблені методи дозволяють покращити параметри повітряного середовища в робочих зонах на відкритій місцевості за рахунок раціонального вибору положення, розмірів екранів, усмоктувачів, рослинності, іонізаторів;

– розроблені методи оцінювання шкідливих факторів у робочих зонах на відкритій місцевості промислових підприємств дозволяють зменшити кількість дорогих лабораторних або натурних експериментів при проведенні досліджень щодо відповідності нормативним значенням параметрів повітряного середовища та при реінжинірингу робочих місць;

– результати впроваджені в діяльності приватного підприємства «РИН», де модулі програмного комплексу було застосовано для оцінювання параметрів повітряного середовища в робочих зонах при аналізі використання майданчиків машино-транспортного парку та їх реконструкції;

– розроблені математичні методи та пакети програм застосовано для прогнозування рівня хімічного забруднення на території ТОВ «Енергосервіс-

КР» при плануванні та реінжинірингу робочих місць на відкритій місцевості підприємства; отримано прогнозні дані відносно аероіонного режиму, які неможливо отримати на базі існуючих методів прогнозування;

- розроблені методи прогнозування рівня електромагнітного випромінювання та програми чисельного розрахунку використовуються в службі охорони праці АТ ДТЕК «Дніпровські електромережі», які дозволяють шляхом обчислювального експерименту розраховувати інтенсивність напруженості електричного поля з урахуванням необхідної кількості джерел електричного поля;

- рекомендації щодо покращення якості повітря в робочих зонах на відкритих майданчиках (обслуговування автомобільної техніки) впроваджено в Товаристві з обмеженою відповідальністю «ЛУГОВСЬКЕ»;

- результати використовуються в навчальному процесі Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна при підготовці студентів, які навчаються за спеціальністю «Будівництво та цивільна інженерія», зокрема при викладанні таких навчальних дисциплін: «Охорона природного середовища від забруднення промисловими підприємствами», «Прогнозування та ліквідація аварійних ситуацій».

Особистий внесок здобувача в наукових працях, опублікованих із співавторами, полягає в: обґрунтуванні вибору методів розрахунку вітрового режиму в робочих зонах [33, 47–48, 50]; розробці методів оцінювання рівня забруднення повітря в зоні впливу міських автомагістралей [2, 24–25, 28–29, 37, 52]; математичному моделюванні процесу розсіювання викидів від постійно діючих джерел техногенного забруднення [1, 7–9, 12–13, 35–36, 38–40, 45]; розробці програмного забезпечення для комплексного оцінювання хімічного забруднення повітря з урахуванням впливу викидів підприємств та автомагістралі при оцінюванні рівня ризику хронічних захворювань [3, 20, 41]; математичному моделюванні процесів вентиляції [26–27, 49, 51]; розробці методів прогнозування локальних зон забруднення поблизу

автомагістралі з урахуванням рослинності [14, 23]; розробці методів оцінювання впливу шкідливих виробничих чинників у робочих зонах на відкритій місцевості [17–19, 43–44, 46]; розробці технології зменшення концентрації оксиду вуглецю та методу розрахунку [10–11, 16, 42]; чисельному моделюванні процесів очищення води [30–32, 34]; дослідженні та моделюванні процесів масопереносу та нейтралізації [4–6, 30–32]; створенні методики розрахунку електричного поля в робочих зонах [15]; розробці чисельно-аналітичного методу прогнозування рівня забруднення повітряного середовища та оцінювання ризику хронічних захворювань на території промислових майданчиків підприємств із урахуванням екранів [21].

Апробація матеріалів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідались, обговорювались і одержали позитивні оцінки на наукових конференціях і семінарах: IV Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективи розвитку та безпека автотранспортного комплексу» (м. Новокузнецьк, 2014 р.), II Міжнародній науково-практичній конференції «Природні небезпеки: зв'язок науки і практики» (м. Саранськ, 2015 р.), 75-й та 76-й Міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпропетровськ, 2015 р., 2016 р.), II Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості» (м. Івано-Франківськ, 2015 р.), I, II Всеукраїнських науково-технічних конференціях «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (м. Дніпропетровськ, 2015 р., 2016 р.), III–V Міжнародних науково-практичних конференціях «Екологія та захист навколишнього середовища» (м. Мінськ, 2016 р., 2018 р., 2019 р.), X–XII Міжнародних науково-практичних конференціях «Сучасні інформаційні і комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті» (м. Дніпро, 2016–2018 рр.), 9–10 Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (м. Дніпро, 2017 р., 2018 р.), III–IV Міжнародних науково-технічних конференціях «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (м. Дніпро,

2017 р., 2018 р.), Міжнародному науковому симпозиумі «Тиждень еколога – 2017» (м. Кам'янське, 2017 р.), VI Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств» (м. Дніпро, 2017 р.), Всеукраїнській науково-практичній конференції «Пожежна та техногенна безпека: наука і практика» (м. Черкаси, 2018 р.), Всеукраїнській науково-методичній конференції «Проблеми математичного моделювання» (м. Кам'янське, 2018 р.), Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні проблеми енергоресурсозбереження в будівництві, містобудуванні та житлово-комунальному господарстві» (м. Запоріжжя, 2018 р.), Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference «International Trends in Science and Technology» (м. Варшава, 2019 р.).

Публікації. Основні положення, результати та висновки дисертаційної роботи відображено в 52 публікаціях, у тому числі 29 статтях, з яких 22 – у наукових фахових виданнях України (з них 2 – у виданнях, включених до міжнародної наукометричної бази Scopus, 5 – у виданнях, включених до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus) та 1 – у зарубіжному науковому виданні, 23 тезах доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і чотирьох додатків загальним обсягом 367 сторінок, з яких 289 сторінок основного тексту. Робота містить 30 таблиць, 167 рисунків, список використаних джерел з 252 бібліографічних найменувань.

РОЗДІЛ 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 і в сільському господарстві 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 сірчанним 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 останні роки. Було обрано показники трьох найбільшшкідливих 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. Дніпро 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 прилеглій території.

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

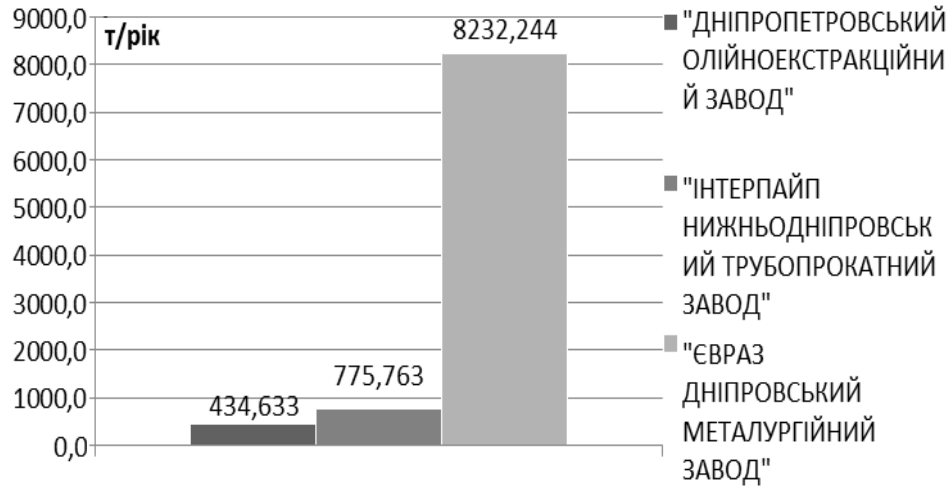


Рисунок 1.1 – Загальна кількість викидів підприємств у 2016 р.

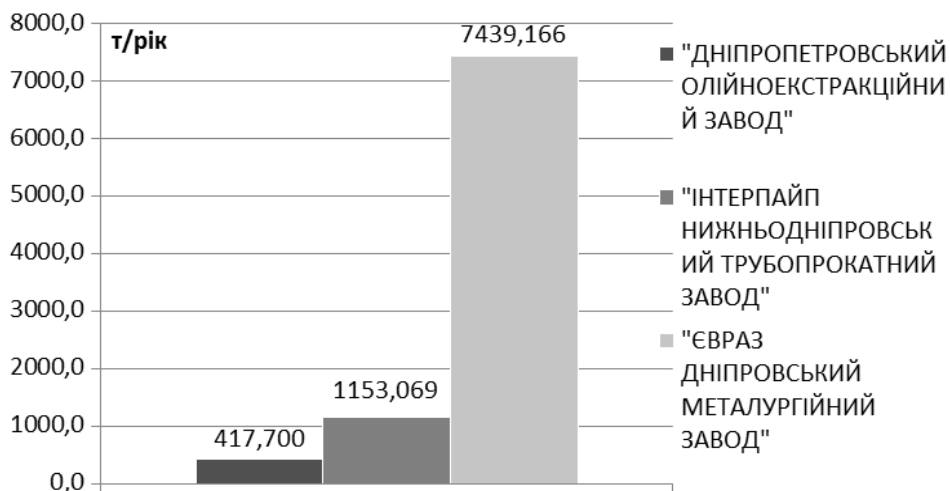


Рисунок 1.2 – Загальна кількість викидів підприємств у 2017 р.

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.

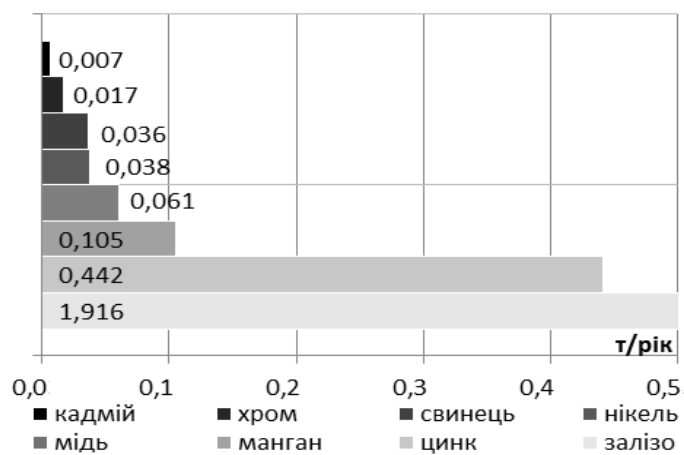
На діаграмах (рис. 1.3–1.8) показано кількісні показники різних сполук за їх хімічною класифікацією, які надходять в атмосферу від підприємства ДМЗ ЄВРАЗ ім. Петровського.



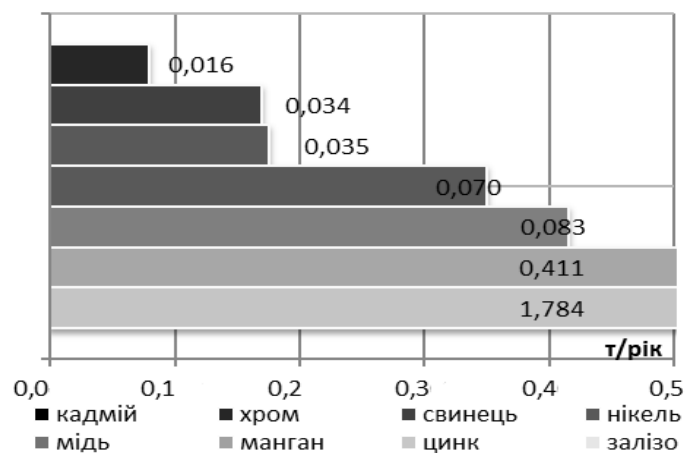
Рисунок 1.3 – Кількість викидів заводу «ЄВРАЗ ДМЗ» за хімічною класифікацією: *а* – 2016 р.; *б* – 2017 р.

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.



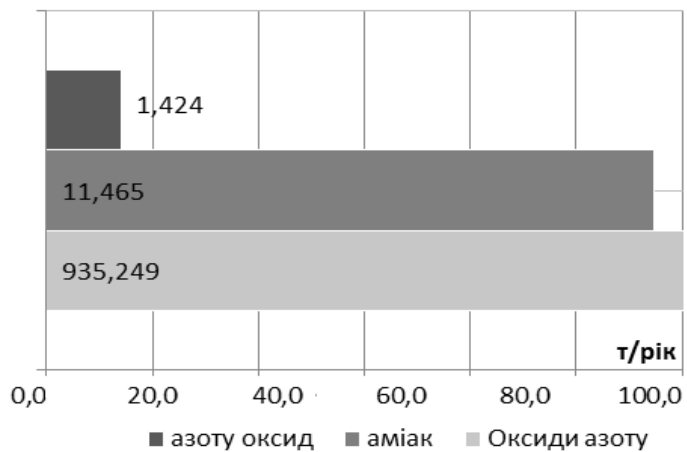
а



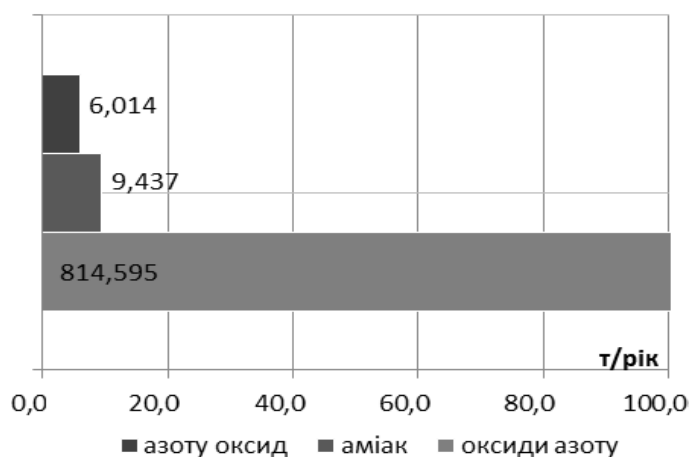
б

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.

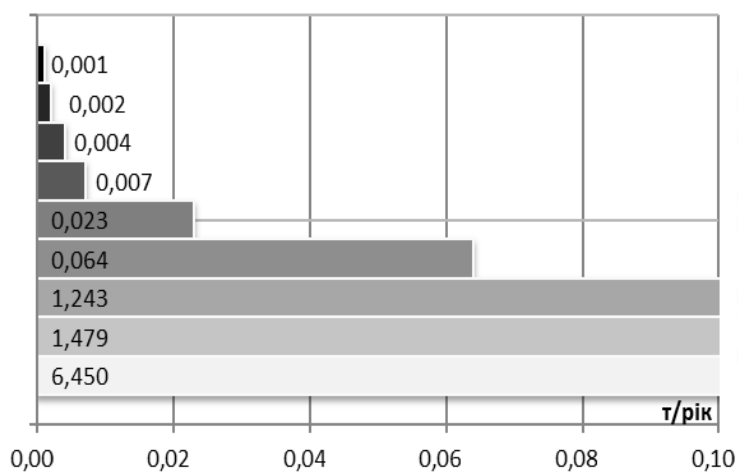


а

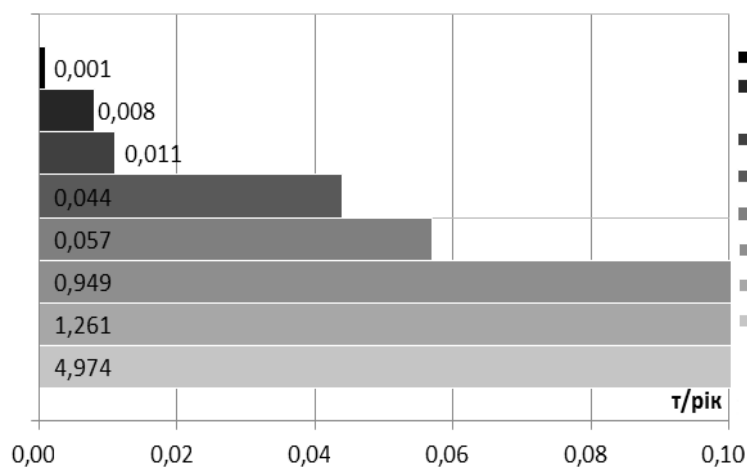


б

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



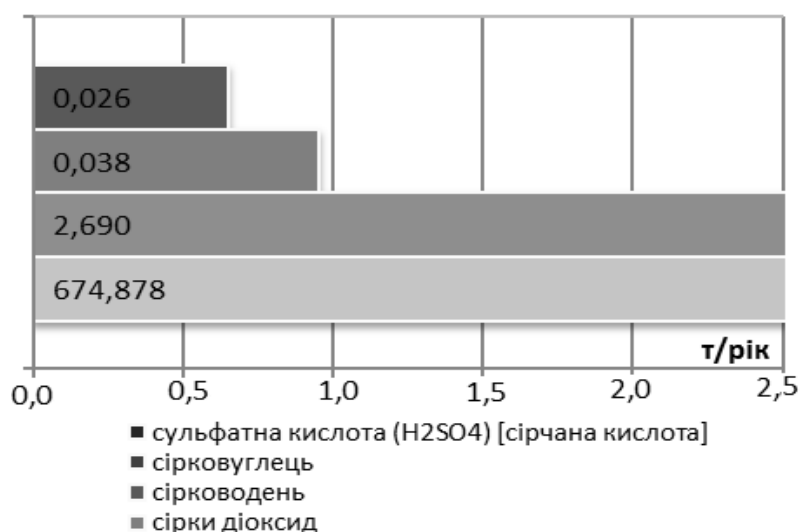
а



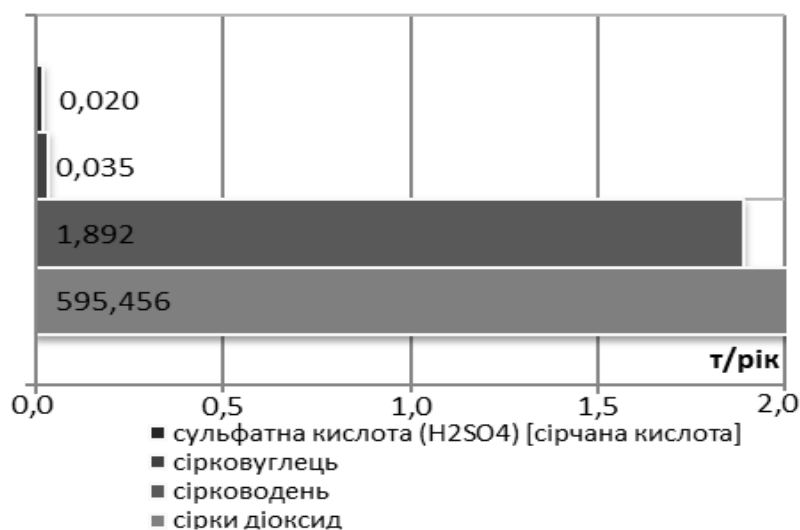
б

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

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



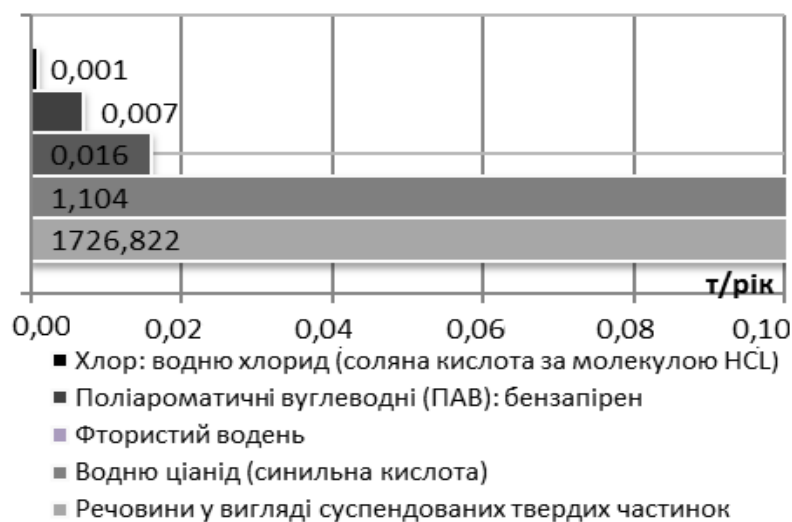
a



б

Рисунок 1.7 – Кількість викидів діоксиду та сполук сірки заводу «ЄВРАЗ ДМЗ»: *a* – 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



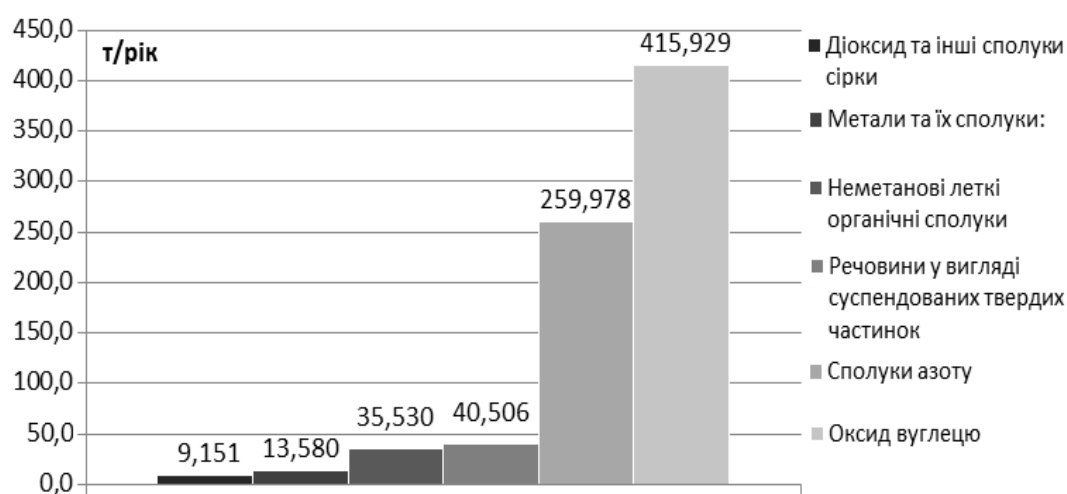
б

Рисунок 1.8 – Кількість викидів інших сполук заводу «ЄВРАЗ ДМЗ»: *a* – 2016 р.; *б* – 2017 р.

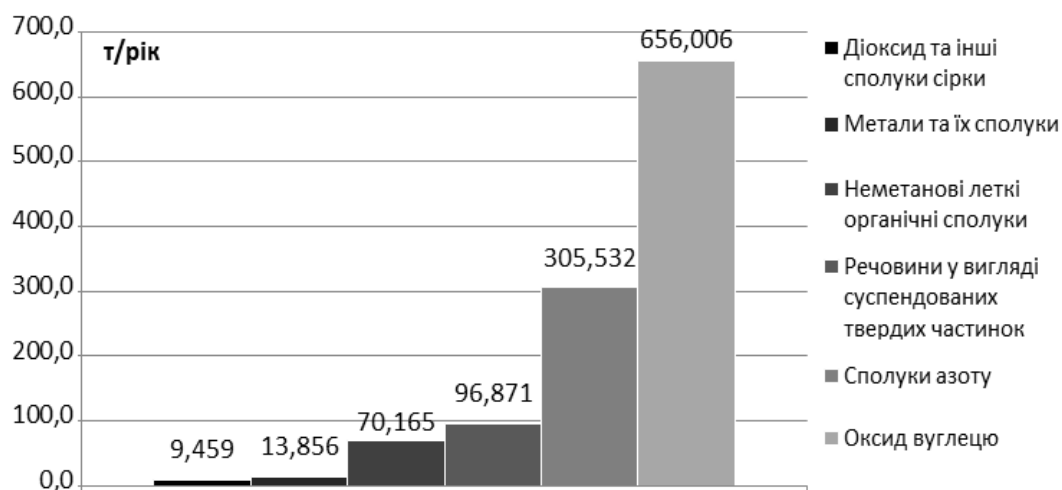
На рисунку 1.8 представлено розподіл хлору, бензапірену, фтористого водню, синильної кислоти та речовин у вигляді суспендованих твердих частинок, спостерігається їх загальний зріст: хлору у 2 рази, бензапірену на 14 %, фтористого водню на 75 %, синильної кислоти на 72 %, суспендованих твердих частинок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



а

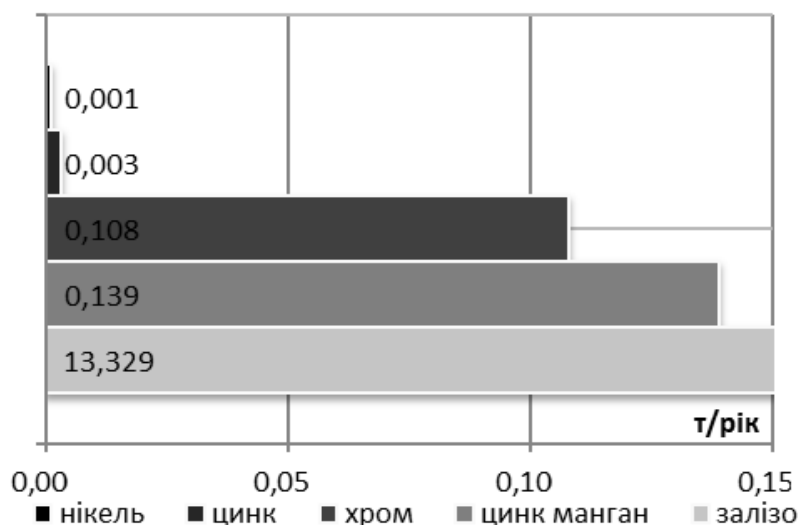


б

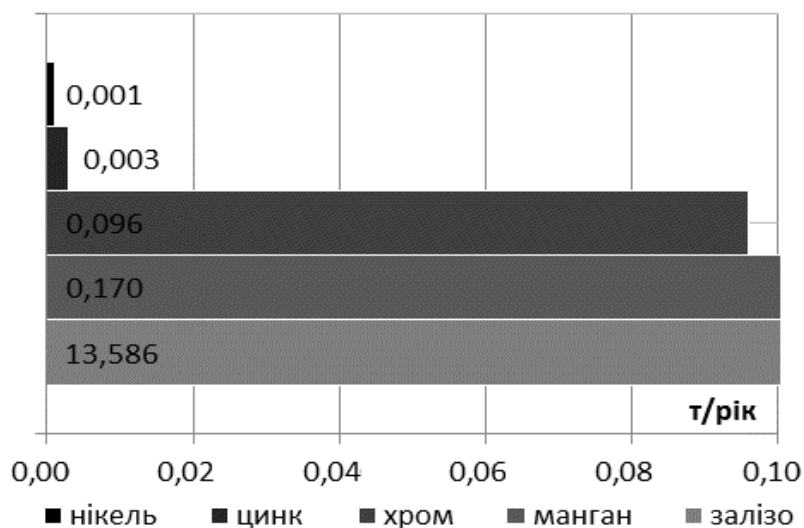
Рисунок 1.9 – Кількість викидів заводу «Інтерпайп НТЗ» за хімічною класифікацією: *а* – 2016 р.; *б* – 2017 р.

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 %.



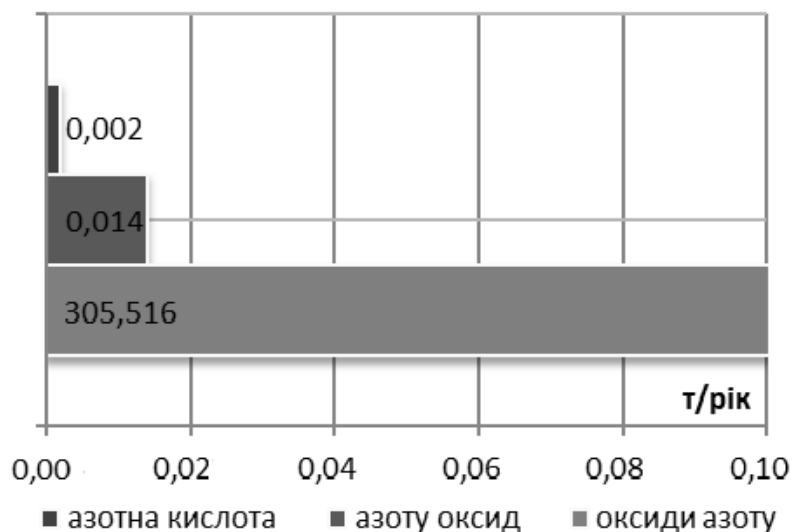
a



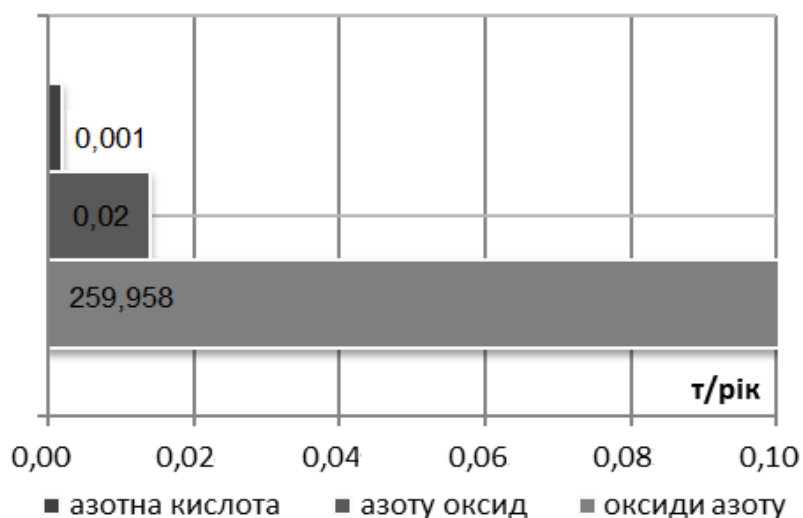
б

Рисунок 1.10 – Кількість викидів металів та їх сполук заводом «Інтерпайп НТЗ»: *a* – 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 %.



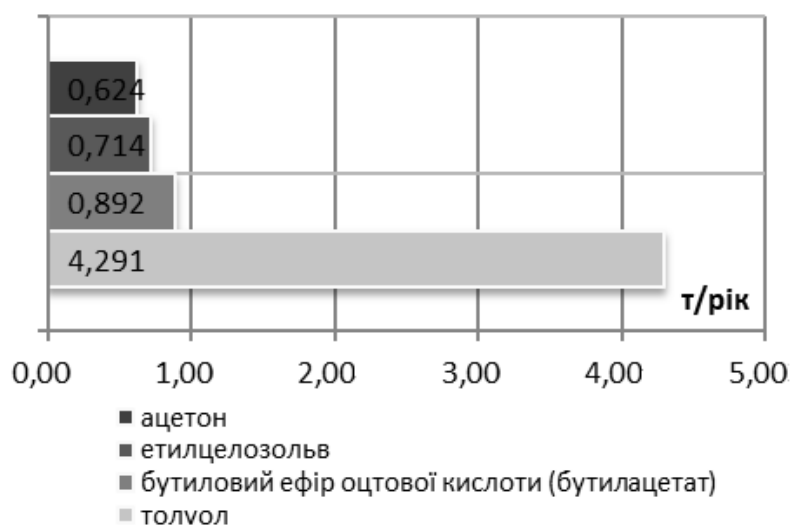
a



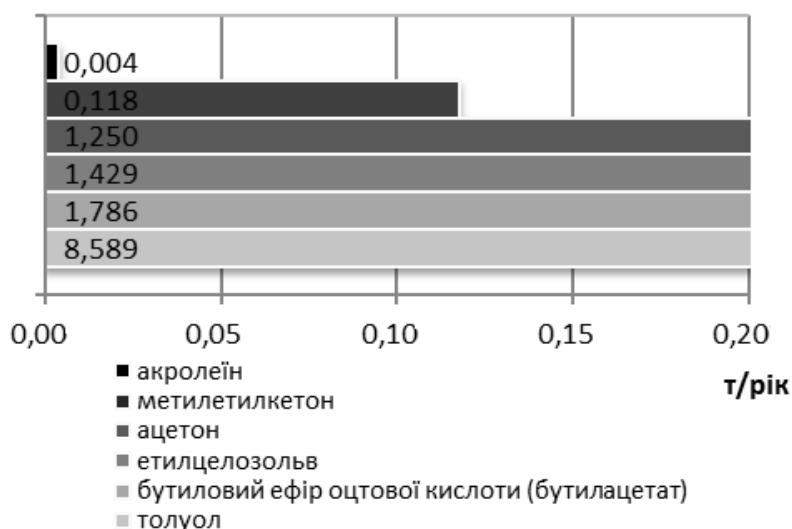
б

Рисунок 1.11 – Кількість викидів сполук азоту заводом «Інтерпайп НТЗ»: *a* – 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 %.



a

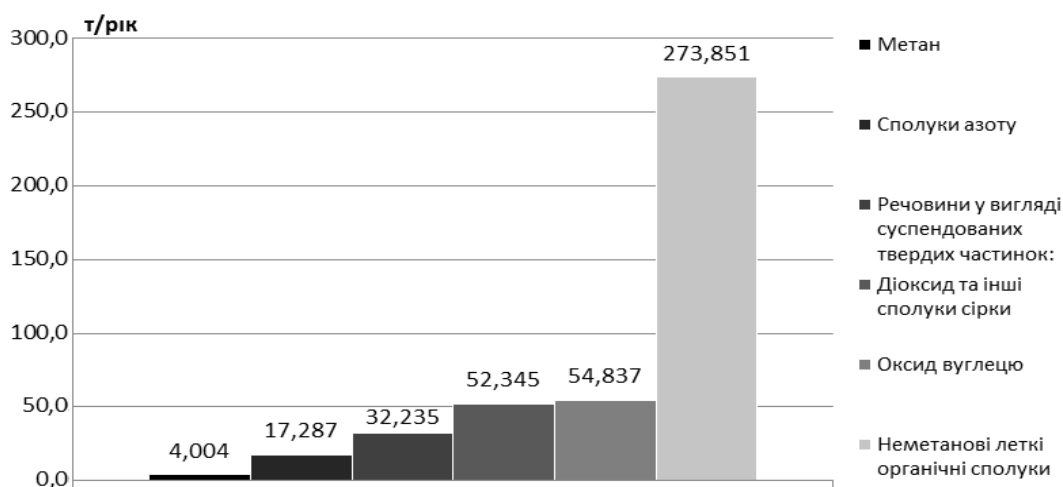


б

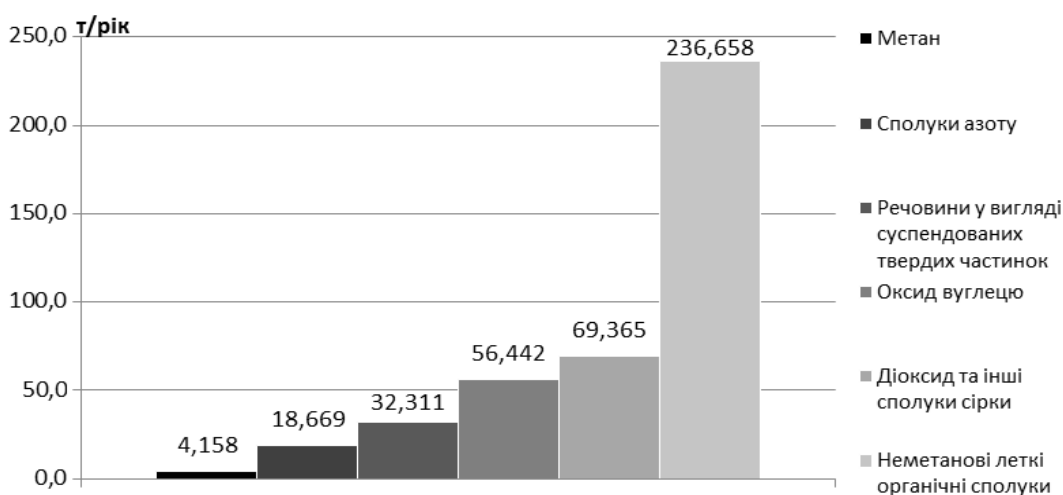
Рисунок 1.13 – Кількість викидів інших сполук заводом «Інтерпайп НТЗ»: *a* – 2016 р.; *б* – 2017 р.

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 %.



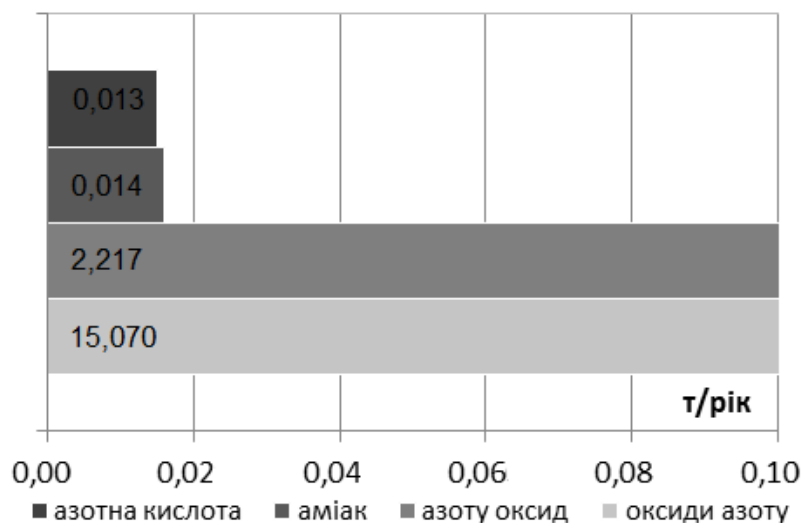
a



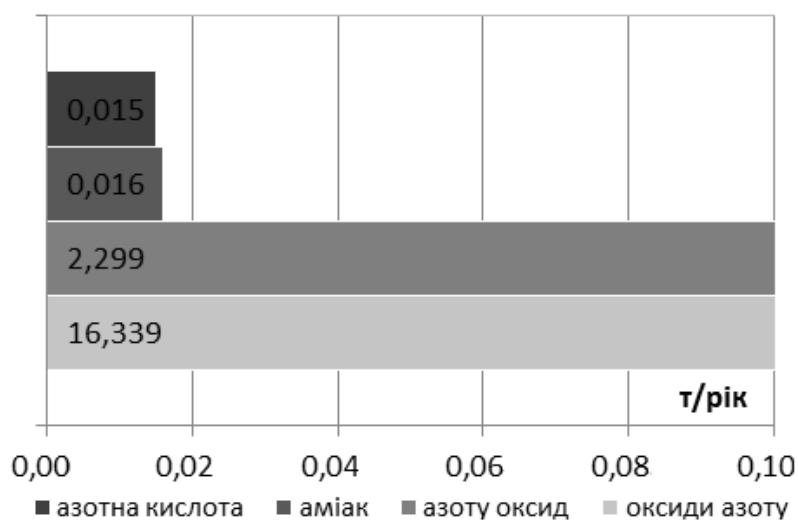
б

Рисунок 1.14 – Кількість викидів заводу «Олейна» за хімічною класифікацією: *a* – 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

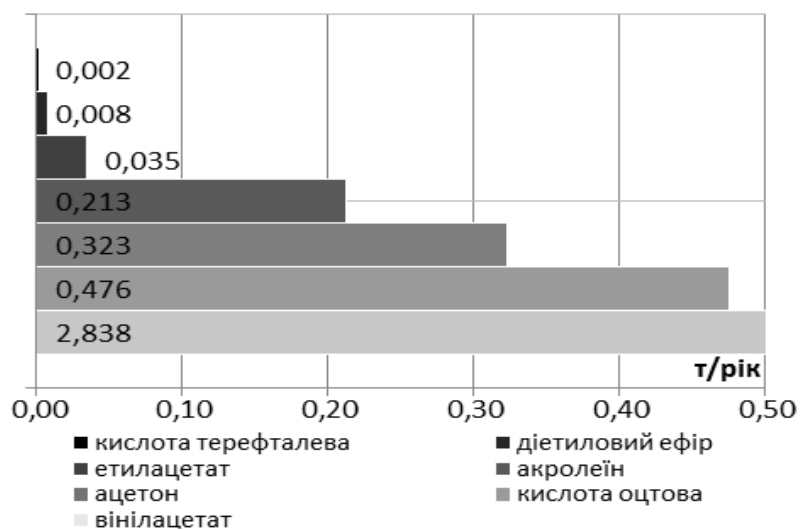


б

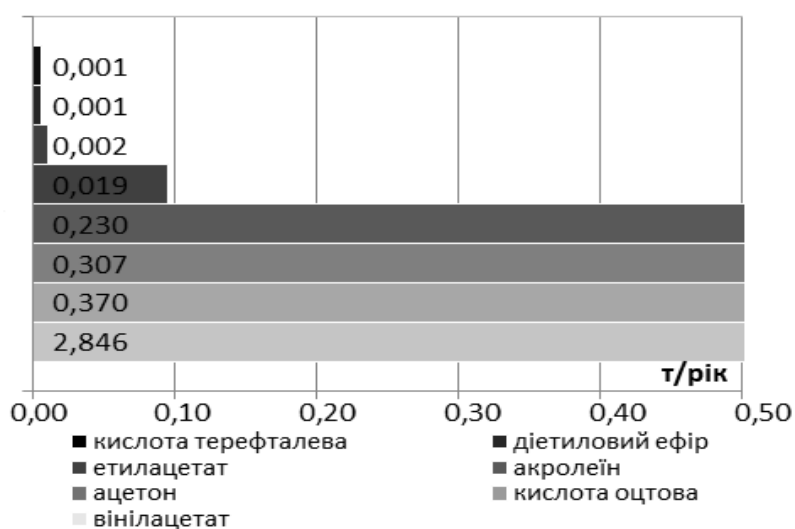
Рисунок 1.15 – Кількість викидів сполук азоту заводом «Олейна»:
a – 2016 р.; *б* – 2017 р.

На рисунку 1.16 представлено кількісний склад викидів неметанових летючих органічних сполук: кислоти терефталової, етилацетату, ацетону, діетилового ефіру, акролеїну, кислоти оцтової. 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, підвищилося значення менше як на 1 %.



a



б

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

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.



a



б

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 згоряння, 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. Бахарєва, 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
Нижнєдніпровський 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. Голінько, Л. В. Драннікова, В. Ф. Стоєцького [61], аналізу ризиків при систематичному забрудненні атмосферного повітря небезпечними хімічними речовинами присвячені роботи В. В. Меншикова, А. А. Швиряева, 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 мозгу, 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.

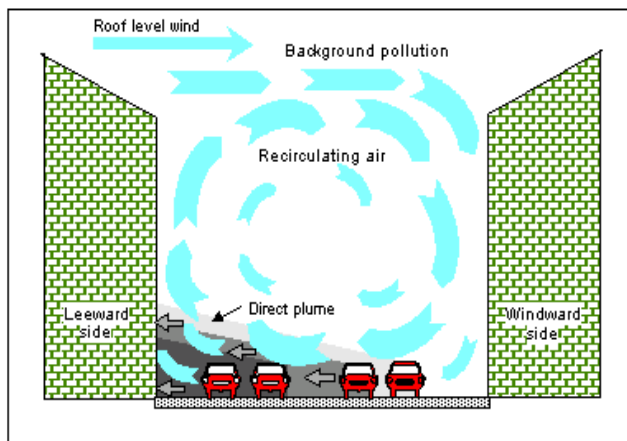
Автомобільний транспорт більш за все забруднює повітря міст. При стійкій стратифікації атмосфери, особливо при інверсіях температури, дим та пил може накопичуватися в приземному шарі атмосфери в такій кількості, що негативно впливає на стан здоров'я людини.

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 тиху 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.

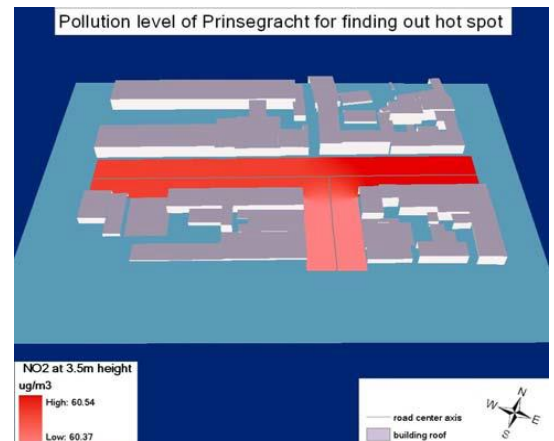
У зарубіжних роботах наголошується, що параметри мікроклімату мають неабияке значення для діяльності, що проводиться на відкритому повітрі [199]. Виконуються роботи з дослідження впливу житлових будівель на граничні умови мікроклімату в різних регіонах міста [147], впливу міського мікроклімату на тепловий 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 змодельовати 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].



a



б

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].

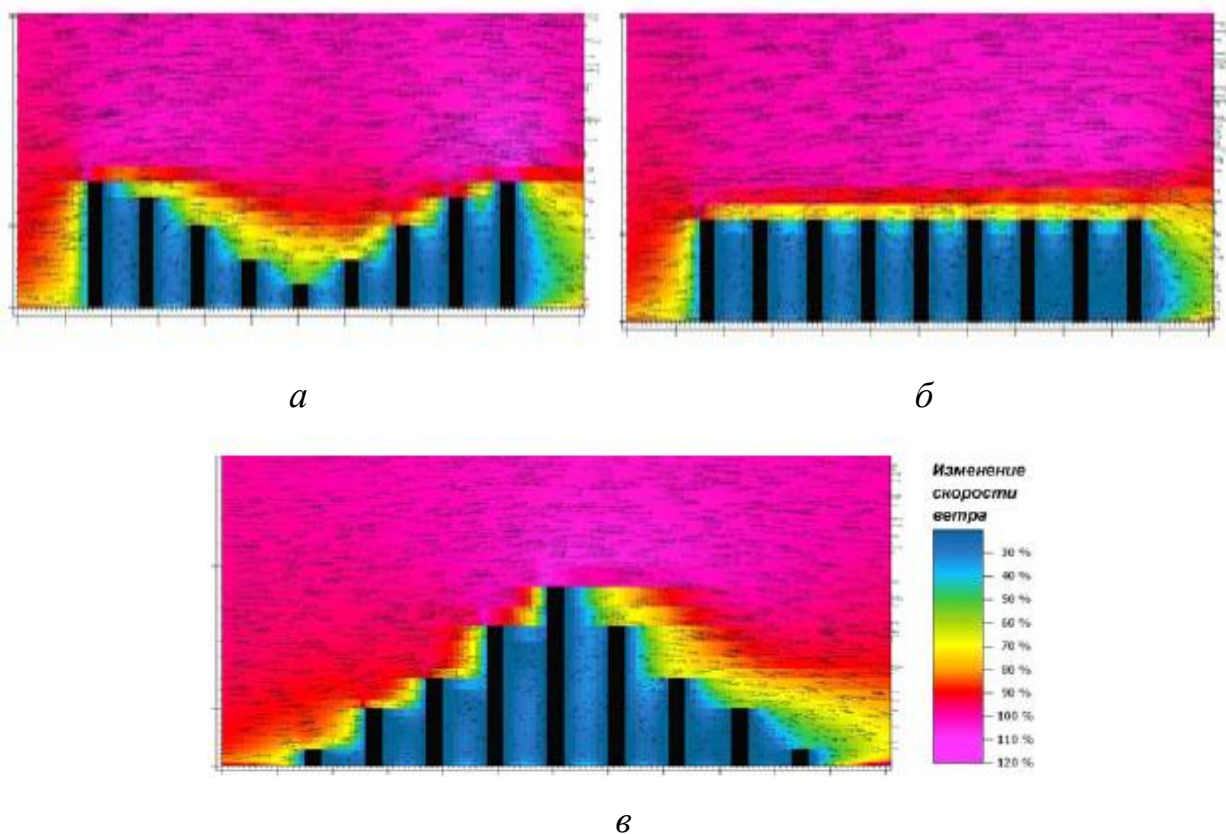


Рисунок 1.19 – Вертикальний переріз поля швидкості вітру (поздовжній) при динамічній конвекції: *а* – «місто-чаша», *б* – «місто-рівнина», *в* – «місто-холм» [90]

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

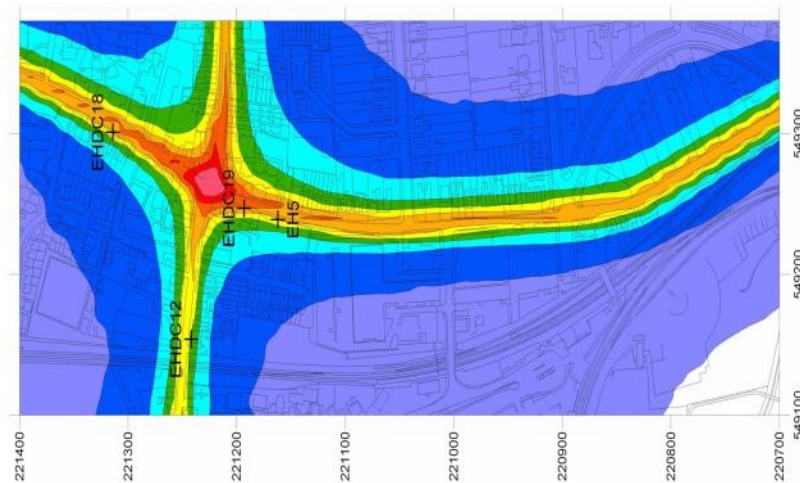


Рисунок 1.20 – Розподіл концентрації NO_2 у масштабі 1:5000 [252]

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 насадженню 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 CiTTY-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

швидкореалізуємі. 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 Іонізація повітря в робочих зонах

Дослідженню процесів іонізації присвячені роботи багатьох авторів [51–52, 55–57, 65–66, 115–117, 120–121, 124–125, 127–133, 139–142, 190]. Забезпечення певною мірою іонізації повітряного середовища в робочій зоні є одним із найважливіших чинників підтримання гарного самопочуття і високої працездатності персоналу. Встановлено, що значне зниження вмісту заряджених частинок (іонів) в повітрі збігається з появою у працюючих незвичайної хворобливості, скарг на втому, депресію, нудоту, безсоння, дратівливість, респіраторні порушеннями і ін. У той же час перебування людей в умовах з помірно підвищеною іонізацією атмосфери, при переважній кількості негативних іонів, – навпаки, спостерігається

сприятливий вплив на організм. Процес іонізації повітря полягає в перетворенні нейтральних атомів і молекул повітряного середовища в електрично заряджені частинки (іони). Іони в повітрі (аероіони) можуть утворюватися внаслідок природної і штучної іонізації.

Природна іонізація відбувається в результаті впливу на повітряне середовище космічної і сонячної радіації і іонізуючого випромінювання (частинок), що виникають при розпаді довгоживучих радіонуклідів земної кори (калій-40, уран-238, торій-232 і ін.) [62]. Природна іонізація повітряного середовища відбувається повсюдно і постійна в часі. Штучна аероіонізація виникає під дією іонізуючих факторів, які супроводжують деякі технологічні процеси (рентгенівські і ультрафіолетові випромінювання, термемісія, фотоефект і ін.); а також в наслідок дії спеціальних пристроїв – іонізаторів [62]. Ступінь іонізації повітря залежить від співвідношення процесів іонізації і деіонізації. Остання обумовлюється рекомбінацією двох іонів різних полярностей, адсорбцією легких іонів на незаряджених ядрах, конденсацією, нейтралізацією легких і важких іонів зарядами протилежного знаку і ін. Основними характеристиками іонів є їх рухливість і заряд. Рухливість іонів виражається коефіцієнтом пропорційності (k , $\text{см}^2/\text{с}\cdot\text{В}$) між швидкістю іонів і напруженістю електричного поля, що впливає на іон [62]. Рухливість іонів залежить і від їх маси: чим більше маса, тим менше швидкість переміщення іонів в електричному полі. За рухливістю весь спектр іонів умовно розділяється на п'ять діапазонів: легкі ($k > 1,0$); середні ($1,0 > k > 0,01$); важкі ($0,01 > k > 0,001$); іони Ланжевена ($0,001 > k > 0,0002$); надважкі іони ($0,0002 > k$) [62].

Ступінь іонізації повітряного середовища визначається кількістю іонів кожної полярності в одному кубічному сантиметрі повітря (n^+ і n^-) і показником полярності (Π), який визначається як відношення різниці числа іонів позитивної та негативної полярності до їх суми [62]:

$$\Pi = \frac{n^+ - n^-}{n^+ + n^-}.$$

У разі рівного розподілу кількості іонів позитивного і негативного знаків показник полярності $\Pi=0$. Мінімально необхідні, оптимальні і максимально допустимі кількості легких іонів обох полярностей і значення показника полярності наведені в табл. 1.4 [62].

Таблиця 1.4 – Кількості легких іонів і значення показника полярності

Рівень іонізації повітряного середовища	Число іонів в 1см ³ повітря		Показник полярності, Π
	n^+	n^-	
Мінімально необхідний	400	600	-0,2
Оптимальний	1500-3000	3000-5000	від -0,5 до 0
Максимально допустимий	50 000	50 000	від -0,05 до +0,05

Оцінка ступеня аероіонізації середовища здійснюється порівнянням вимірних значень з нормативними величинами (табл. 1.4). Для нормалізації іонного режиму повітряного середовища широко застосовуються штучні іонізатори (високовольтні, індукційні, радіаційні та ін.) і ефективна, правильно організована вентиляція приміщень, так як зовнішній чисте повітря містить в 2-5 разів більше іонів, ніж повітря закритих приміщень (50-100 іонів/см³) [62].

Аспекти оптимізації досліджень умов праці по мікроклімату в промисловій індустрії наведено в роботах А. С. Белікова [7–8, 70]. Проблема оцінювання і взаємозв'язку аерозольного забруднення і аероіонного складу повітря в робочій зоні розглянута в роботах К. А. Чорного [139–142], моделюванню аероіонного режиму в приміщеннях при штучній іонізації з використанням засобів чисельного моделювання присвячені роботи С. Г. Циганкової [10–14], запропонована програмно-інформаційна система оптимізації мікроклімату в приміщеннях в роботах О. В. Строкань [120–121], дослідження шляхів удосконалення аероіонного режиму робочого середовища представлені в роботах І. О. Толкунова [127–133], дослідження впливу мікрокліматичних параметрів повітрообміну на аероіонний склад

повітря робочих приміщень, моделювання та прогнозування динаміки аероіонного складу повітря наводяться в роботах В. А. Гливи [55–57], нормування аероіонного складу повітря робочих приміщень та основні напрями його вдосконалення, принципи моделювання динаміки аероіонного складу повітря у приміщеннях наведено в роботах О. І. Запорожця [65–66], методи визначення концентрації аероіонів та вмісту пилу представлено в роботах А. О. Водяника [51–52], нормалізація аероіонного складу повітря в офісних приміщеннях розглянута в роботах О. В. Сидорова [115–117]. Вищевказані роботи присвячені цікавим та складним питанням динаміки та прогнозування аероіонного режиму саме в приміщеннях, в данній роботі вперше обгрунтовано та розроблено метод оцінювання аероіонного режиму в робочих зонах на відкритій місцевості промислових підприємств, який, на відміну від існуючих, дозволяє при розрахунку враховувати взаємодію аероіонів різної полярності, наявність перешкод у робочих зонах, нерівномірність поля швидкості повітряного потоку та турбулентну дифузію на основі розв’язання тривимірних рівнянь масопереносу.

1.5 Природні і штучні джерела неіонізуючого електромагнітного випромінювання, способи і засоби захисту

Одним з значущих фізичних факторів, що формують умови праці і визначають екологічну ситуацію на робочих місцях працівників, є електромагнітні випромінювання різного походження і різних діапазонів частот. Електромагнітне поле (ЕМП) являє собою особливу форму матерії.

Будь-яка електрично заряджена частка оточена електромагнітним полем, що складає з нею єдине ціле. ЕМП може існувати і у вільному, відокремленому від заряджених частинок стані, у виді фотонів, що рухаються зі швидкістю $3 \cdot 10^8$ км/с, або у вигляді випромінювання, що рухається з тією ж швидкістю [62].

Спектр електромагнітних коливань по частоті охоплює понад 20

порядків, від $5 \cdot 10^{-3}$ до 10^{21} Гц. Залежно від енергії фотонів його підрозділяють на область неіонізуючого та іонізуючого випромінювання. До неіонізуючого випромінювання відносяться електричні і магнітні поля.

ЕМП характеризується векторами напруженості електричного E та магнітного H полів, які відображають силові властивості ЕМП. У електромагнітній хвилі вектори E і H завжди взаємно перпендикулярні.

У вакуумі і в повітрі $E=377 H$. Довжина хвилі λ , частота коливань f і швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль у повітрі c пов'язані співвідношенням: $c = \lambda \cdot f$ [62].

Біля джерела ЕМП виділяють ближню зону, або зону індукції, яка знаходиться на відстані $r \leq \lambda/2\pi$, і далеку зону, або зону випромінювання, в якій $r > \lambda/2\pi$. У зоні індукції електричне і магнітне поля можна вважати незалежними один від одного. Тому кількісними характеристиками поля в цій зоні є напруженість електричної E і магнітної H складових. У зоні випромінювання (хвильовій зоні), де вже сформувалася біжуча електромагнітна хвиля, найбільш важливим параметром є щільність потоку енергії (інтенсивність), яка в загальному вигляді визначається векторним добутком E і H , а для сферичних хвиль при поширенні в повітрі може бути виражена в наступному вигляді:

$$I_{PE} = \frac{P_{джер}}{4\pi \cdot r^2}, \text{ Вт/м}^2,$$

де $P_{джер}$ – потужність джерела випромінювання; r – відстань від джерела.

Електромагнітний фон землі формувався багато тисячоліть, головним чином, природними джерелами, основними з яких є геоелектричне і геомагнітне поле, випромінювання космічного, сонячного і навколоземного походження, а також випромінювання живих організмів [62].

Електричне поле Землі направлено перпендикулярно до земної поверхні, зарядженої негативно щодо верхніх шарів атмосфери. У поверхні Землі напруженість його становить близько 130 В/м і з висотою знижується

приблизно за експоненціальним законом. На висоті близько 9 км напруженість зменшується до 5 В/м. Річні зміни електричного поля Землі подібні за характером на всій земній кулі і досягають максимуму в січні – лютому (до 150–250 В/м) і мінімуму в червні – липні (100-120 В/м). Добові варіації, обумовлені в основному грозовою активністю [62].

Значний вплив на електромагнітний фон Землі стали надавати штучні джерела електромагнітного поля (ЕМП). В даний час практично все населення земної кулі в більшій чи меншій мірі піддається впливу надфонового рівня ЕМП.

Збільшення або зменшення параметрів ЕМП, що значно відрізняються від адекватних, можуть викликати в організмах функціональні зрушення, які в ряді випадків переростають в патологічні. Численні дослідження дозволили встановити також, що найбільш чутливими до дії ЕМП є нервова, серцево-судинна, імунна та ендокринна системи, при цьому виявлена підвищена небезпека ЕМП для зростаючих організмів, а також людей із хронічними захворюваннями зазначених систем організму.

При хронічному опроміненні більш ранні і більш виражені реакції виявляються з боку нервової системи, на рівні нервової клітини, що пригнічує нервову діяльність. Психоневрологічні симптоми проявляються у вигляді постійного головного болю, підвищеної стомлюваності, слабкості, порушення сну, підвищеної дратівливості, послаблення пам'яті і уваги, можуть розвиватися стресові реакції [62].

При багаторічному опроміненні можливо розвиток віддалених наслідків, включаючи дегенеративні процеси в центральній нервовій системі, пухлини мозку, лейкози, гормональні захворювання і ін.

Порушення функції серцево-судинної системи найчастіше проявляється в вигляді дистонії, гіпотонії, болі в області серця та ін. Можливі фазові зміни і складу крові з подальшим розвитком помірної лейкопенії, нейропенії і еритроцитопенії.

Зростає роль штучних джерел ЕМП в формуванні електромагнітної

обстановки в виробничому та навколишньому середовищі, що є важливою передумовою для розробки методик прогнозування електромагнітних полів у робочій зоні і на території житлової забудови, визначення санітарно-захисних зон і застосування інших інженерно-технічних засобів по зниженню шкідливого впливу ЕМП на організм людини.

У містах різних країн світу поширеним залишається використання громадського електротранспорту, поряд з цим спостерігаються тенденції активного впровадження електромобілів. Незважаючи на мізерну частку електрокарів у світовому автопарку, ринок електромобілів набуває розвитку. У 2016 році інвестиції в цей сегмент в усьому світі склали \$ 2 млрд – це в два рази більше, ніж у 2015 році і на \$ 650 млн більше, ніж за три попередні роки разом узяті. Як відомо з початку десятиліття інвестиції в електричний транспорт не показували вражаючих результатів. У 2010–2012 роках вони становили \$ 800 млн в рік, у 2013 році інвестиції практично припинилися. Але завдяки успіхам компаній Tesla, Nicola Motor і популяризації електротранспорту, інвестиції почали зростати. Німецький концерн Daimler планує витратити € 10 млрд на створення 10 моделей електричних автомобілів до 2025 року та німецька компанія Volkswagen ставить перед собою мету – 30 моделей нових електромобілів до цього ж терміну при рівні продажів – мільйон електромобілів на рік. Масовий випуск електрокарів до 2020 року планує налагодити японська Toyota. Займатися розвитком електричного транспорту компанії стимулює влада країн. Екологічно чистий транспорт підтримують уряди таких країн, як США, Китай, Німеччина, Норвегія, Нідерланди та інші. Електромобілі будуть превалювати на дорогах починаючи з 2025 року. На сьогодні частка електрокарів на автомобільному ринку Китаю досягла 1,4 %, в США вона становить 1,1 %, в Європі – 1,2 %. Найбільш активно в поширення транспорту з нульовими викидами інвестує саме Німеччина. Навесні 2016 року уряд цієї країни оголосило про остаточне затвердження плану і бюджету програми розвитку електричного транспорту, яка обійдеться країні в € 900 млн. Німеччина поставила собі на мету випустити

на дороги 1 млн електромобілів до 2020 року, а також запропонувала Євросоюзу з 2030 року ввести заборону на продаж нових автомобілів з бензиновими і дизельними двигунами.

Перспектива розвитку електромобілів призведе до зростання потужності електричного поля на вулиці. Неоднорідність розподілу електромагнітного та електростатичного полів полягає в тому, що в деяких районах, на вулицях або проспектах їх фон змінюється у 5-7 разів і більше. Причинами цього є різний рельєф місцевості, різноповерхова забудова, різна потужність генеруючих джерел. Людина потрапляє в зони з різною напруженістю поля, тому повинні спрацьовувати механізми адаптації. Очевидно, що такий режим не є природним для людини, а отже, небезпечний.

Для захисту від електромагнітного поля розроблено спеціальні рекомендації щодо зниження напруженості електричного поля, що генерується системами розподілу і передачі електроенергії, наприклад: заземлити металевий дах, а на неметалевий дах встановлювати заземлену сітку; на відкритій місцевості можуть застосовуватися залізобетонні огорожі, тросові екрани або просто посадки дерев висотою більше 2 м. Прийнято наступні гранично допустимі значення напруженості електричного поля: всередині житлових будинків – 0,5 кВ/м; на території зони житлової забудови – 1 кВ/м; в населеній місцевості, поза зоною житлової забудови, а також на території городів і садів – 5 кВ/м; на ділянках перетину ПЛ з автомобільними дорогами I-IV категорії – 10 кВ/м; в населеній місцевості (незабудовані місцевості, хоча б і часто відвідувані людьми, доступні для транспорту, та сільськогосподарські угіддя) – 15 кВ/м; в важкодоступній місцевості, спеціально огороженій для виключення доступу населення – 20 кВ/м [62].

При напруженості електричного поля вище 1 кВ/м повинні бути вжиті заходи по виключенню впливу на людину відчутних електричних розрядів і струмів згідно з Державними санітарними нормами і правилами.

У зв'язку із зростанням та неоднорідністю напруженості електричного поля необхідні методики, які б дозволяли швидко прогнозувати рівень електричного напруження біля автомагістралей. Дуже важливо, щоб ці методики дозволяли виконувати прогноз з урахуванням об'єктів, що розташовуються вздовж автомагістралей, оскільки вони призводять до деформації еквіпотенціальних ліній напруженості електричного поля, а також самі можуть бути джерелами виникнення електричного поля. Це достатньо складна задача, оскільки потрібно виконувати розрахунки в області складної геометричної форми.

Для зниження інтенсивності ЕМП в робочій зоні рекомендується застосовувати різні інженерно-технічні засоби, а також організаційні і лікувально-профілактичні заходи. В якості інженерно-технічних методів і засобів застосовується: екранування випромінювачів, приміщень і робочих місць; зменшення напруженості і щільності потоку енергії в робочій зоні за рахунок зменшення потужності джерела (якщо дозволяють технічні умови) і використання послаблювачів потужності і узгоджених навантажень (наприклад, еквівалентів антен); застосування засобів індивідуального захисту [62].

При екрануванні використовуються такі явища як поглинання електромагнітної енергії (ЕМЕ) матеріалом екрана і її відображення від поверхні екрана. Поглинання обумовлюється тепловими втратами (ЕМЕ) в товщі матеріалу екрана за рахунок індукційних струмів і залежить від електромагнітних властивостей матеріалу екрана (електричної провідності, магнітної проникності і ін.). Відображення обумовлюється невідповідністю електромагнітних властивостей повітря (або іншого середовища, в якій поширюється електромагнітна енергія) і матеріалу екрана (головним чином, хвильових опорів).

Товщина екрана (d) з металевого листа вибирається відповідно до механічної міцності, але не менше 0,5 мм, і повинна бути більше глибини проникнення ЕМ хвилі в товщу екрана:

$$d \geq r = \frac{1}{\sqrt{\frac{\varpi \cdot \mu \cdot \sigma}{2}}}, \text{ Вт/м}^2,$$

де ϖ – кругова частота, рад/с; $\varpi = 2\pi f$, де f – частота, Гц; μ – магнітна проникність матеріалу, Г/м; σ – електрична провідність середовища, См/м.

Глибина проникнення ЕМП високих і надвисоких частот дуже мала (наприклад, для міді вона складає десятки і соті частки міліметра), тому товщину екрана вибирають з конструктивних міркувань.

Велика відбивна здатність металів, обумовлена значною невідповідністю хвильових опорів повітря і металу, в ряді випадків може виявитися небажаною, тому що в результаті виникнення стоячих хвиль може збільшуватися інтенсивність поля в робочій зоні і впливати на режим роботи генератора (випромінювача). Тому в подібних ситуаціях слід застосовувати екрани, переважно з малим коефіцієнтом відображення (1-3 %), тобто поглинаючі екрани. З цією метою використовуються радіопоглинаючі матеріали у вигляді тонких гумових килимків з провідними добавками, гнучких або жорстких листів поролону, просоченого відповідним складом, феромагнітні пластини. Металеві сітки, що застосовуються для екранування, мають гірші екрануючі властивості в порівнянні з листовими. Їх, звичайно, застосовують в тих випадках, коли необхідно проводити огляд і спостереження екранованих установок, вентиляцію та освітлення екранованого простору. Екрануюча ефективність сіток не перевищує 20–30 дБ. Необхідне ослаблення поля ($L_{необ}$) і ефективність екранування ($E_{екр}$) визначаються за формулами [62]:

$$L_{необ} = \frac{E_p}{E_{zd}} = \frac{H_p}{H_{zd}}, \quad E_{екр} = \left| \frac{E_2}{E_1} \right| = \left| \frac{H_2}{H_1} \right|,$$

$$E_{екр} = 10 \lg \frac{P_2}{P_1}, \quad E_{екр} = 20 \lg \frac{E_2}{E_1} = 20 \lg \frac{H_2}{H_1}, \text{ дБ},$$

де E_p , E_{zd} , H_p , H_{zd} – відповідно, напруженість електричного [В/м] і

магнітного поля $[(В \cdot с)/м^2]$ на робочому місці (або в житловій зоні) і гранично допустимі їх значення; E_1 , E_2 , H_1 , H_2 – відповідно, напруженість електричного і магнітного поля до і після екранування; Π_1 , Π_2 – щільність потоку енергії до і після застосування екрана $[Вт/м^2]$.

На відстані, рівній довжині хвилі λ , ЕМП в провідному середовищі майже повністю згасає, тому для ефективного екранування товщина стінки екрана повинна приблизно дорівнювати довжині хвилі в металі. Металеві екрани за рахунок відображення і поглинання практично непроникні для ЕМ енергії радіочастотного діапазону (при $d > \lambda$, де λ – довжина хвилі) [62, 145].

Захист відстанню застосовується в тих випадках, коли неможливо послабити опромінення іншими заходами, в тому числі і скороченням часу перебування людей в небезпечній зоні. У цьому випадку збільшення відстані між джерелами випромінювання і персоналом дозволяє знизити рівень випромінювання, що видно з нижче наведених виразів. Для розрахунку напруженості електричної і магнітної складових в ближній зоні, тобто на відстані $r \leq \lambda/2\pi$, де λ – довжина хвилі випромінювання, що дорівнює

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{f \cdot \sqrt{\epsilon \cdot \mu}}, \text{ використовуються залежності } E = \frac{I \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot r^3}, H = \frac{I \cdot l}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

[62, 145].

У дальній зоні $r \gg \lambda/2\pi$ при збільшенні даного відстані зменшується щільність потоку енергії $[Вт/м^2]$, як видно з наступної формули:

$$IPE = \frac{P \cdot G}{2\pi \cdot r^2},$$

де P – потужність випромінювання, Вт; G – коефіцієнт посилення.

Найбільш повна картина формування електромагнітного поля може бути отримана в наслідок інтегрування системи рівнянь Максвелла [145]. Розв'язання такої системи для простих областей виконується на основі аналітичних методів: розділення змінних, власних функцій, конформного відображення та інтегральних методів.

Вирішення системи рівнянь Максвелла для областей більш складної геометричної форми виконується на основі чисельних методів. Метод скінченних елементів (FDTDM), розроблений К.°Yee [241] простий та ефективний, але його важко застосовувати на неструктурованих сітках, адже виникає неточність представлення рішення на кривих границях та обмеженість порядку точності. Метод скінченних елементів використовується на глобальній сітці, що не має висячих (з'єднувальних) вузлів [213]. Метод Гальоркіна [197], що дозволяє легко обробляти елементи різних типів та форм. Варіаційно-інтеграційний метод (VIM) [239], запропонований J. He [240], базується на методі Лагранжа, а також застосування послідовного наближення функцій, що призводить до точного розв'язку. Цей метод є потужним інструментом для вирішення різних задач без необхідності дискретизації змінних, тому не викликає помилок округлення і не потребує великої комп'ютерної пам'яті та часу. Метод кінцевих різниць (FDM) був вперше розроблений A. Thom для вирішення нелінійних гідродинамічних рівнянь та знайшов застосування для розв'язання різних прикладних задач [226]. Методи кінцевих різниць засновані на наближеннях, які дозволяють замінити диференціальні рівняння на різницеві рівняння. Кінцеві різницеві апроксимації пов'язують значення залежної змінної в точці області зі значенням змінної в деяких сусідніх точках, включає в себе три кроки [227]: заміна області рішення на сітку вузлів; апроксимація даного диференціального рівняння кінцевими різницями; вирішення різницевих рівнянь згідно граничних та початкових умов.

Рівняння Максвелла зазвичай розв'язуються в диференціальній формі, тому є доцільним вирішувати їх методом кінцевих різниць. Аналізуючи роботи сучасних та зарубіжних авторів можна зробити висновок, що вирішення системи рівнянь Максвелла, як правило зводиться до розв'язання рівняння Лапласа або Пуассона. Викладено розв'язання рівняння Лапласа для електричного потенціалу в певній області простору з використанням чисельного методу кінцево-різничевої апроксимації, отримано криві рівня

електричного потенціалу біля пластини [209]. Розглянуто метод чисельного рішення диференціального рівняння Пуассона з метою розрахунку розподілу потенціалу електростатичного поля в двовимірній області. Проаналізовано приклади розв'язання задач в декартових і сферичних координатах [79]. Наведено огляд та порівняльний аналіз основних постановок задач розрахунку нестационарних тривимірних електромагнітних полів методом скінчених елементів. Розглянуті постановки базуються на використанні векторного магнітного потенціалу та інших потенціалів електромагнітного поля. Проаналізовано переваги та недоліки різних постановок задач [95]. Показано, що рівняння Пуассона є дуже потужним інструментом моделювання електростатичних систем, але може бути вирішене аналітично для дуже спрощених моделей. Отже, чисельний кінцево-різницевий метод дозволяє змодельовати поведінку потенціалу напруги та інтенсивності електричного поля для заданих тіл конкретної геометричної форми [215]. Виконано моделювання тримірних електромагнітних полів за допомогою потенціалів [181]. Для дослідження розподілу магнітного поля, а саме, вектору магнітної індукції, вектору напруженості і магнітного векторного потенціалу, а також основних електромагнітних характеристик, тобто індуктивності і електромагнітної сили електротехнічних пристроїв і систем використано програмний пакет ANSYS [2]. Електричний скалярний потенціал φ і значення векторного потенціалу після дискретизації і перетворення диференціальних рівнянь визначено із застосуванням ітераційного методу [72].

На відміну від існуючих методів, в даній дисертаційній роботі одержав подальшого розвитку метод оцінювання напруженості електричного поля в робочих зонах, розроблений на базі кінцево-різницевих методів, який дозволяє враховувати різні граничні умови та вплив перешкод різної геометричної форми на формування електричних полів.

1.6 Необхідність зволоження повітря в робочих зонах

Сухе повітря (СП) складається на 78 % з азоту, на 21 % з кисню і близько 1 % складають діоксид вуглецю, інертні та інші гази. Якщо в повітрі є водяні пари, то таке повітря називається вологим повітрям (ВП). Сухий атмосферне повітря відрізняється постійністю свого складу і його можна розглядати як однорідний газ. Стан однорідного газу зазвичай визначається двома параметрами – тиском і температурою, а при постійному тиску – тільки температурою [62].

Вміст у повітрі водяної пари не постійний. До основних параметрів вологого повітря відносять його температуру, ступінь насичення, вологовміст, тепловміст, щільність і наведений питомий обсяг.

Максимальна вологість (точка роси) характеризується максимальною кількістю вологи, що може перебувати в повітрі при певній температурі.

Абсолютна вологість характеризується фактичною кількістю вологи, що знаходиться в повітрі при певній температурі.

Відносна вологість – відношення абсолютної вологості до максимальної вологості при даних температурних умовах. Відносна вологість прийнята як показник у санітарних нормах.

Джерелами надлишкового вологовиділення можуть бути виробничі установки, в яких відбувається випаровування води (всілякі ванни, мийні машини та ін.). Особливо інтенсивне виділення вологи відбувається при нагріванні води або механічному її перемішуванні. Ще одним джерелом виділення вологи є організм працюючого. Кількість виділеної вологи знаходиться в залежності від характеру виконуваної роботи і температури.

Оптимальною є відносна вологість 40–60%. В повітрі, надмірно насиченому водяними парами, ускладнюється випаровування вологи з поверхні шкіри і легенів, що може різко погіршити стан і знизити працездатність людини [62].

Водяна пара в повітрі має такі ж властивості, як і в вільному від повітря

просторі. Як і в чистому вигляді, пар у повітрі може бути перегрітим (ненасиченим) і насиченим.

В даній роботі розроблено комплексну методологію оцінювання рівнів шкідливих чинників в робочих зонах на відкритій місцевості промислових підприємств, яка дозволяє прогнозувати вітровий режим, вологість та температуру в робочих зонах за наявності використання штучного зволожувача повітря з урахуванням процесу випаровування краплі.

1.7 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;

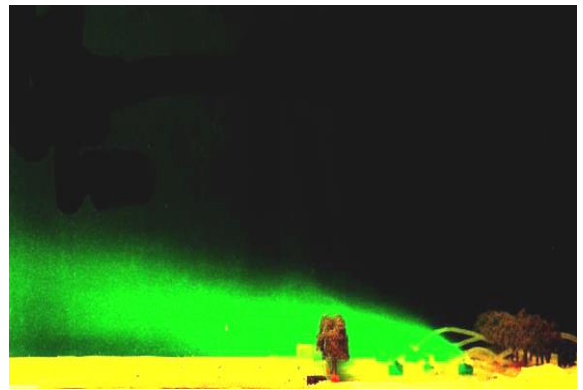
недоліки

- 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.

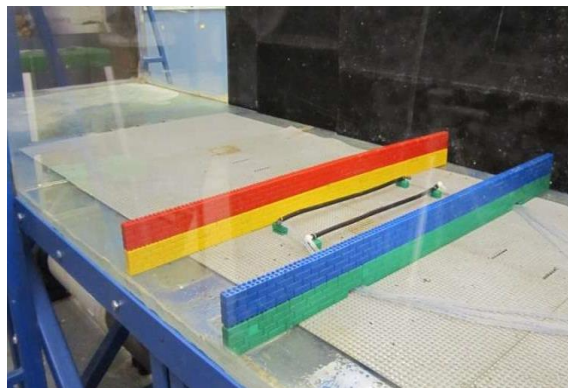
На рисунку 1.23 показано проведення лабораторних експериментів в аеродинамічній трубі [235].



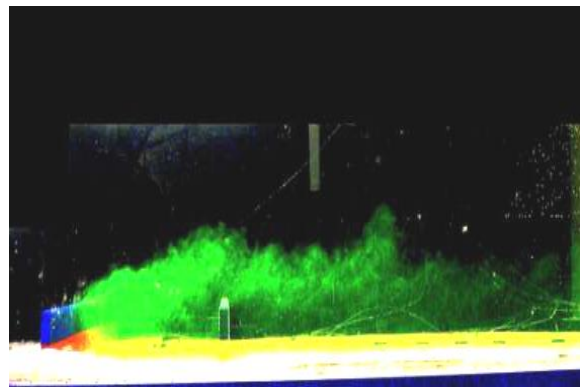
а



б



в



г

Рисунок 1.23 – Експериментальні дослідження в аеродинамічній трубці:
а – 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].

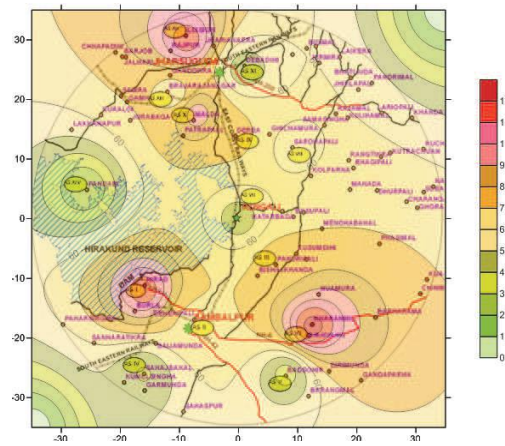


Рисунок 1.24 – Індекс якості повітря промислової зони [236]

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

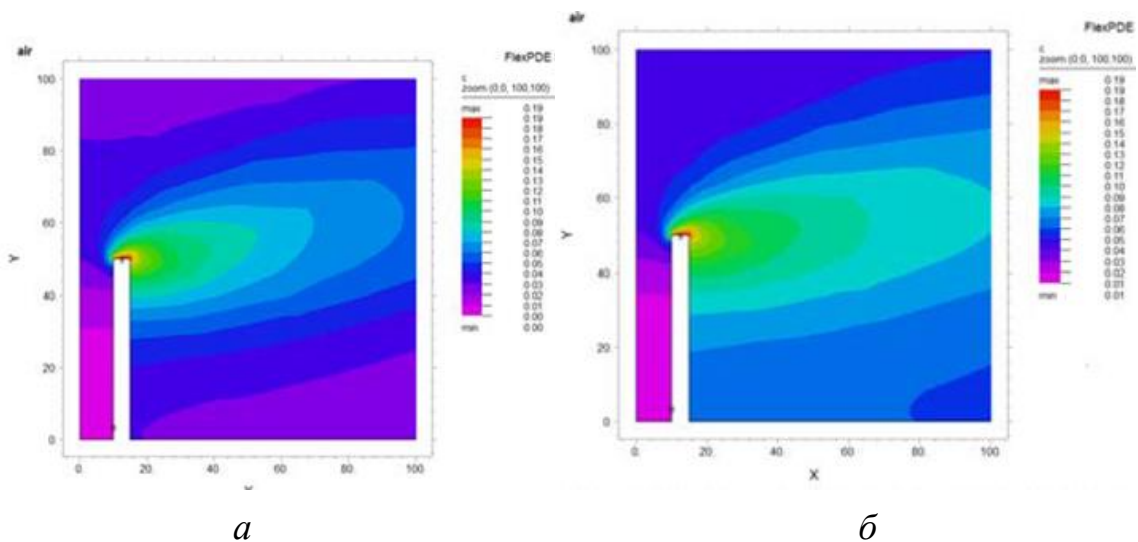


Рисунок 1.25 – Поле концентрації в різні моменти часу [206], 2015 р.:
 $t=50$ с, $t=100$ с

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].

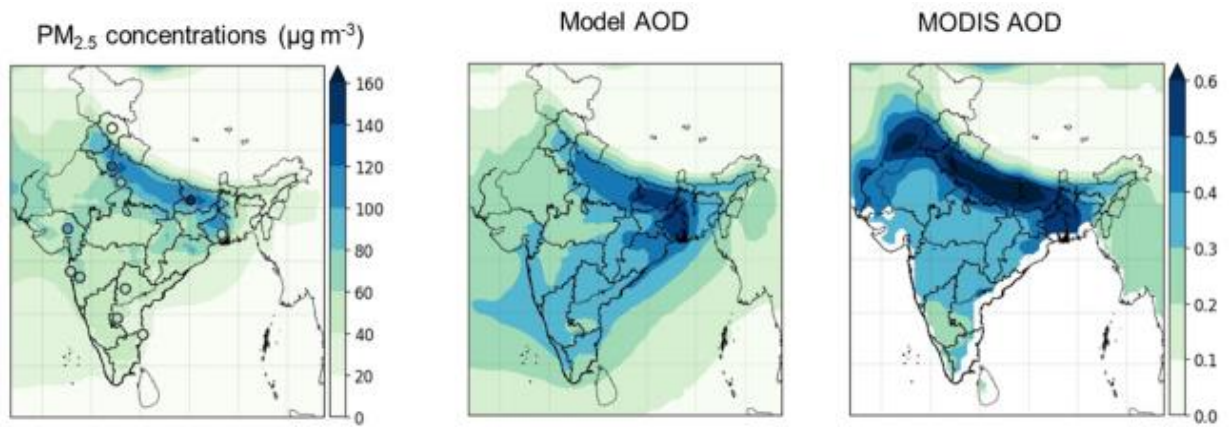


Рисунок 1.26 – Порівняння розрахункових даних із даними спостереження [234]

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).

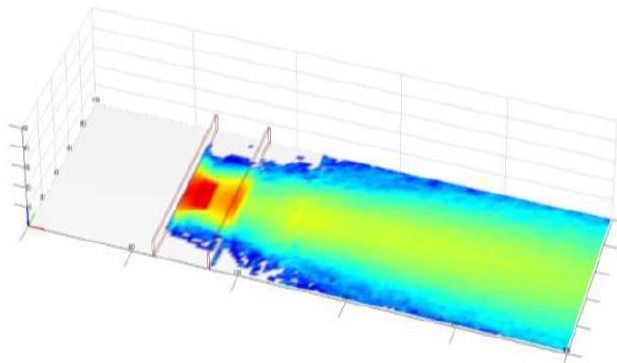


Рисунок 1.27 – Розподіл концентрації забруднення [235]

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, екранів та інше.

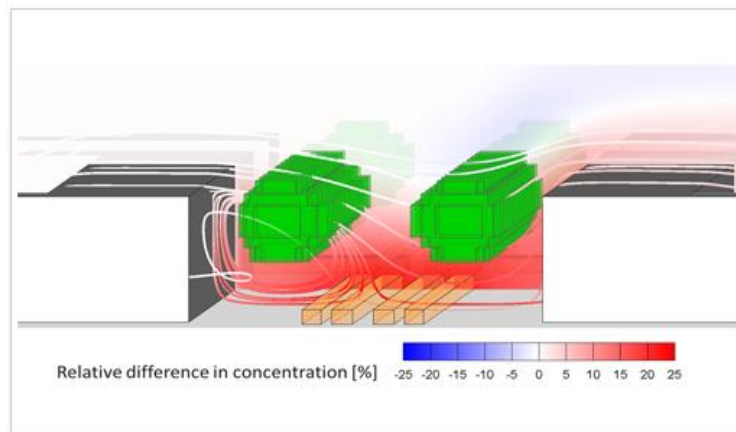


Рисунок 1.28 – CFD моделювання впливу міської рослинності на забруднення повітря і впливу шуму [195], Швеція

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).

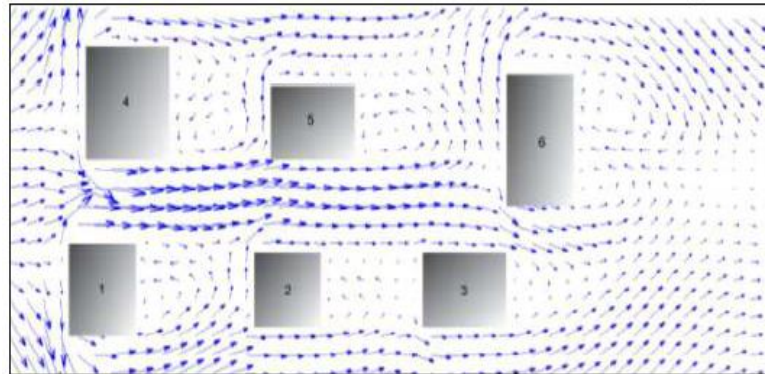


Рисунок 1.29 – Розрахунок поля швидкості на базі рівнянь Нав'є –Стокса [235]

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

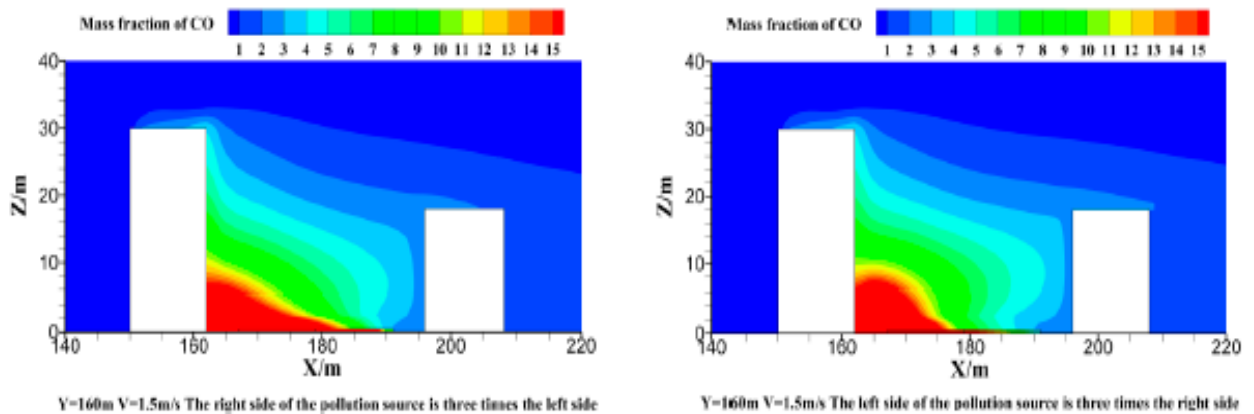


Рисунок 1.30 – Розподіл концентрації CO в зоні розташування будівель [193]

Повітря рухається з відносно низькою швидкістю і тому може вважатися нестисливим, 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, підстеляючої 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 необхідність розробки таких методів.

В дисертаційній роботі 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-різницевого методів, які застосовано для розв'язання рівнянь масопереносу та електромагнітного випромінювання.

Висновки до розділу 1

1. 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.

2. 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.

3. Проаналізовано підприємства міста Дніпра, що поділяються за сферою діяльності і є активними джерелами забруднення атмосферного повітря. Для більш детального аналізу було обрано три активних підприємства з великими викидами забруднювачів: Дніпровський металургійний завод «ЄВРАЗ», «Інтерпайп Нижньодніпровський трубопрокатний завод», «Дніпропетровський олійноекстракційний завод». Показано загальну кількість викидів підприємств у 2016 р. та 2017 р. та кількісні показники різних сполук за їх хімічною класифікацією, які надходять в атмосферу від даних підприємств. Доведено, що працівники на промислових майданчиках та на відкритій місцевості промислових регіонів потрапляють під довготривалий вплив викидів промислових підприємств.

4. 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.

5. Проаналізовано методи оцінювання ризику захворювань працівників в робочих зонах на промислових майданчиках та на відкритій місцевості промислових регіонів, що є однією з основних проблем в охороні праці. Показано підвищений ризик розвитку захворювань та виникнення несприятливих наслідків для людей даної категорії.

6. Аналіз літературних джерел класифікував методи оцінювання вітрового режиму в робочих зонах та методи зменшення забруднення повітря робочих зон працівників на промислових майданчиках за допомогою рослинності та відсмоктувачів. Для практичних розрахунків важливо мати методи, що дозволяють провести оцінку впливу рослинності та відсмоктувачів на зниження рівня забруднення повітря в робочих зонах.

7. Аналіз наукових праць показав, що забезпечення певною мірою іонізації повітряного середовища в робочій зоні є одним з найважливіших

чинників підтримання гарного самопочуття і високої працездатності робітників.

8. Проаналізовано природні і штучні джерела неіонізуючого електромагнітного випромінювання, способи і засоби зниження напруженості електричного поля. Розглянуто методи розв'язання рівнянь електростатики. Доведено необхідність розробки нових методів, які б дозволяли швидко прогнозувати рівень електричного напруження з урахуванням перешкод (екранів) та складної геометричної форми області.

9. 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 аналізу літературних джерел доведено необхідність розробки таких математичних методів прогнозу параметрів мікроклімату, які б задовольняли вимогам: зручність практичного застосування, невелика база вихідних даних, швидкість розрахунку, зручність в обробці і трактуванні кількісних результатів.

Основні положення розділу 1 опубліковані автором у наукових працях [17, 18, 19, 23, 24, 25, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 158, 159, 160, 161, 162, 223].

Список використаних джерел у розділі 1

Список використаних джерел у розділі 1 наведено у загальному списку використаних джерел [2, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 61, 63, 65, 66, 70, 72, 79, 81, 82, 89, 90, 92, 95, 100, 115, 116, 117, 120, 121, 124, 125, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 139, 140, 141, 142, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 161, 163, 164, 165, 167, 168, 169, 170, 171, 173, 176, 177, 178, 180, 181, 183, 184, 186, 187, 188, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 205, 206, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 220, 221, 222, 226, 227, 228, 229, 230, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 244, 245, 246, 247, 249, 251, 252].

РОЗДІЛ 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.

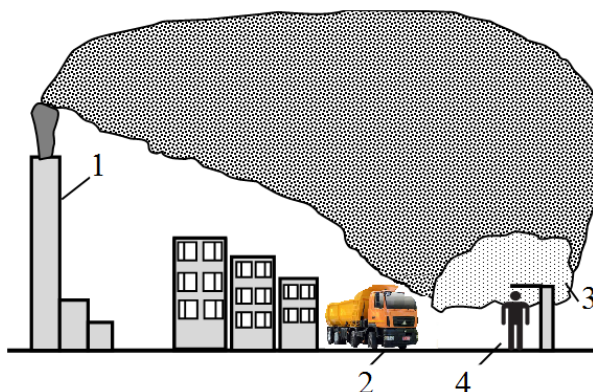


Рисунок 2.1 – Схема впливу викидів: 1 – промисловий об'єкт; 2 – автомагістраль; 3 – зона взаємовпливу викидів від 1 і 2; 4 – робоча зона працівника

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

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

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 землею 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.

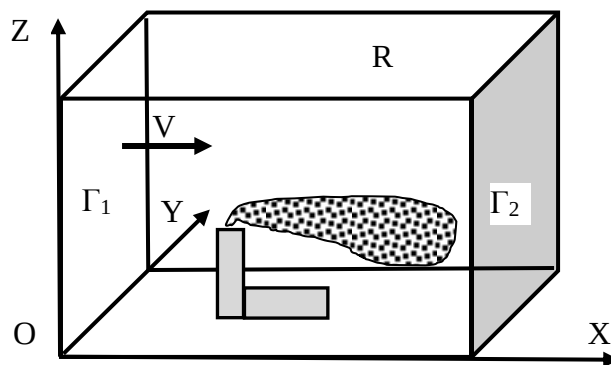


Рисунок 2.2 – Схема розрахункової області

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]:

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

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 недіагональні 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 $h = 50 \div 100 \text{ м}$ 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].

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

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 диференціальній формі [143].

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

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

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 $C_{ijk}^{n+1/2} = \frac{C_{ijk}^{n+1} + C_{ijk}^n}{2}$;

– другий крок розщеплення

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

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

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

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:

$$L_x^+ = \frac{u_{i+1,j,k}^+ C_{ijk} - u_{i,j,k}^+ C_{i-1,j,k}}{2\Delta x}, \quad L_x^- = \frac{u_{i+1,j,k}^- C_{i+1,j,k} - u_{i,j,k}^- C_{i,j,k}}{2\Delta x},$$

$$L_y^+ = \frac{v_{i,j+1,k}^+ C_{ijk} - v_{i,j,k}^+ C_{i,j-1,k}}{2\Delta y}, \quad L_y^- = \frac{v_{i,j+1,k}^- C_{i,j+1,k} - v_{i,j,k}^- C_{i,j,k}}{2\Delta y},$$

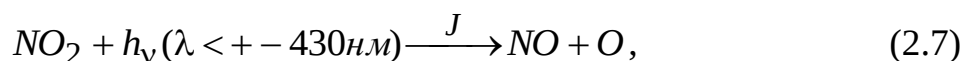
$$L_z^+ = \frac{w_{i,j,k+1}^+ C_{ijk} - w_{i,j,k}^+ C_{i,j,k-1}}{2\Delta z}, \quad L_z^- = \frac{w_{i,j,k+1}^- C_{i,j,k+1} - w_{i,j,k}^- C_{i,j,k}}{2\Delta z},$$

Позначення інших операторів співпадає з відповідними позначеннями.

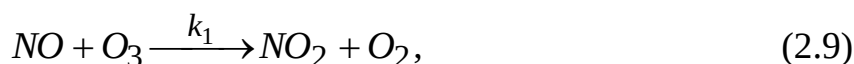
Найважливішу роль відіграє послідовність розв'язання рівнянь розщеплення. Інший порядок послідовного розв'язання рівнянь розщеплення для некомутативних диференціальних операторів забезпечує перший порядок точності.

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 ультрофіолетового випромінювання [1/s].



де k_1 – константа швидкості реакції для NO .

У незабрудненій атмосфері ці реакції призводять до наступної рівноваги (Marsili-Libelli, 1996): $\frac{J}{k_1} \xrightarrow{k_1} NO_2 + O_2$.

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).

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

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

$$\frac{\partial[O_3]}{\partial t} + \frac{\partial u[O_3]}{\partial x} + \frac{\partial v[O_3]}{\partial y} + \frac{\partial w[O_3]}{\partial z} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \frac{\partial [O_3]}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \frac{\partial [O_3]}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_z \frac{\partial [O_3]}{\partial z}). \quad (2.12)$$

де Q_{NO_i} – інтенсивність викиду NO від промислових підприємств або автотранспорту, $Q_{NO_{2i}}$ – 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 тонкоподрібнених твердих речовин – золи, що знаходиться в підвішеному стані в повітрі. Окисленню SO_2 також сприяє наявність у повітрі крапельок води, 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 різницева схема [143].

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

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

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

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

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

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

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:

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

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

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

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

Компоненти швидкості u визначаються на вертикальних гранях різницевих осередків, а компоненти швидкості v – на горизонтальних гранях.

Індекси цих граней відповідають індексам осередків, розташованих правіше або вище відповідної границі.

Другі похідні апроксимуються наступним чином:

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

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

$$\begin{aligned} \frac{[SO_2]_{i,j}^{n+1} - [SO_2]_{i,j}^n}{\Delta t} + L_x^+ [SO_2]^{n+1} + L_x^- [SO_2]^{n+1} + L_y^+ [SO_2]^{n+1} + \\ + L_y^- [SO_2]^{n+1} + \sigma [SO_2]_{ij}^{n+1} = (M_{xx}^+ [SO_2]^{n+1} + M_{xx}^- [SO_2]^{n+1} + \\ + L_{yy}^+ [SO_2]^{n+1} + L_{yy}^- [SO_2]^{n+1}) + q_{ij} \delta_{ij}. \end{aligned} \quad (2.24)$$

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 $k = \frac{1}{4}$,

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

– 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 $k = n + 1$, $c = n + \frac{3}{4}$,

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

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

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 $z = z_{ij} = \text{const}$ 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, представленій 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 втікання 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 напрямки 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 $P = U \cdot x + V \cdot y + \text{const}$, де U, V – проекції 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].

Різницеви рівняння в цьому випадку набувають вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{P_{i,j,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^n}{0,5\Delta\eta} = & \frac{P_{i+1,j,k}^n - P_{i,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2} + P_{i-1,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + \\ & + \frac{P_{i,j+1,k}^n - P_{i,j,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2} + P_{i,j-1,k}^{n+1/2}}{\Delta y^2} + \\ & + \frac{P_{i,j,k+1}^n - P_{i,j,k}^n}{\Delta z^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2} + P_{i,j,k-1}^{n+1/2}}{\Delta z^2}, \end{aligned} \quad (2.28)$$

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

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 рефлексорних 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/м³. 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 розроблюваних 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 рис. 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 $V_{\text{п}}=0,8\text{--}1,1$ м/с, а швидкість газового потоку $V_{\text{г}}=1,65\text{--}1,85$ 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 $Q = V_{\text{г}} \cdot S \cdot C$, де $V_{\text{г}}$ – 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 $V_{\text{г}}$ 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 прилеглий 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 галузових призначень, сталь М, сталь 60С2А3Б;
- 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

дугтя 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>
- 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 цехів із залізнично-під'їзними коліями, де виконуються розвантажувально-навантажувальні роботи. На кожному з цих майданчиків в одну зміну працює від 6 до 10 чоловік.

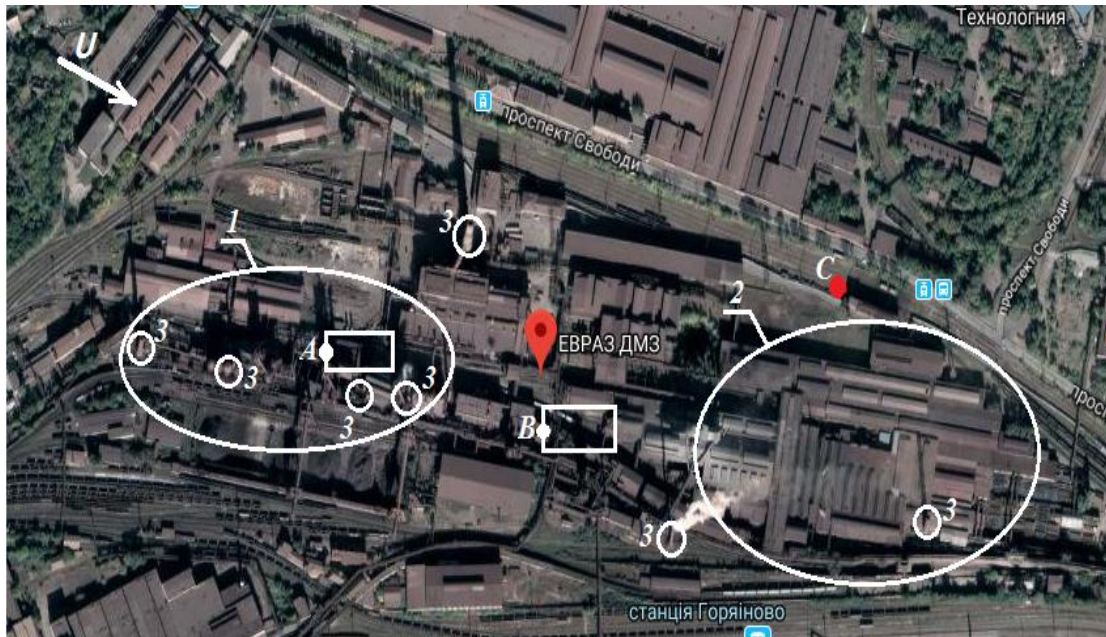


Рисунок 2.5 – Вид моделюючої області (Google Earth Image, 2019): Дніпропетровський металургійний завод ДМЗ ЄВРАЗ (завод ім. Петровського): 1 – територія доменного цеху; 2 – територія прокатного цеху №1; 3 – джерела викиду забруднюючих речовин; А, В – розрахункові точки промислових майданчиків; С – точка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

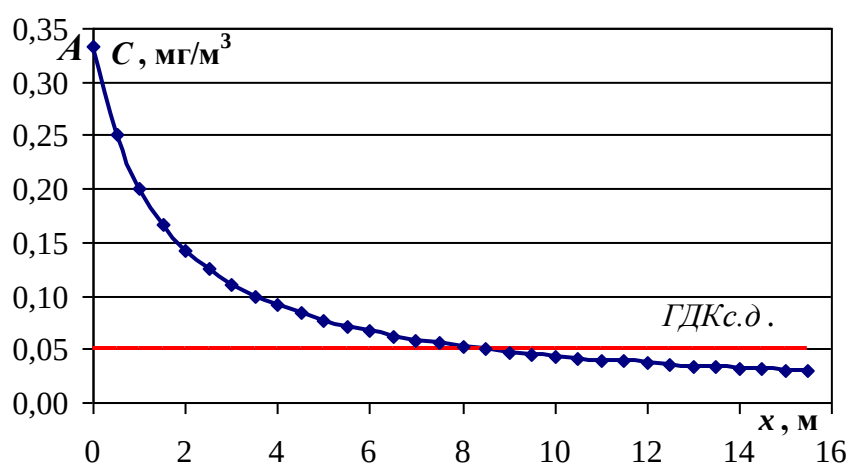


Рисунок 2.6 – Розподіл концентрації діоксиду сірки на території промислового майданчика доменного цеху Дніпропетровського металургійного заводу ДМЗ ЄВРАЗ

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 ГДКс.д. , за точку початку відліку приймався початок промислового майданчика – точка А 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 $C_{\max} = 0,3426 \text{ мг/м}^3$, 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, $мг/м^3$; nn – 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 *A* на території промислового майданчика доменного цеху (табл. 2.6).

Таблиця 2.6 – Кількісні розрахунки сумарного показника забруднення $(ПЗ_{\Sigma})_A$ в розрахунковій точці *A* 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	
- 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	
Синильна 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 *A* 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 $(ПЗ_{\Sigma})_{сер.} = 6,4$.

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

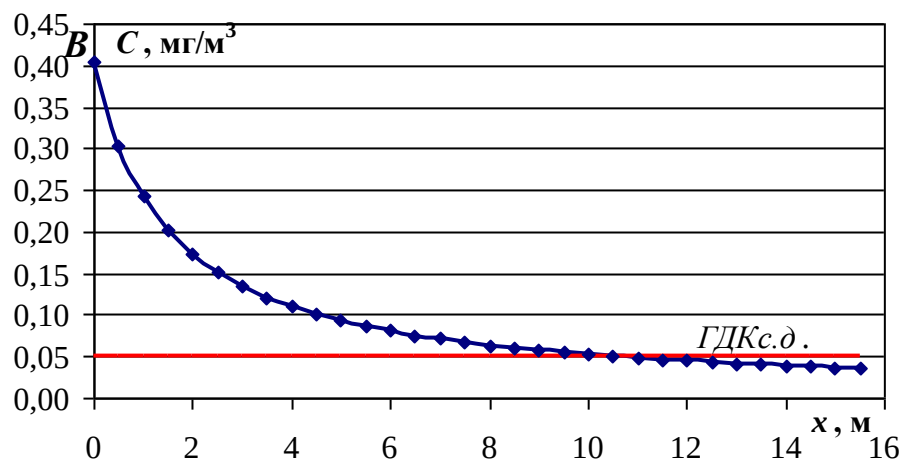


Рисунок 2.7 – Розподіл концентрації діоксиду сірки на території промислового майданчика прокатного цеху №1 Дніпропетровського металургійного заводу ДМЗ ЄВРАЗ

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 $ГДК_{м.р.} = 0,5 \text{ мг/м}^3$, 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	$1,2 \cdot 10^{-6}$	
- 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 $(ПЗ_{\Sigma})_B$ в розрахунковій точці B 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 $(ПЗ_{\Sigma})_{сер.} = 7,2$.

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

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).

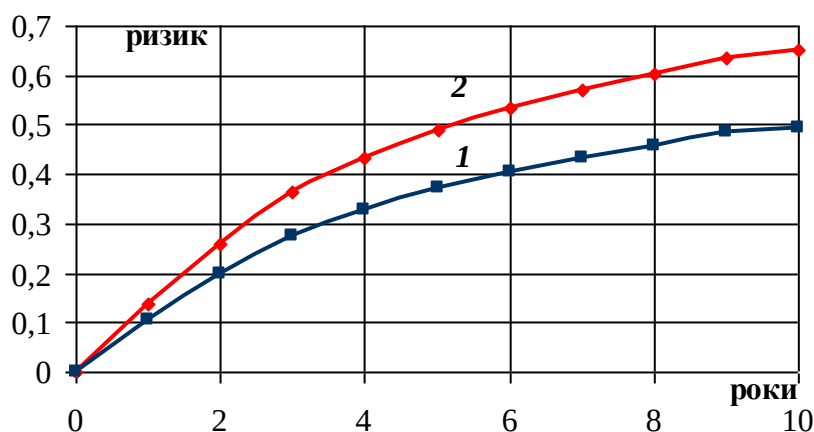


Рисунок 2.8 – Зміна ризику хронічної інтоксикації діоксидом сірки на території Дніпропетровського металургійного заводу ДМЗ ЄВРАЗ: 1 – доменний цех; 2 – прокатний цех № 1

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.

Комбінований ризик визначався 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.

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

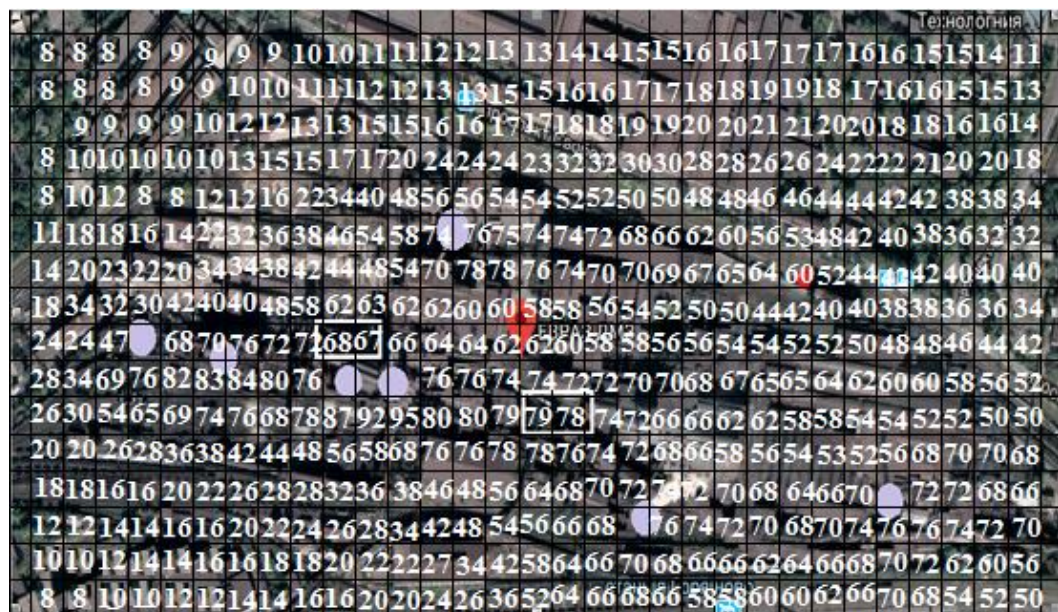


Рисунок 2.9 – Матриця комбінованого ризику виникнення хронічних захворювань у робітників на території металургійного заводу ДМЗ ЄВРАЗ

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. С – 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).

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.

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, °С	17	18	19

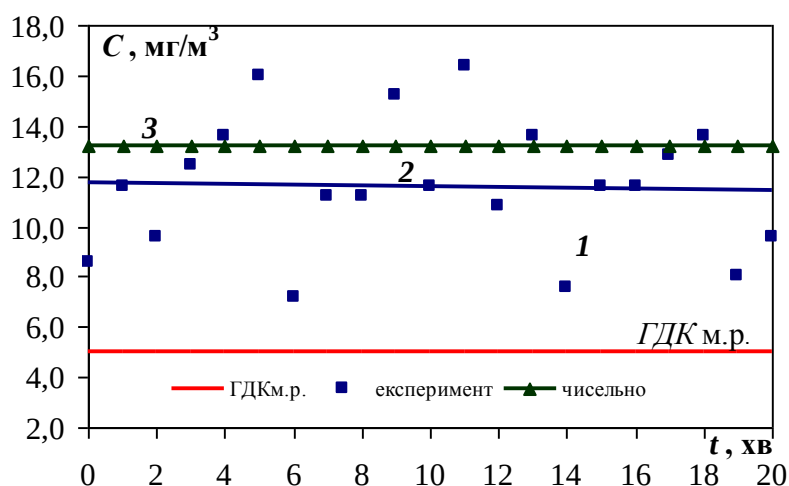


Рисунок 2.10 – Зміна концентрації CO з часом в точці спостереження: 1 – експеримент; 2 – лінія тренду для експериментальних даних; 3 – розрахунок за розробленим методом

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 в продовж 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 приймалось 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 .

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

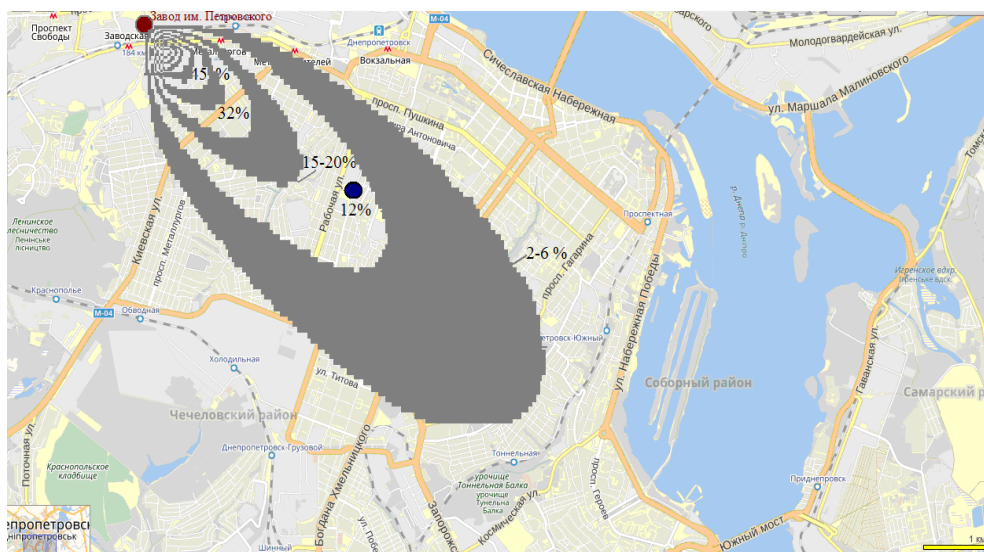


Рисунок 2.11 – Зона забруднення діоксидом сірки при направленні вітру $\alpha=120^\circ$, одне джерело забруднення (ЄВРАЗ ДМЗ)

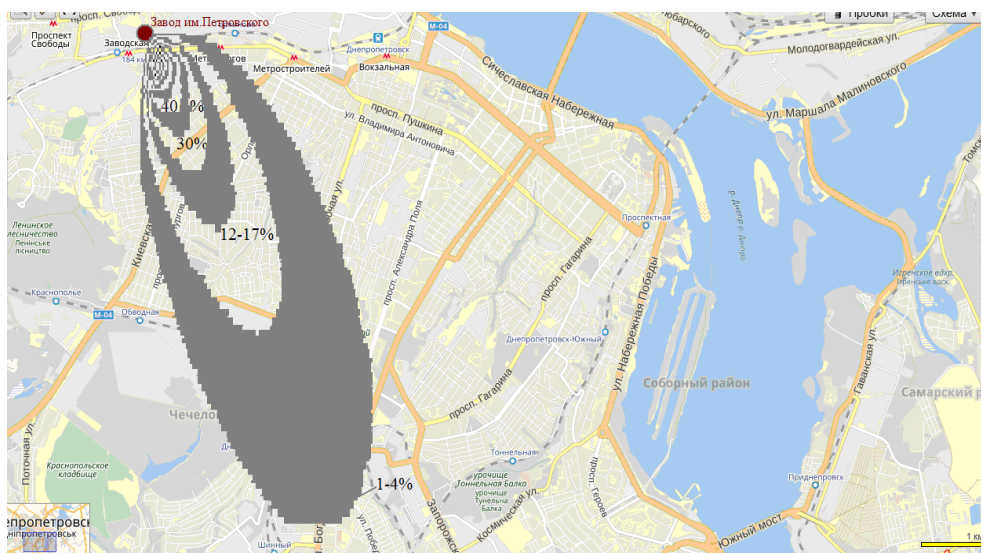


Рисунок 2.12 – Зона забруднення діоксидом сірки при направленні вітру $\alpha=160^\circ$, одне джерело забруднення (ЄВРАЗ ДМЗ)

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, вагоноперекидачі, 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, <i>CO</i>	269,933	272,878
Діоксид вуглецю, <i>CO₂</i>	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 леткі 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.

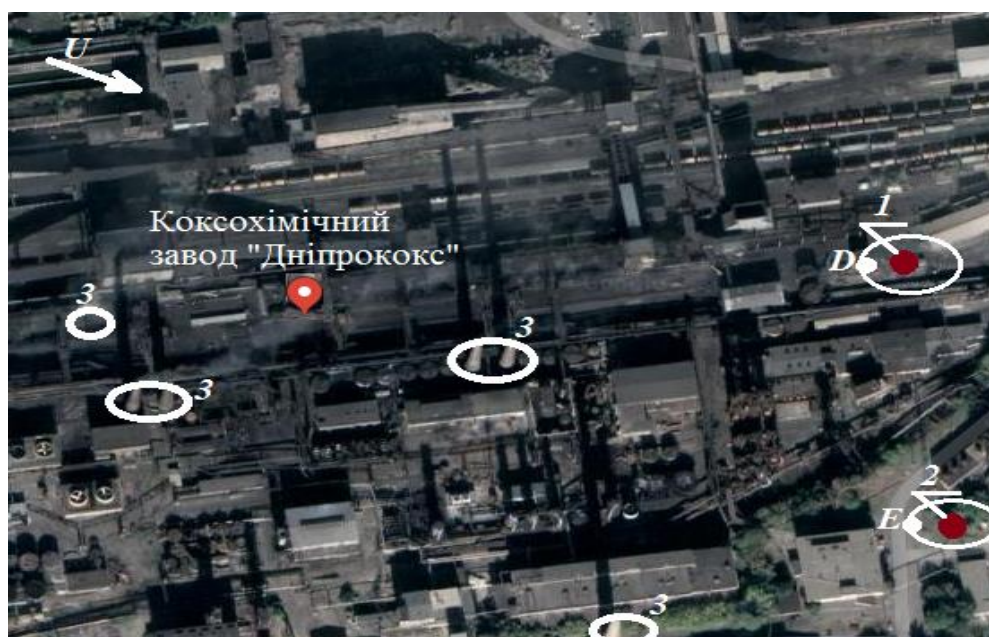


Рисунок 2.13 – Вид моделюючої області (Google Earth Image, 2019): коксохімічний завод «Дніпрококс»: 1 – майданчик ремонтного цеху; 2 – майданчик автотранспортного цеху; 3 – джерела викиду забруднюючих речовин

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.

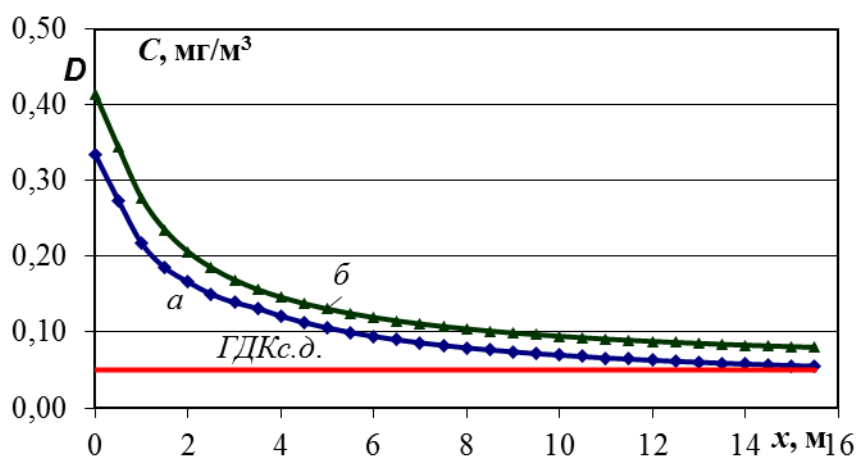


Рисунок 2.14 – Розподіл концентрації діоксиду сірки на території промислового майданчика ремонтного цеху заводу «Дніпрококс»: *а* – враховуються викиди одного коксохімічного заводу; *б* – враховуються викиди двох заводів

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 $(ПЗ_{\Sigma})_D$ 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	$ПЗ_i$	$\sum_{i=1}^n ПЗ_i$
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 $ПЗ_{SO_2} = 0,6374 = 63,74 \%$ 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 $(ПЗ_{\Sigma})_D$ сумішшю 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 $(ПЗ_{\Sigma})_{\text{сер.}} = 3,8$.

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.

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 $(ПЗ_{\Sigma})_{\text{сер.}} = 4,9$.

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	
<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;	0,00548	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	
Синильна 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	

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 $ГДК_{с.д.}$, за точку початку

відліку приймався початок промислового майданчика – точка E і в напрямку осі Ox розглядалася територія майданчику довжиною 16 м.

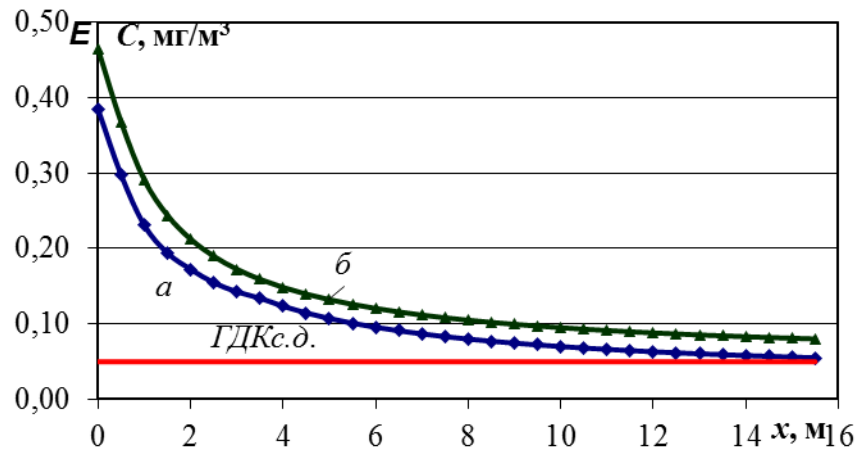


Рисунок 2.15 – Розподіл концентрації діоксиду сірки на території промислового майданчика автотранспортного цеху заводу «Дніпрококс»: a – враховуються викиди одного коксохімічного заводу; b – враховуються викиди двох заводів

Максимальна концентрація $C_{\max}=0,3569 \text{ мг/м}^3$, тоді показник забруднення $ПЗ_{SO_2}=0,7139=71,39\%$ з урахуванням викиду тільки одного коксохімічного заводу. $C_{\max}=0,4641 \text{ мг/м}^3$, тоді показник забруднення $ПЗ_{SO_2}=0,9281=92,81\%$ 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.

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 $(ПЗ_{\Sigma})_{сер.}=4,3$.

Таблиця 2.12 – Кількісні розрахунки сумарного показника забруднення $(ПЗ_{\Sigma})_E$ 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 D)	K_i / клас небезпечності	$ГДК_i$, мг/м ³	$ПЗ_i$	$\sum_{i=1}^n ПЗ_i$
Оксид вуглецю, CO	8,773	0,177	1,1/4	5	0,0324	4,921=492 %
Діоксид вуглецю, CO_2	5486,275	1261,5869	1,0/3	-	-	
<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;	0,00548	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	

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.

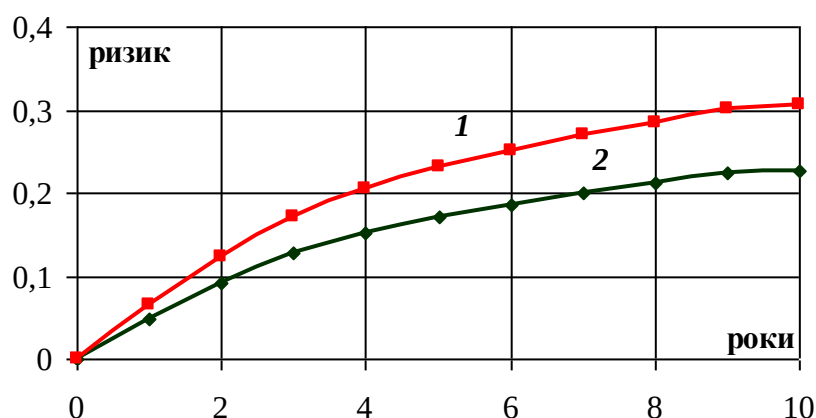


Рисунок 2.16 – Зміна ризику хронічної інтоксикації діоксидом сірки на території промислового майданчика ремонтного цеху коксохімічного заводу «Дніпрококс»: 1 – з урахуванням викидів двох підприємств; 2 – з урахуванням викидів лише заводу «Дніпрококс»

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 %.

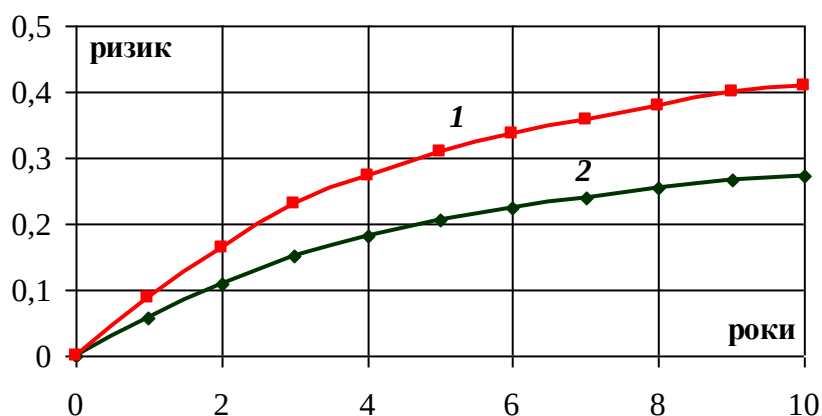


Рисунок 2.17 – Зміна ризику хронічної інтоксикації діоксидом сірки на території промислового майданчика автотранспортного цеху коксохімічного заводу «Дніпрококс»: 1 – з урахуванням викидів двох підприємств; 2 – з урахуванням викидів лише заводу «Дніпрококс»

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].

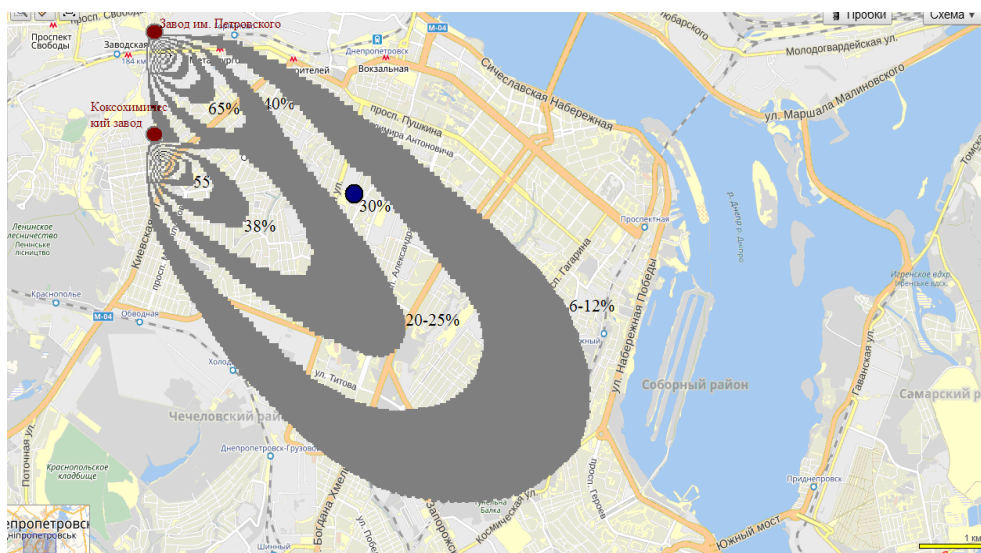


Рисунок 2.18 – Зона забруднення діоксидом сірки при направленні вітру з північного заходу $\alpha=120^\circ$, два джерела забруднення (заводи ім. Петровського і «Дніпрококс»)

Хмара забруднення охоплює: пр. Свободи, пр. Мазепи, 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 $C_{max}=0,3426$ мг/м³), а при наявності другого джерела

забруднення – коксохімічного заводу (рис. 2.12), концентрація в даній точці збільшується і становить 30 % від ($C_{max}=0,4043$ мг/м³). Розрахунки проводилися на висоті $z=1,7$ 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).

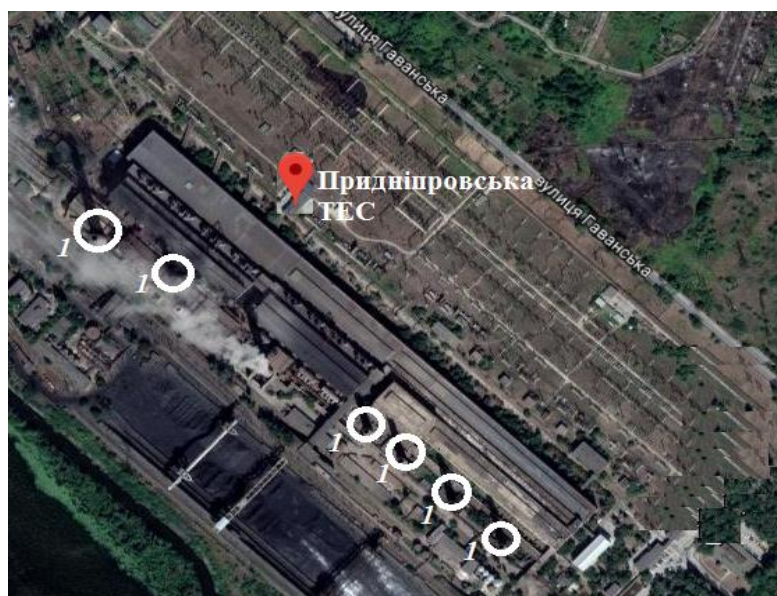


Рисунок 2.19 – Вид моделюючої області (Google Earth Image, 2019): Придніпровська ТЕС: 1 – місця викиду забруднюючих речовин (труби)

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

Продовження таблиць 2.14

1	2	3
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
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].

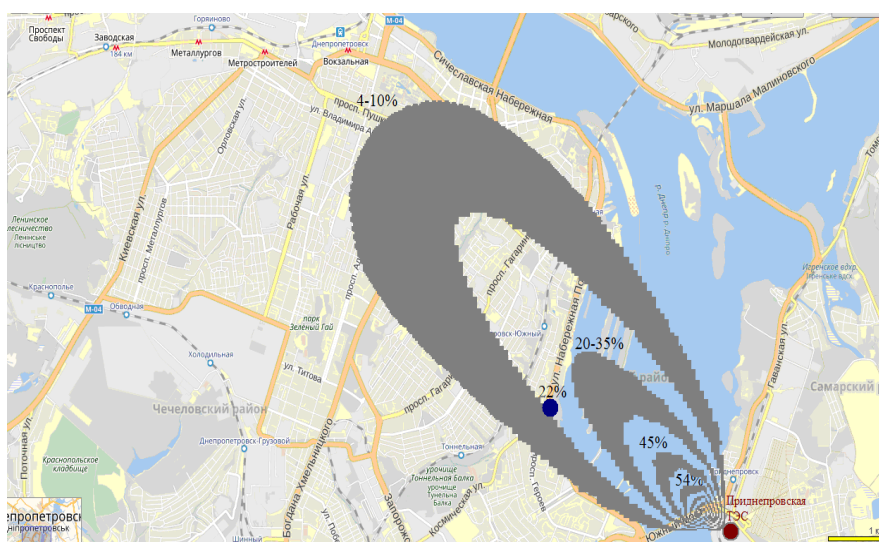


Рисунок 2.20 – Зона забруднення діоксидом сірки при направленні вітру з північного заходу $\alpha=20^\circ$ при роботі Придніпровської ТЕС

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), колесопркатний 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.

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
Діоксид та інші сполуки сірки (загальна кількість):	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
Хлор (загальна кількість):	0,036	0,037

Продовження таблиць 2.15

1	2	3
водню хлорид (соляна кислота за молекулою HCL	0,036	0,037
Фтор та його сполуки:	0,250	0,317
Фтористий водень	0,038	0,050
Фреони	0,010	0,010

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

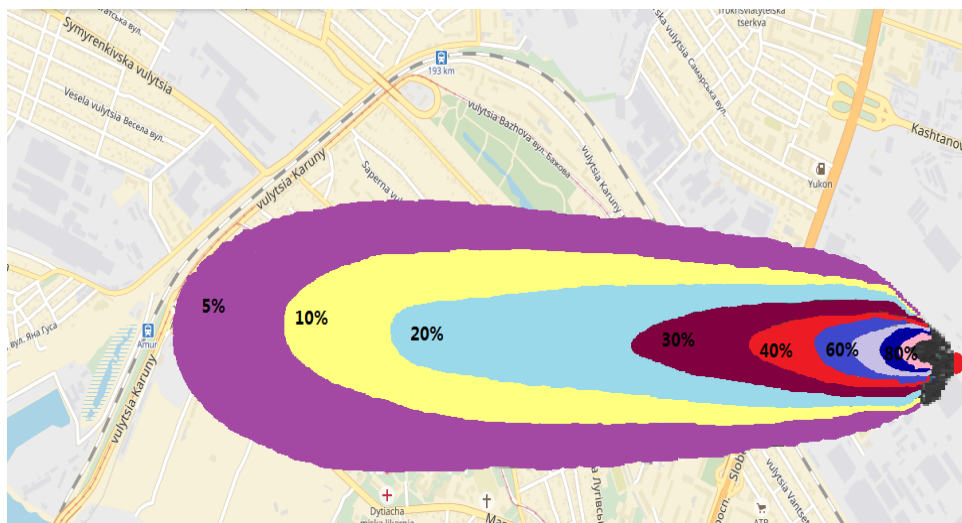


Рисунок 2.22 – Зона забруднення діоксидом азоту з рахуванням одного джерела забруднення – промислового підприємства «Інтепайп»

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. Столстова – 80 %, вул. Бажова і вул. Військова – 70 %, вул. Смарагдова 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].

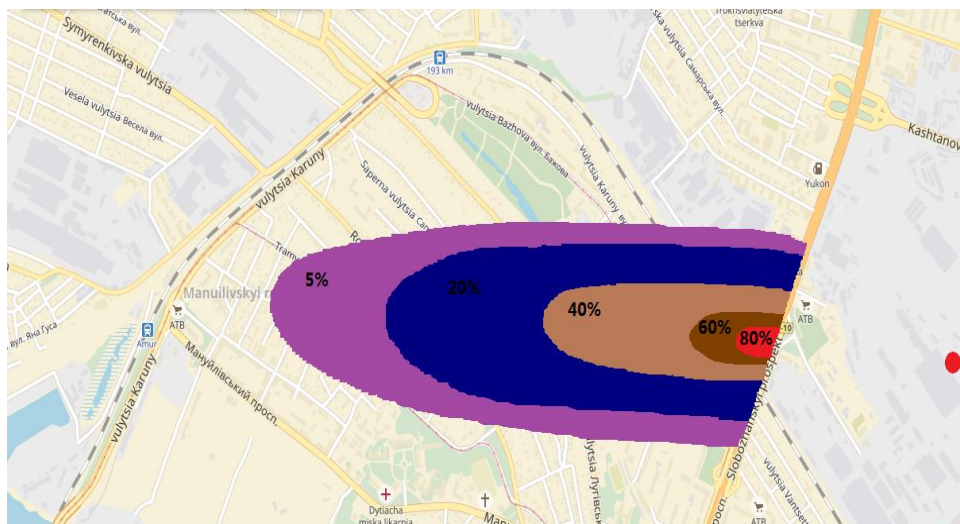


Рисунок 2.23 – Зона забруднення діоксидом азоту з урахуванням одного джерела забруднення – автомагістралі Слобожанський проспект

В зону забруднення потрапляють: вул. Бажова і вул. Військова – 80 %, вул. Смарагдова 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].

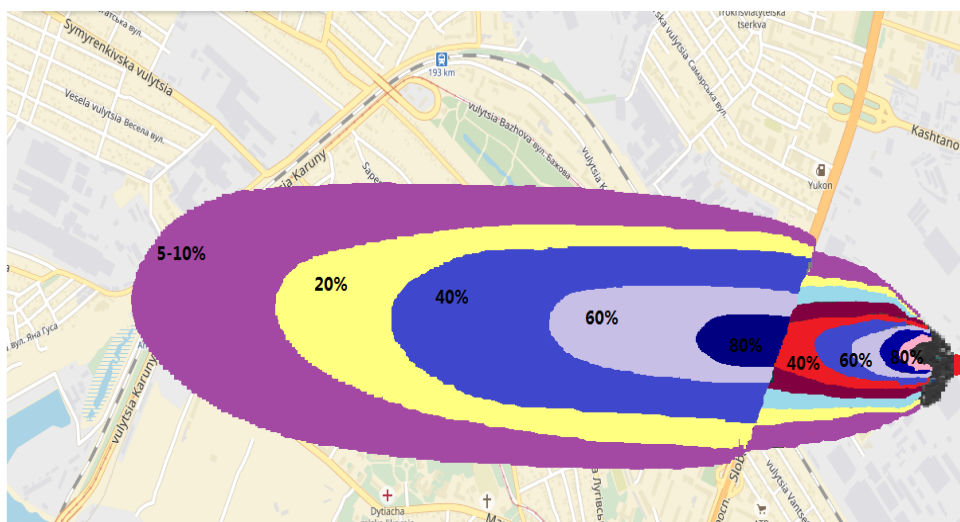


Рисунок 2.24 – Зона забруднення діоксидом азоту з урахуванням двох джерел забруднення – промислового підприємства і автомагістралі

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 забруднення 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].

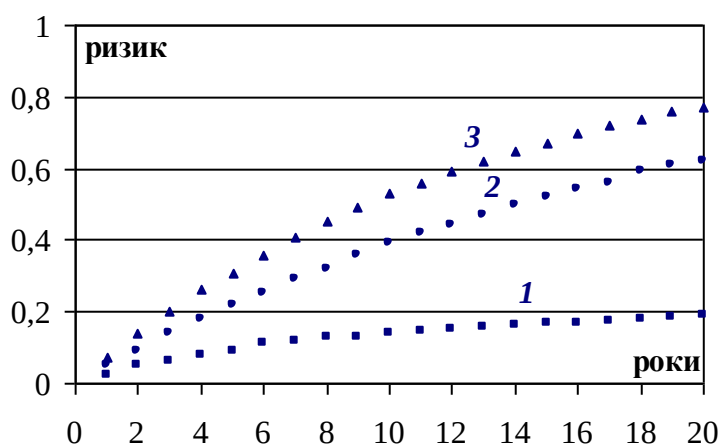


Рисунок 2.25 – Зміна ризику хронічної інтоксикації діоксидом азоту: 1 – з урахуванням викидів автомагістралі; 2 – з урахуванням викидів підприємства; 3 – з урахуванням викидів автомагістралі і підприємства

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 урахуванням викидів автомагістралі і підприємства, що призводить до отримання більш об'єктивних результатів розрахунку.

Розроблений метод комплексного оцінювання ризику виникнення хронічних захворювань у робітників було використано як для локальних розрахунків (у конкретних точках) так і для території промислового об'єкту «Інтерпайп» площиною 540 м на 500 м. Вирішувалася задача оцінювання ризику при наявності низьких викидів, що відбуваються на корпусі цеху 1 та 2 з інтенсивністю викидів NO_2 : $Q_1=0,082$ г/с та $Q_2=0,041$ г/с. Числові значення ризику наведено у відсотках. Використовувалася матриця концентрації на висоті $z=1,7$ м (рис. 2.26).

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	2	3	4	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	59	26	10	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	2	85	88	90	90	81	54	30	14	6	2	1	0	0	0	0	0	0	0
0	2	75	92	96	98	90	73	51	31	17	8	4	1	0	0	0	0	0	0
0	1	49	79	91	96	93	83	68	48	31	18	9	5	2	1	0	0	0	0
0	1	30	63	82	92	93	88	78	63	46	30	18	10	6	3	1	0	0	0
0	0	17	47	71	85	90	90	84	73	59	44	30	22	16	9	5	2	1	1
0	0	10	32	57	76	86	88	86	80	69	56	44	62	31	14	6	6		
0	0	5	21	44	65	79	85	86	83	76	66	56	87	95	80	56	33	17	17
0	0	3	14	32	54	70	80	85	84	80	73	65	80	90	85	70	51	33	33
0	0	1	8	23	42	60	74	81	83	82	78	72	78	86	86	78	64	48	48
0	0	1	5	15	32	50	65	76	81	82	80	76	78	84	85	82	73	60	60
0	0	0	3	10	23	40	56	69	77	81	81	79	79	82	85	84	78	69	69
0	0	0	2	7	16	31	47	61	72	78	80	80	80	82	84	85	82	76	76
0	0	0	1	4	11	23	38	53	65	74	78	80	81	82	84	85	84	80	80
0	0	0	0	2	8	17	30	44	58	68	75	79	81	82	84	85	85	83	83
0	0	0	0	1	5	12	23	36	50	62	70	76	79	82	84	85	86	85	85
0	0	0	0	1	3	8	17	29	42	55	65	72	77	81	83	85	86	86	86
0	0	0	0	0	2	6	12	22	35	47	59	68	74	79	82	84	86	86	86
0	0	0	0	0	1	4	9	17	28	40	52	62	70	76	80	83	85	87	87
0	0	0	0	0	1	2	6	13	22	33	45	56	65	72	78	82	85	86	86
0	0	0	0	0	0	1	4	9	17	27	39	50	60	68	75	80	83	86	86
0	0	0	0	0	0	1	4	9	17	27	39	50	60	68	75	80	83	86	86

Рисунок 2.26 – Матриця ризику виникнення хронічних захворювань у робітників на території промислового об'єкту «Інтерпайп»

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

В подальших дослідженнях виконувалася оцінка впливу викидів ПАТ на прилеглу територію Південного гірничо-збагачувального комбінату (Південного ГЗК), розташованого в південній частині міста Кривого Рогу Дніпропетровської області, великого промислового центру і залізничного вузла 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 елементу 3 мг/м^3 , максимальна разова – 5 мг/м^3 .

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 $Q=1281,56 \text{ г/с}$. 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 $0,058 \text{ г/с}$, 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].

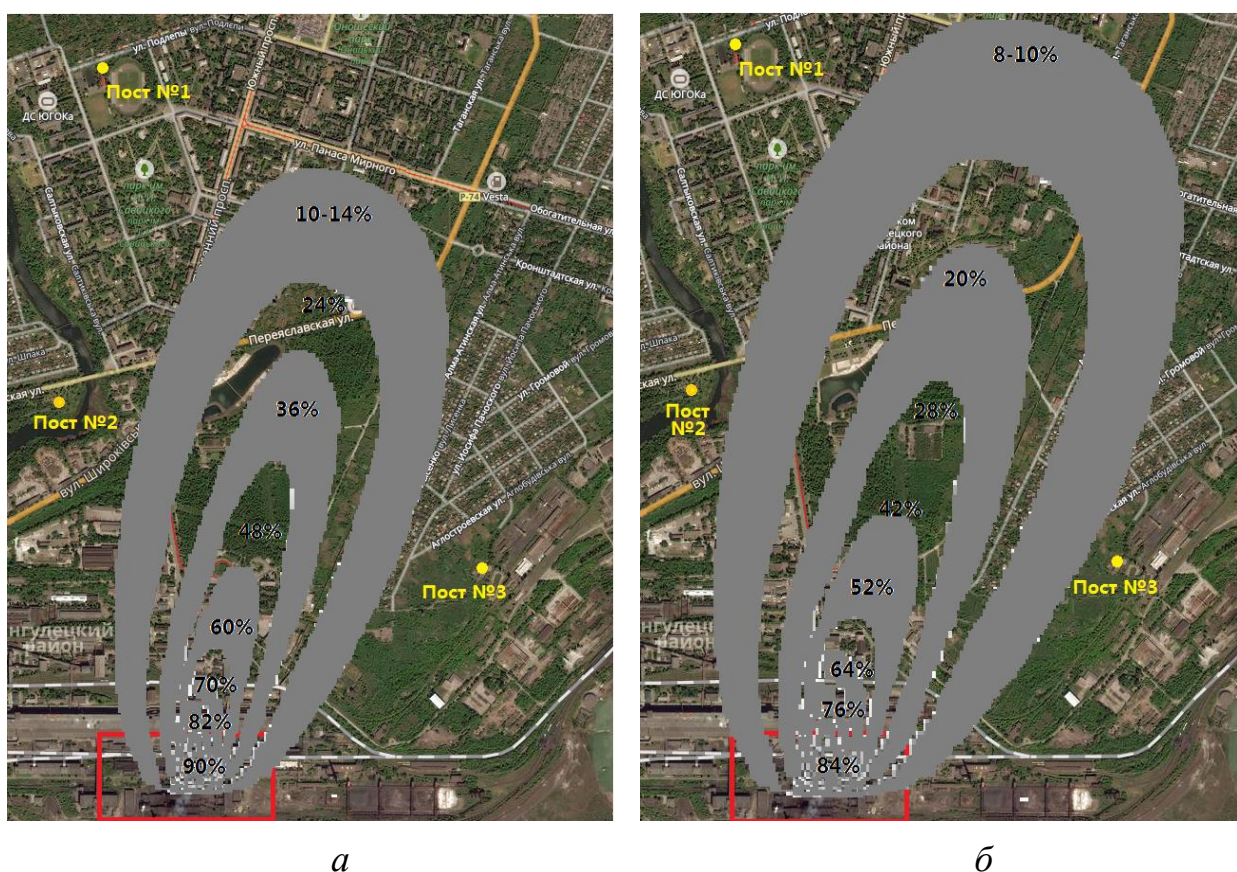


Рисунок 2.27 – Зона забруднення оксидом вуглецю, джерело забруднення – гірничо-збагачувальний комбінат: а) $U=6$ м/с; б) $U=9$ м/с

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].

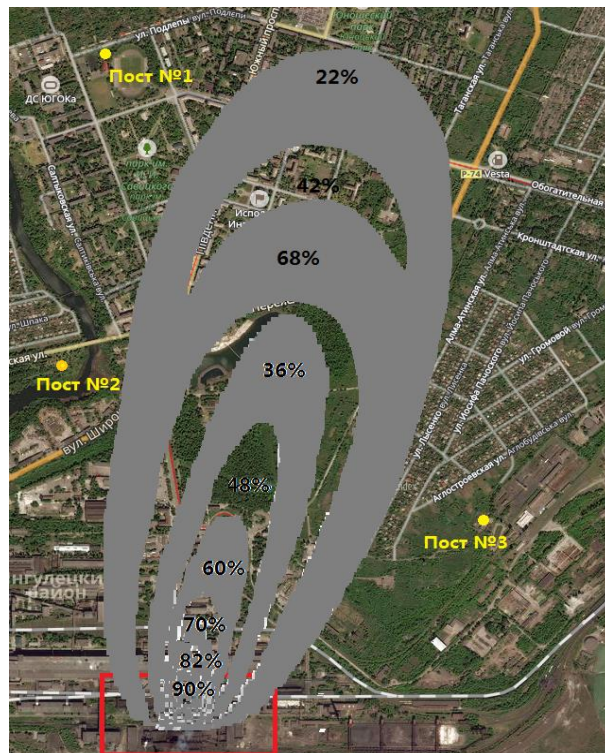


Рисунок 2.28 – Зона забруднення оксидом вуглецю, джерело забруднення – гірничо-збагачувальний комбінат і автомагістраль $U = 6$ м/с

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].

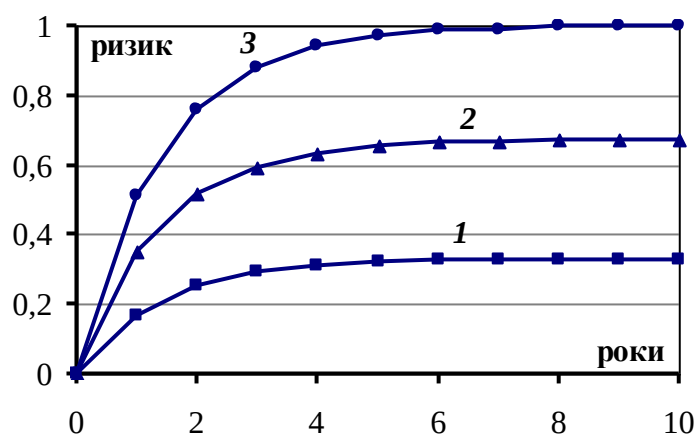


Рисунок 2.29 – Зміна ризику хронічної інтоксикації оксидом вуглецю: 1 – з урахуванням викидів автомагістралі; 2 – з урахуванням викидів комбінату; 3 – з урахуванням викидів комбінату і автомагістралі

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 %.

Висновки до розділу 2

1. 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.

2. 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.

3. Метод дозволяє оцінити вплив величини і напрямку швидкості вітру, вертикального коефіцієнту дифузії, специфіку хімічних перетворень забруднюючих речовин на їх розсіювання в повітряному середовищі.

4. Створено програмний пакет, що дозволив провести ряд обчислювальних експериментів з розрахунку зон забруднення повітря з урахуванням різної кількості джерел забруднення та їх типу зважаючи на хімічні перетворювання в повітрі.

5. 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 проектуванні 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.

Основні положення розділу 2 опубліковані автором у наукових працях [17, 18, 19, 23, 24, 25, 27, 31, 32, 33, 38, 39, 43, 44, 45, 46, 48, 108, 110, 112].

Список використаних джерел у розділі 2

Список використаних джерел у розділі 2 наведено у загальному списку використаних джерел [1, 3, 5, 6, 7, 8, 17, 18, 19, 27, 31, 32, 33, 35, 38, 39, 44, 45, 46, 49, 50, 61, 62, 63, 67, 68, 69, 74, 80, 82, 83, 84, 85, 87, 88, 89, 92, 93, 94, 96, 97, 98, 104, 105, 108, 110, 112, 113, 114, 118, 135, 143, 144, 157, 159].

РОЗДІЛ 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 діб, 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].

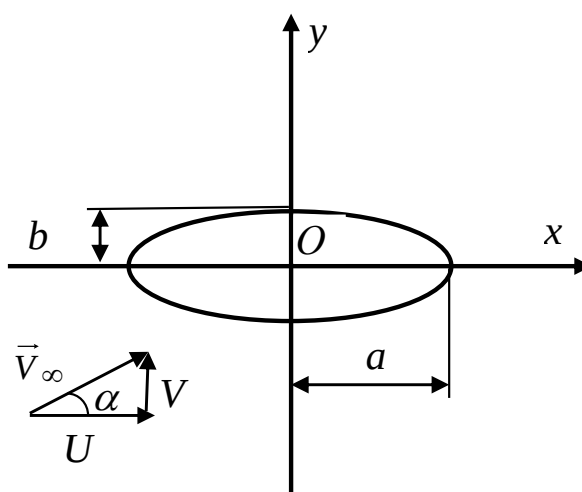


Рисунок 3.2 – Обтікання еліпсу повітряним потоком

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 $\vec{V}_\infty$ складає деякий кут α з поздовжньою віссю еліпса [73, ст. 267-271], то вектор $\vec{V}_\infty$ 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:

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

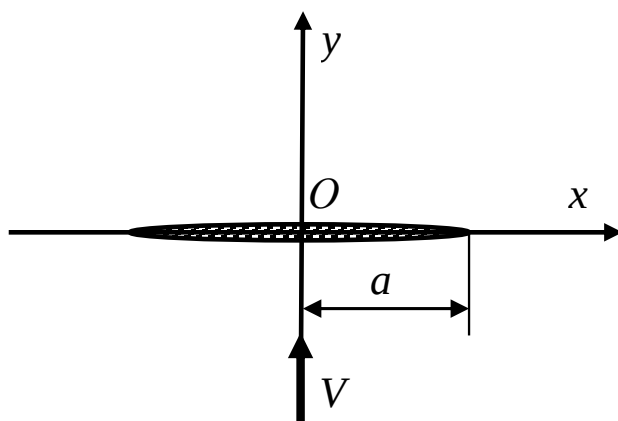


Рисунок 3.3 – Обтікання плоскої пластинки повітряним потоком

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

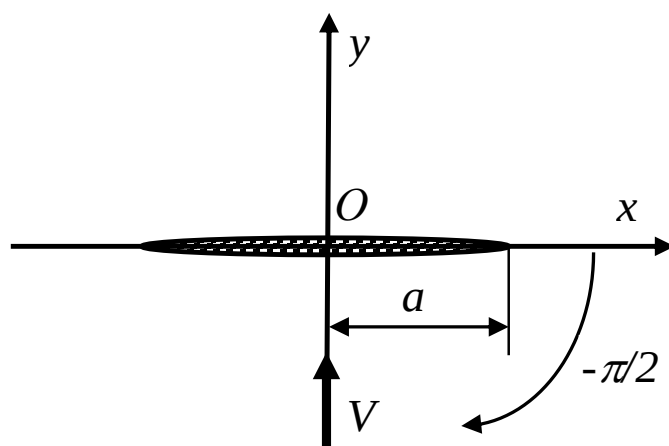


Рисунок 3.4 – Поворот системи координат при обтіканні плоскої пластинки повітряним потоком

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

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

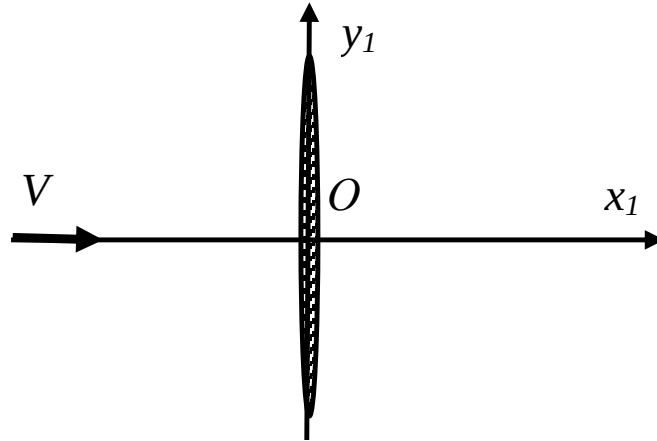


Рисунок 3.5 – Обтікання плоскої пластинки повітряним потоком в системі координат $x_1 O y_1$

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:

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

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

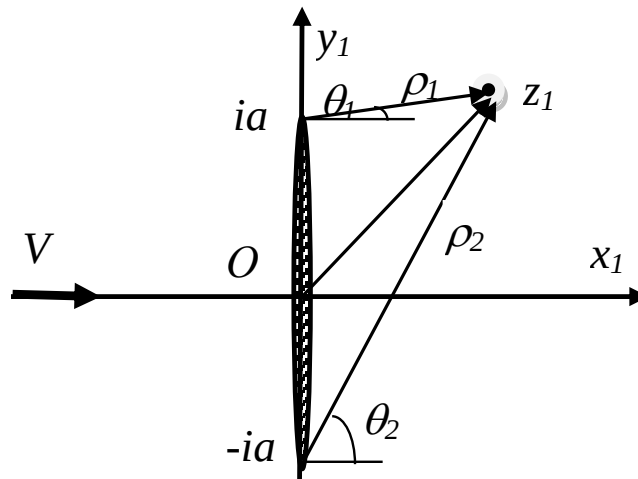


Рисунок 3.6 – Визначення параметрів довільної точки простору

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

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

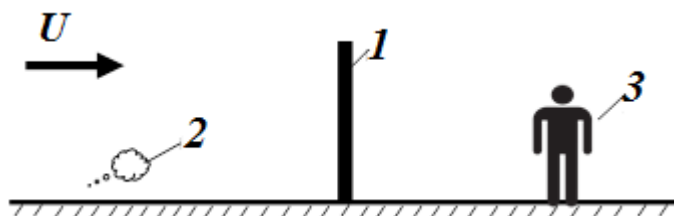
$$\theta_1 = \arctg \frac{y_1 - a}{x_1}, \quad \theta_2 = \arctg \frac{y_1 + a}{x_1}. \quad (3.17)$$

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.)



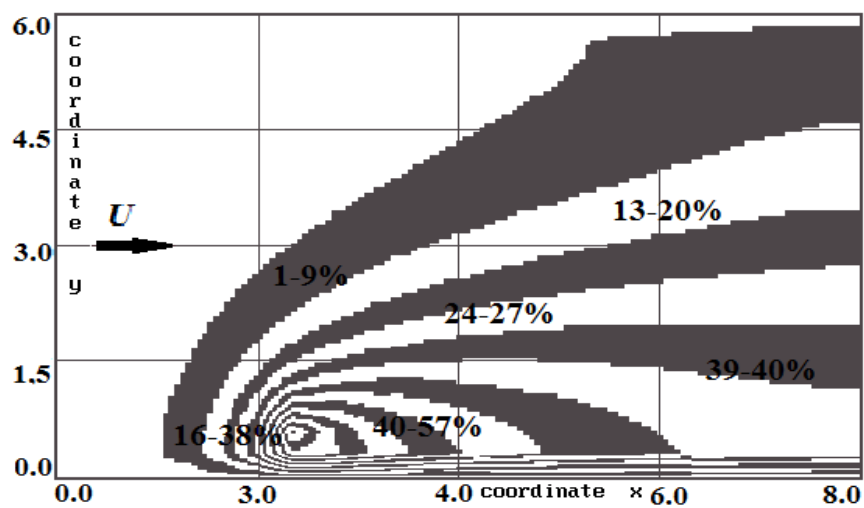
а



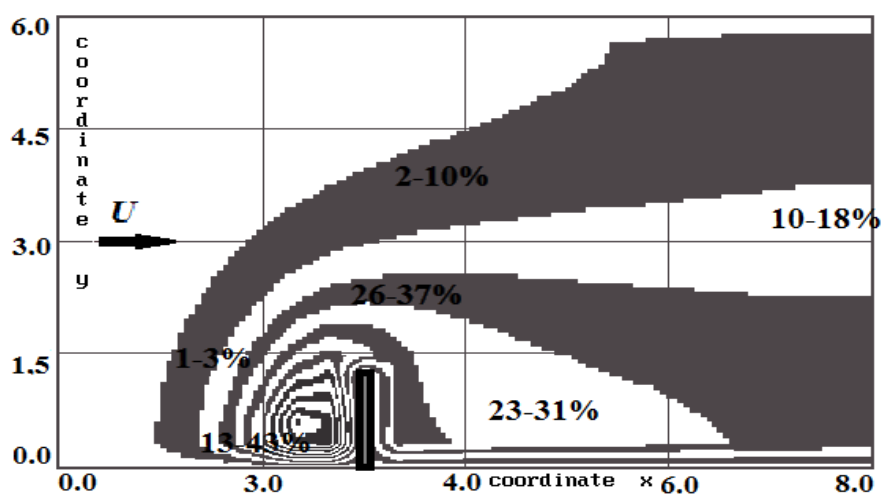
б

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

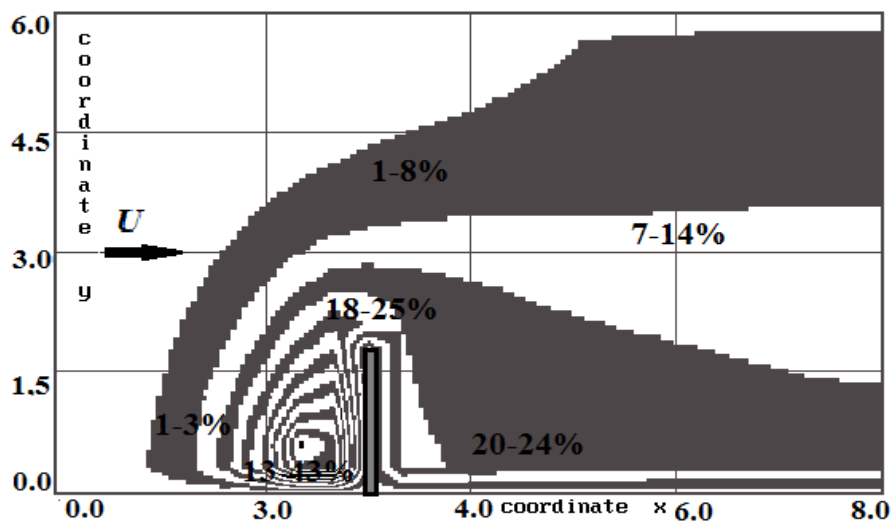
Розглядалося три сценарії: при відсутності екрана (рис. 3.8 а); при наявності екрана висотою $H = 1,2$ м та висотою 1,8 м (рис. 3.8 б-в). Нижче представлено зони забруднення, які утворюються для кожного сценарію.



a

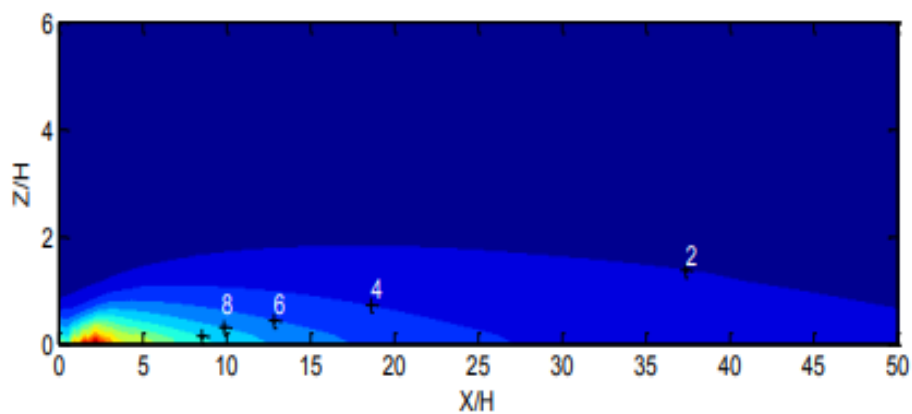


б

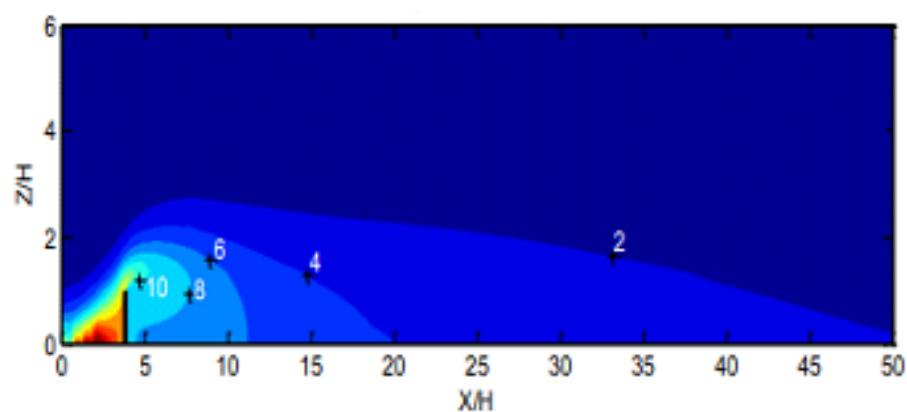


в

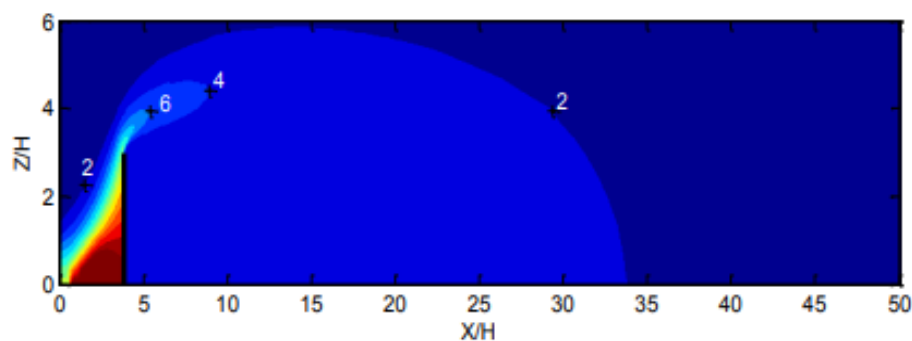
Рисунок 3.8 – Розподіл поля концентрації CO $t=9$ с: a – при відсутності екрана; $б$ – при висоті екрана $H = 1,2$ м; $в$ – при висоті екрана $H = 1,8$ м



a



б

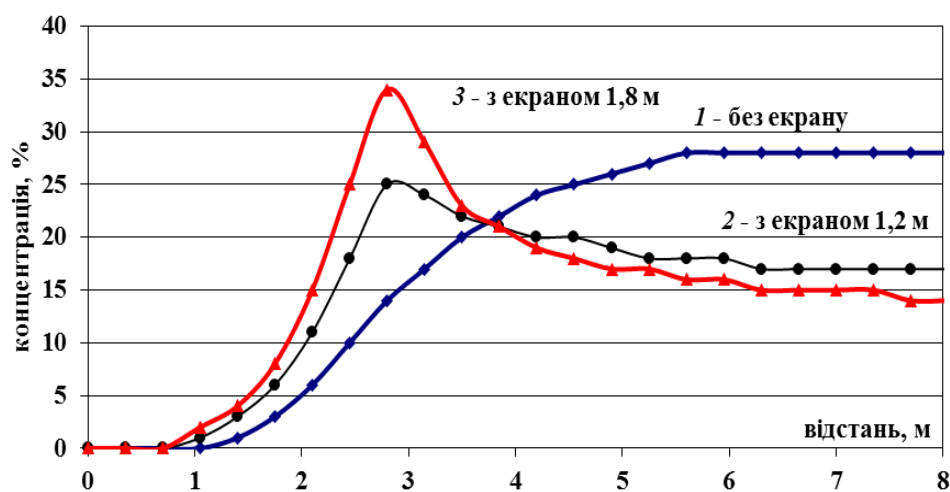


в

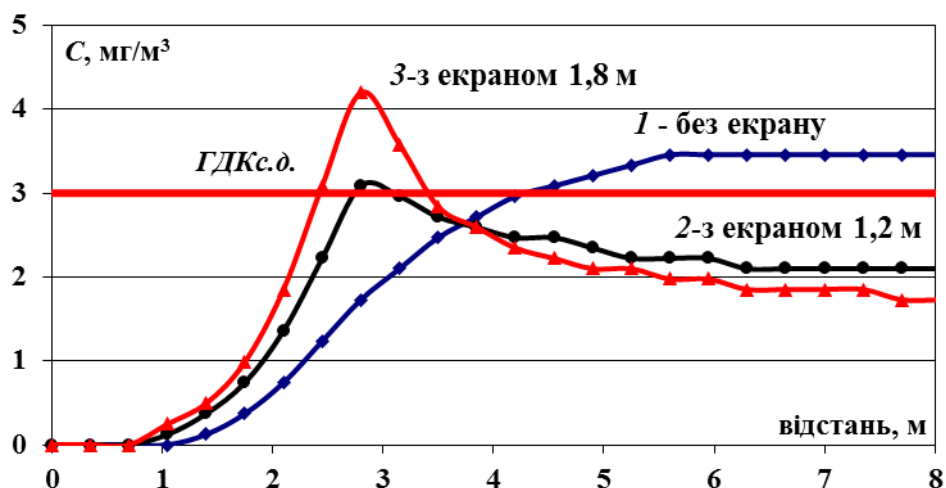
Рисунок 3.9 – Розподіл поля концентрації забруднювача, Hagler et al. 2011, CFD modeling: *a* – при відсутності екрана; *б* – при висоті екрана $H=1,2$ м; *в* – при висоті екрана $H=2,8$ м [235]

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, $мг/м^3$, 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].

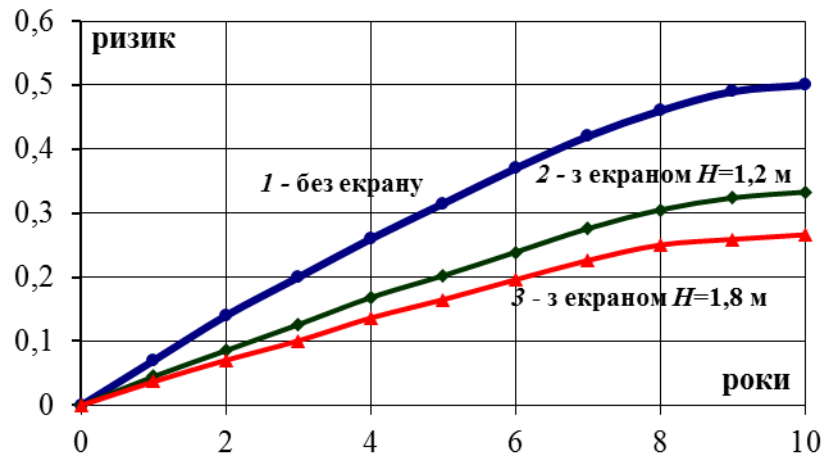


Рисунок 3.11 – Зміна ризику хронічної інтоксикації оксидом вуглецю: 1 – при відсутності екрана; 2 – при висоті екрана $H=1,2$ м; 3 – при висоті екрана $H=1,8$ м

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 прийнятного [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].

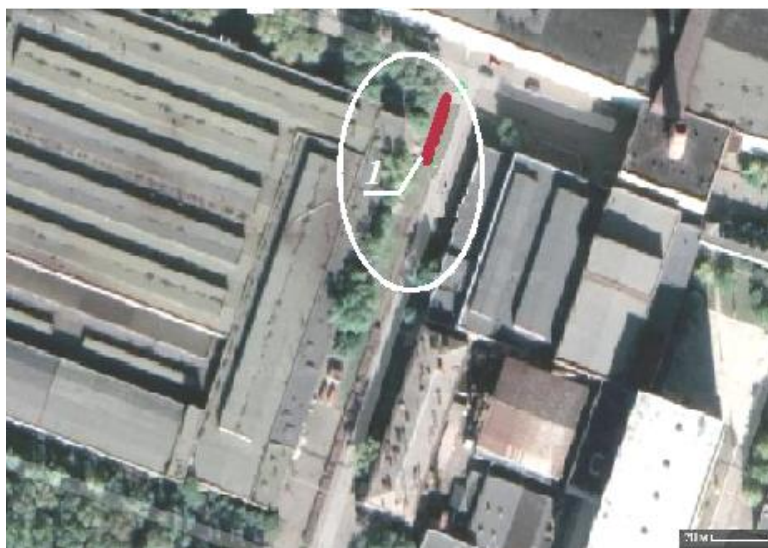


Рисунок 3.12 – Територія зони відпочинку робітників Південного машинобудівного заводу (Google Earth Image, 2019): 1 – літнє кафе

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 $\psi|_{\gamma} = const$, $\frac{\partial \psi}{\partial n}|_{\gamma} = 0$;
- завихореність біля твердої границі визначається так, щоб виконувалась 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 різницьову схему для чисельного інтегрування рівняння (3.18) [143]. Швидкість перенесення представимо у вигляді суми двох знакопостійних

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

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

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

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

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

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]:

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

Наступні позначення операторів [143]:

$$\begin{aligned} \Theta_1 &= \frac{1}{2} (\Theta_x^+ + \Theta_y^+) - \frac{1}{2 \text{Re}} (M_{xx}^+ + M_{yy}^+), \\ \Theta_2 &= \frac{1}{2} (\Theta_x^- + \Theta_y^-) - \frac{1}{2 \text{Re}} (M_{xx}^- + M_{yy}^-), \end{aligned}$$

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]:

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

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

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

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

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

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

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:

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

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

за рахунок визначення завихореності в приграничних осередках:

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

де u_k, v_k – компоненти швидкості на відповідних гранях різницевої 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]:

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

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 $\mu_y = k \left(\frac{Y}{Y_1} \right)^m$,

$$k = 0,2, \quad m \approx 1$$

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).

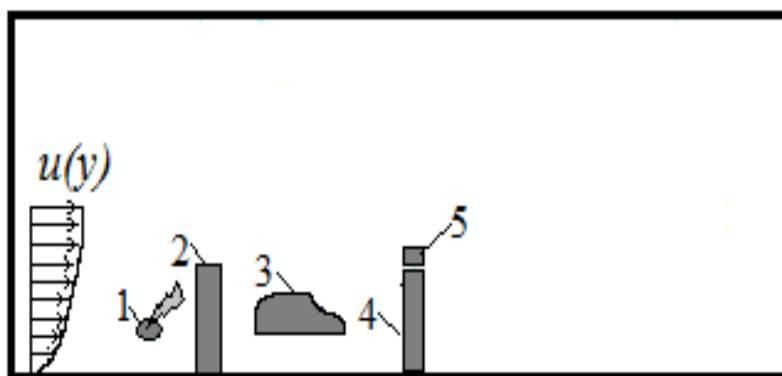


Рисунок 3.14 – Схема розташування працівника в зоні торгівлі біля автомагістралі (варіант 1): 1 – діючий автотранспорт; 2 – бар'єр (загорожа); 3 – розташування товару; 4 – людина (продавець); 5 – місце розташування голови людини

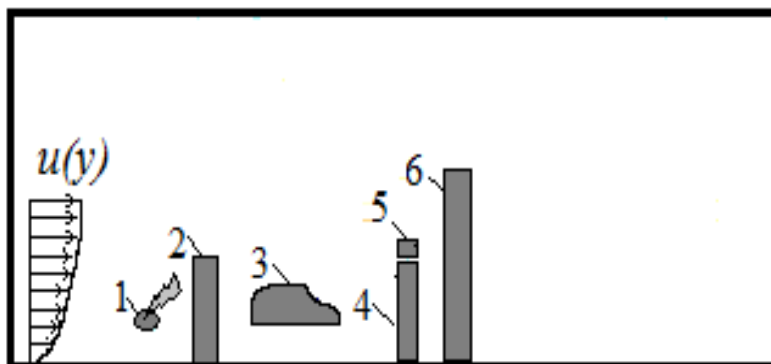


Рисунок 3.15 – Схема розташування працівника в зоні торгівлі біля автомагістралі (варіант 2): 1 – діючий автотранспорт; 2 – бар'єр (загорожа); 3 – розташування товару; 4 – людина (продавець); 5 – місце розташування голови людини, 6 – тимчасова споруда без піддашка

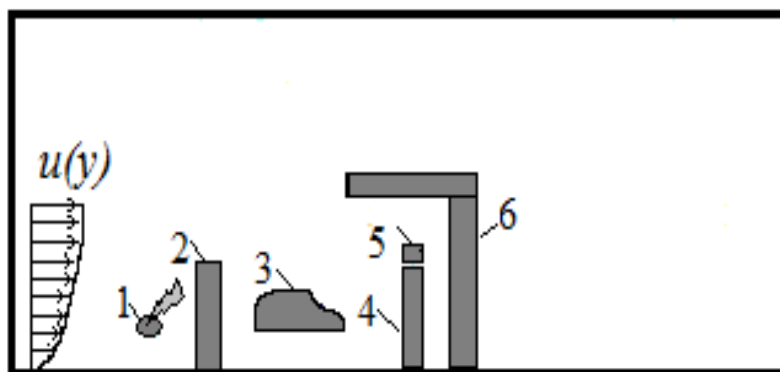


Рисунок 3.16 – Схема розташування працівника в зоні торгівлі біля автомагістралі (варіант 3): 1 – діючий автотранспорт; 2 – бар'єр (загорожа); 3 – розташування товару; 4 – людина (продавець); 5 – місце розташування голови людини, 6 – тимчасова споруда з піддашком

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.

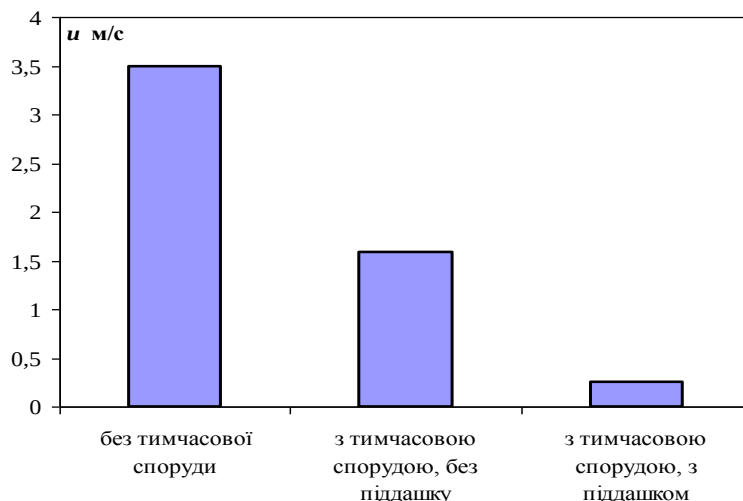


Рисунок 3.17 – Зміна швидкості повітряного потоку на рівні голови працівника

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 споруди» зменшує швидкість у 2 рази, а наявність піддашку у тієї ж споруди 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.

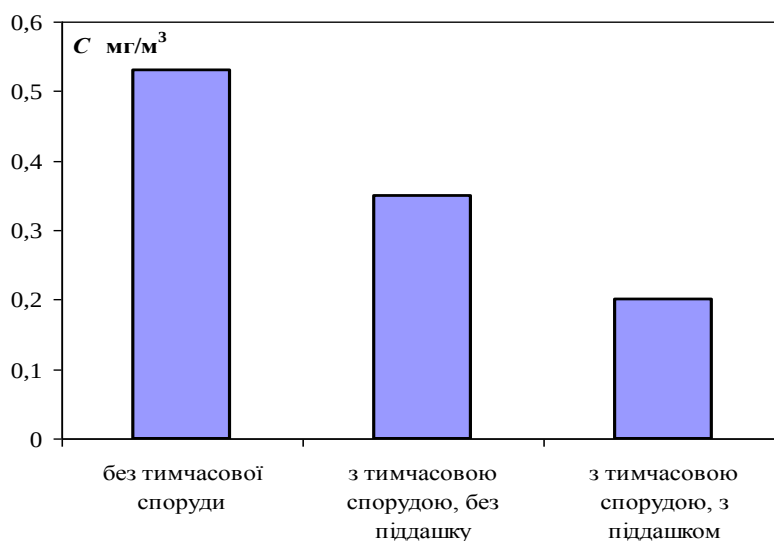


Рисунок 3.18 – Зміна концентрації діоксиду сірки на рівні голови працівника

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-різницевий 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.

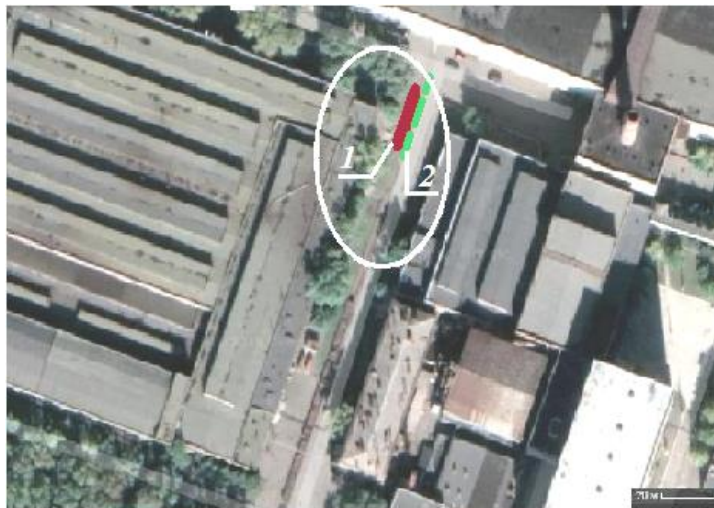


Рисунок 3.19 – Територія зони відпочинку робітників Південного машинобудівного заводу (Google Earth Image, 2019): 1 – літнє кафе; 2 – зона передбачуваної рослинності

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 окремій ділянці 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

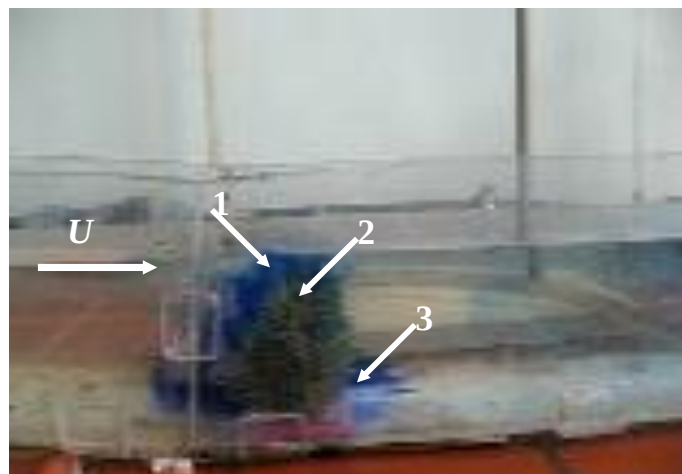


Рисунок 3.23 – Динаміка формування зон забруднення $t=6$ с при низькому викиді: 1, 3 – зони забруднення; 2 – модель рослинності

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).

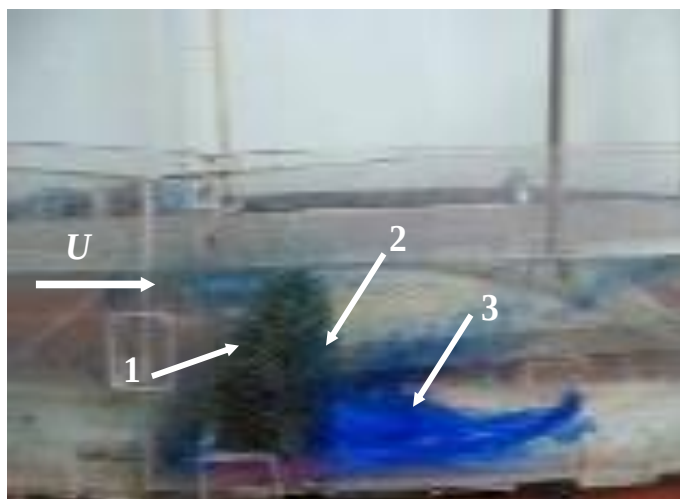


Рисунок 3.26 – Динаміка формування зон забруднення $t=7$ с при середньому викиді: 1, 3 – зони забруднення; 2 – модель рослинності

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

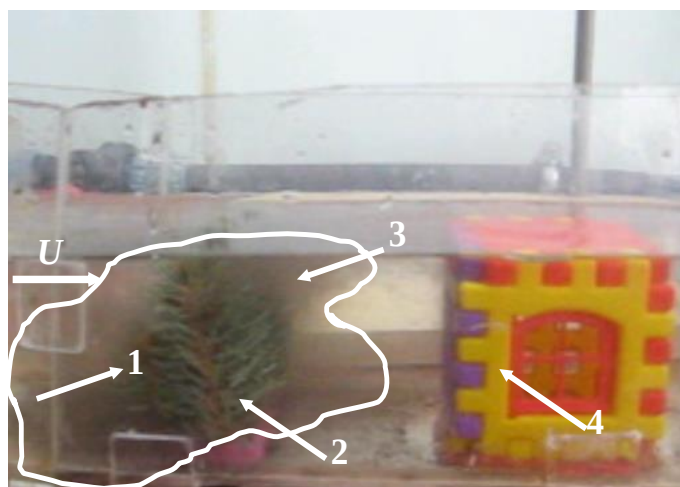


Рисунок 3.27 – Динаміка формування зон пилового забруднення $t=6$ с: 1, 3 – зони забруднення; 2 – модель рослинності; 4 – модель робочої зони

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.

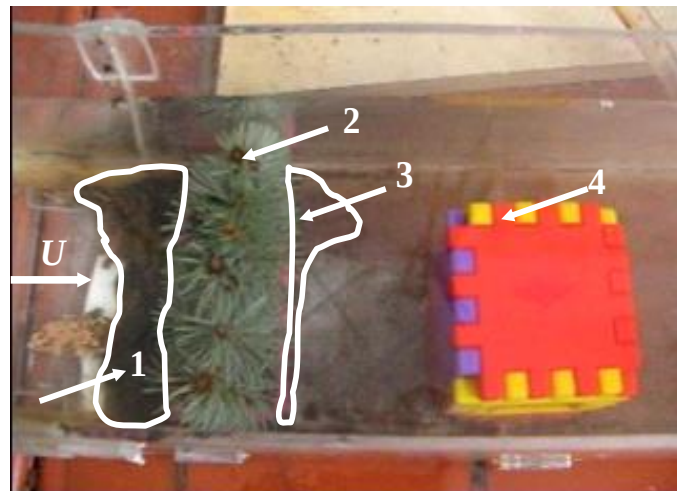


Рисунок 3.28 – Динаміка формування зон пилового забруднення, яку осіло, $t=22$ с (вид зверху): 1, 3 – зони забруднення; 2 – модель рослинності; 4 – модель робочої зони

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.

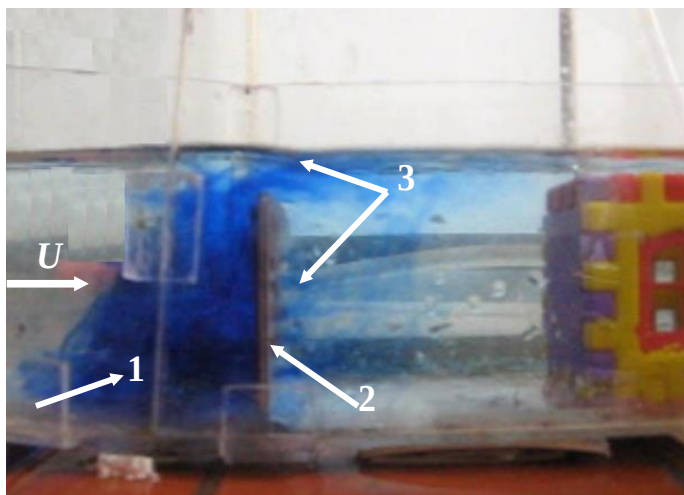


Рисунок 3.29 – Динаміка формування зон забруднення $t=6$ с при низькому викиді: 1, 3 – зони забруднення; 2 – пориста пластина

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.

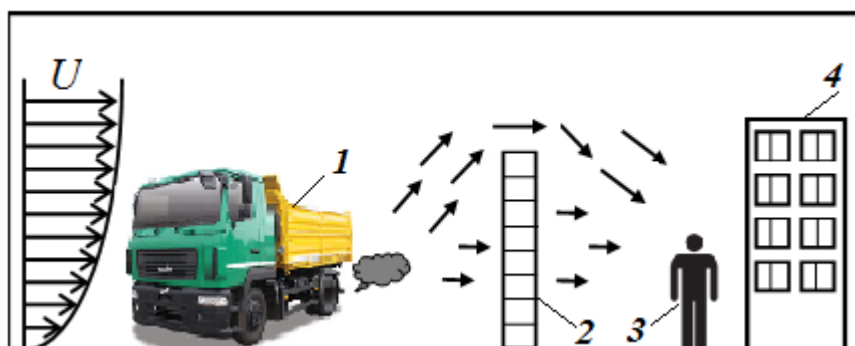


Рисунок 3.30 – Розрахункова схема обтікання: 1 – вантажний автотранспорт; 2 – рослинність; 3 – працівник на території підприємства; 4 – будівля на території підприємства

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]:

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

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,

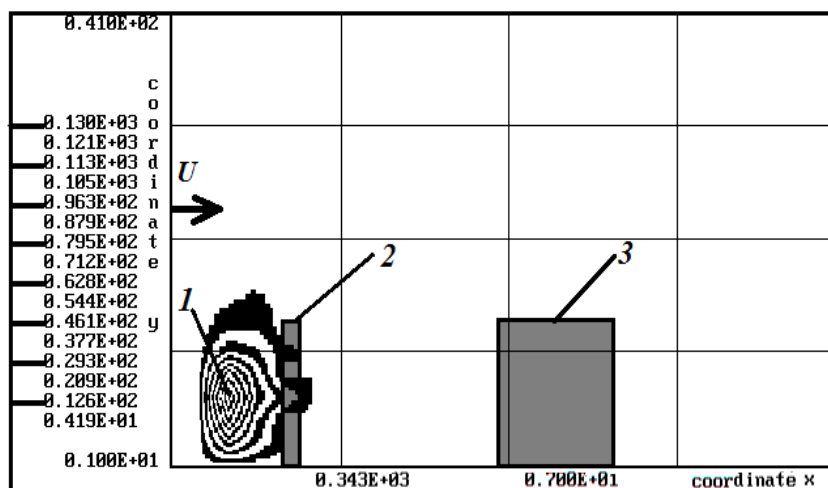
$n = 0,15$; стан атмосфери (інверсія, конвекція), тобто значення

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

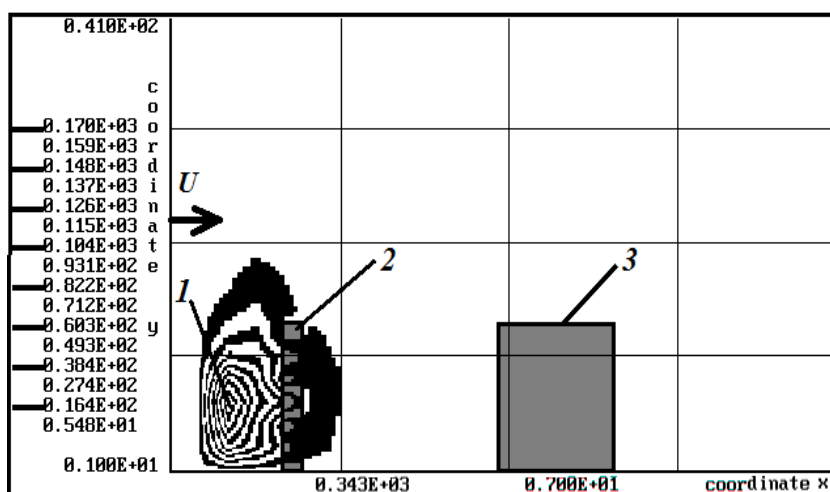
викид CO від одного автомобіля складав близько 0,058 г/с; положення джерела викиду – положення вихлопної труби автомобіля.

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.

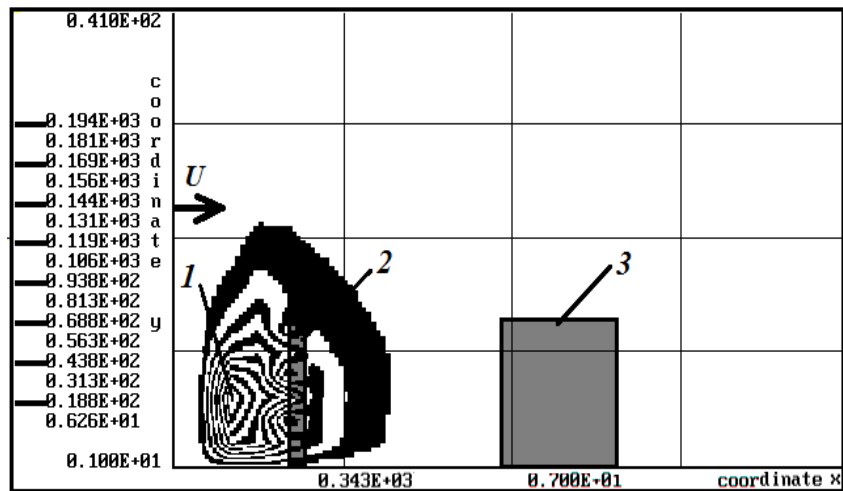
На рисунку 3.31 представлена динаміка формування зон забруднення для різних моментів часу, розрахована за допомогою запропонованого підходу (положення рослинності моделюється розміщенням пористої пластини) [161].



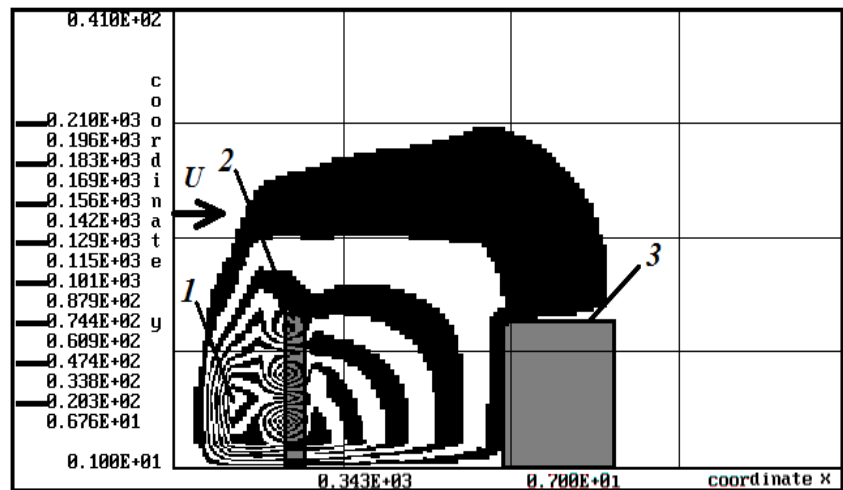
a



б



б



в

Рисунок 3.31 – Поле концентрації CO на промисловому майданчику при наявності рослинності: а – $t=2$ с; б – $t=6$ 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 а), а потім відбувається проникнення домішки через пористу перешкоду (рис. 3.31 б-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.

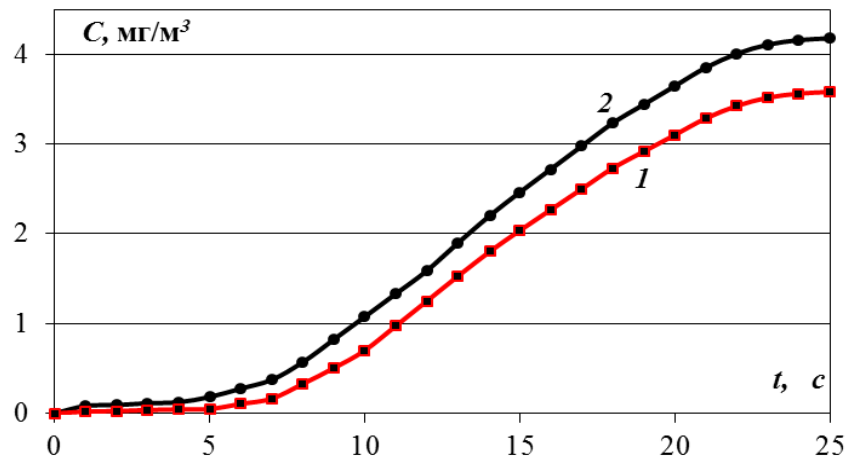


Рисунок 3.32 – Зміна концентрації CO з часом на промисловому майданчику: 1 – з рослинністю; 2 – без рослинності

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 листьях 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	-
Платан	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 листьями. 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 примігистральній 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 $\mu_y = k \left(\frac{Y}{Y_1} \right)^m$, $k = 0,2$, $m \approx 1$.

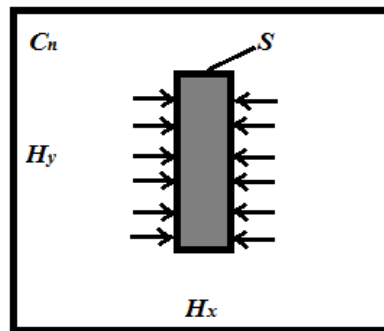


Рисунок 3.33 – Схема процесу сорбції в розрахунковій комірці [40]

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

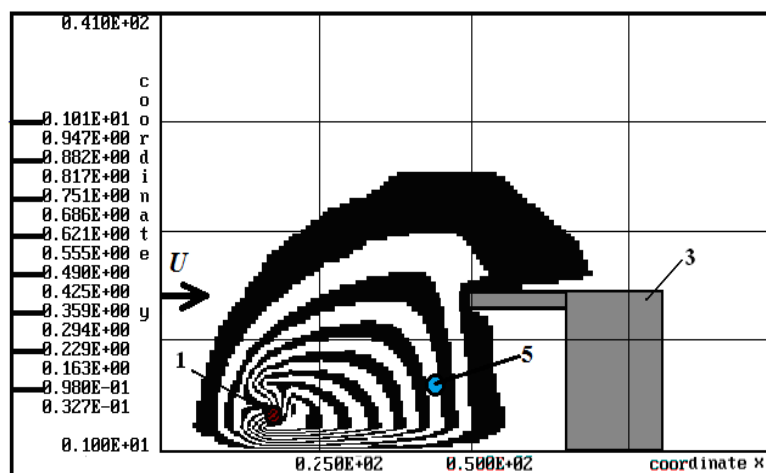
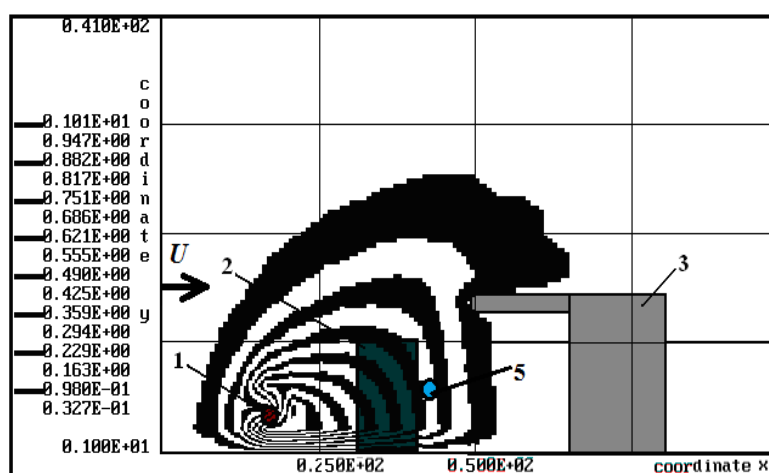
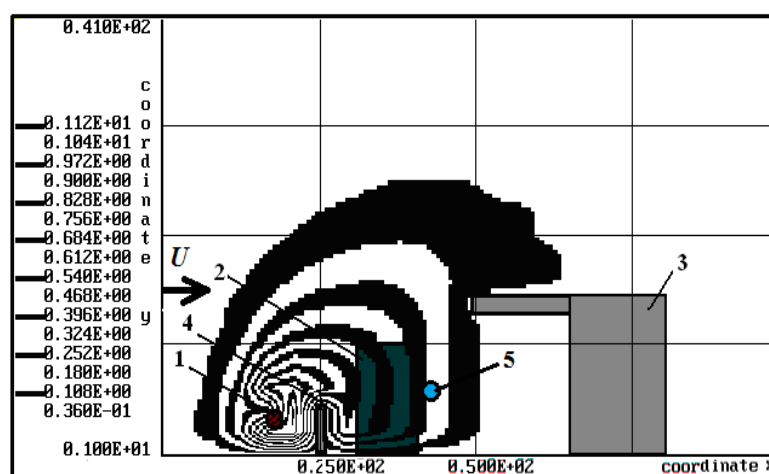
$dm = dt \cdot S \cdot \mu \cdot \frac{\partial C}{\partial z}$, витрата через комірку $\frac{dm}{dt} = \frac{C^{n+1} - C^n}{dt}$, а з іншої сторони

$\mu \frac{\partial C}{\partial z} = \beta \cdot C$ [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 (загорожею).

*a**б**в*

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

Рисунок 3.34 – Зона забруднення: *a* – 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.

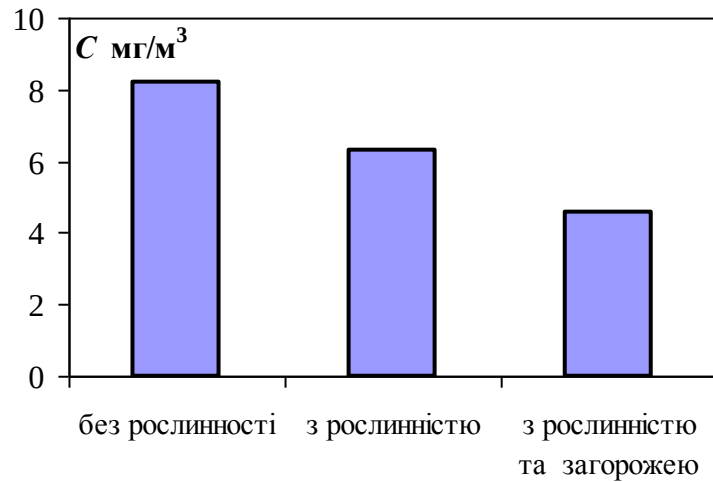


Рисунок 3.35 – Значення концентрації оксиду вуглецю в точці спостереження

У першому варіанті $C=8,216$ мг/м^3 , у другому $C=6,317$ мг/м^3 , у третьому $C=4,562$ мг/м^3 , 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.

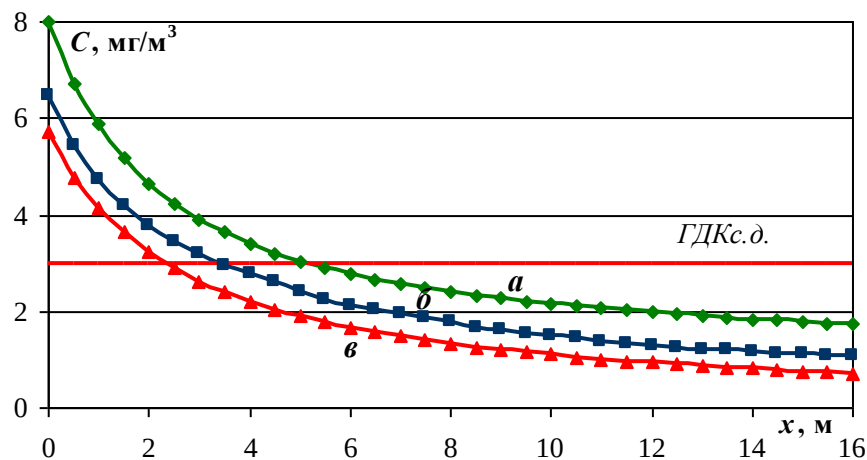


Рисунок 3.36 – Розподіл концентрації CO : a – без наявності рослинності, b – при наявності рослинності, v – при наявності рослинності і сорбції

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 $ГДК_{с.д.}$ 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.

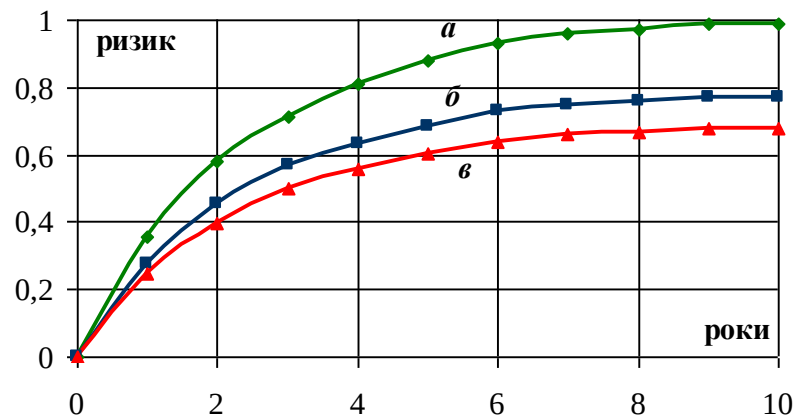


Рисунок 3.37 – Ризик виникнення хронічних захворювань: *а* – без наявності рослинності, *б* – при наявності рослинності, *в* – при наявності рослинності і сорбції

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.

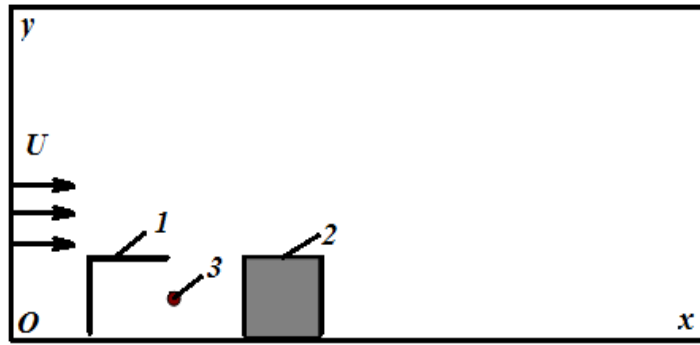


Рисунок 3.38 – Схема розрахункової області: 1 – тимчасова споруда (навіс); 2 – будівля; 3 – точка спостереження

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 оперативно 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 до розділу 3

1. 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.

2. 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.

3. Проведено верифікацію розрахунку поля швидкості повітряного потоку шляхом порівняння розрахунків за трьома методами, зроблено висновки стосовно доцільності використання даних методів.

4. 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.

5. Лабораторним шляхом встановлено, що використання пористої пластини дозволяє проводити моделювання зон забруднення аналогічно, як при наявності рослинності.

6. 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 %.

7. Вдосконалено чисельний метод для прогнозу локальних зон забруднення, що утворюють викиди від автотранспорту, з урахуванням процесу сорбції рослинністю, що знаходиться поблизу джерела емісії. Встановлено, що присутність рослинності призводить до зниження концентрації забруднювача в робочій зоні приблизно на 7–14 %, а при урахуванні і процесу сорбції рослинністю – на 11–20 %.. Оцінка ризику хронічних захворювань в зоні відпочинку робітників Південного машинобудівного заводу виконана в двох наближеннях: без урахування сорбції рослинністю, коли рослинність використовується лише як механічна перешкода – пористий екран; з урахуванням і процесу сорбції рослинністю. У першому наближенні ризик зменшується на 28 %, а у другому на 32 %.

8. Створено програмне забезпечення, яке дозволяє проводити обчислювальні експерименти по дослідженню поля концентрації забруднювача в зоні дії джерела емісії та оцінці рівня хронічних захворювань робітників.

Основні положення розділу 3 опубліковані автором у наукових працях [33, 35, 36, 40, 44, 46, 48, 102, 103, 104, 105, 106, 111, 158, 159, 160, 161, 224].

Список використаних джерел у розділі 3

Список використаних джерел у розділі 3 наведено у загальному списку використаних джерел [1, 73, 80, 90, 102, 103, 106, 143, 147, 153–154, 158, 160, 163, 164, 165, 166, 182, 197, 198, 199, 201, 212, 214, 220, 229, 237, 242, 244, 235, 250].

РОЗДІЛ 4

МІНІМІЗАЦІЯ РІВНЯ ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ В РОБОЧИХ ЗОНАХ НА ПРОМИСЛОВИХ МАЙДАНЧИКАХ ЗА ДОПОМОГОЮ УСМОКТУВАЧІВ, НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ ТА ЗВОЛОЖЕННЯ

Як відомо, люди, які перебувають значну частину часу в робочій зоні, що знаходиться в межах 50 м від працюючого автотранспорту, зазнають значного техногенного навантаження, тобто попадають у зону підвищеного ризику для здоров'я. До найбільш шкідливих речовин, що надходять в атмосферу і залишаються в ній у значній кількості під час активного руху автотранспорту належать частинки пилу, сажа, оксиди азоту та сірки, оксиди вуглецю, тверді частинки, вуглеводні та інші органічні сполуки.

Існують різні способи захисту атмосферного повітря від викидів автомобільного транспорту: індивідуальні способи захисту [136–138] застосування рослинності, встановлення захисних екранів, застосування поглинаючого покриття на дорогах, використання каталізаторів у системі відводу [25, 37, 40, 42, 43, 47, 49–50, 53, 81, 98, 104, 235].

4.1 Удосконалення локальних усмоктувальних систем для зменшення забруднення повітря в робочих зонах гаражів

Як відомо, повітряне середовище в гаражах є дуже забрудненим в наслідок викидів автотранспорту. Оскільки це пов'язано з тим, що на промислових об'єктах використовуються вантажні автомобілі, автокрани та інше. В США, в теперішній час, для зниження рівня хімічного забруднення повітряного середовища в гаражах застосовуються локальні витяжні системи (рис. 4.1) [235]. Як правило, відбір повітря здійснюється за допомогою одного всмоктувального отвору. В даній роботі пропонується використовувати модифікований прилад для забору забрудненого повітря. Цей прилад забезпечує відбір забрудненого повітря на двох рівнях (рис. 4.3). Такий підхід

пов'язаний з тим, що швидкість всмоктування різко знижується навіть на незначній відстані від отвору пропорційно $\frac{1}{R^2}$, де R – відстань від отвору [78]. При використанні одного отвору для забору повітря зона захвату забруднених частинок достатньо мала, і частинки забрудненого повітря не попадаючи в отвір, починають рухатися наверх, обтікаючи перешкоду, тому раціонально розміщувати додатковий отвір для всмоктування того забрудненого повітря, що залишилося в просторі.

Цілком очевидно, що вибір раціональних параметрів даної системи для конкретної ділянки промислового майданчика чи гаража можна фізично змодельовати, але це потребує значних затрат часу на організацію експерименту, виготовлення моделі, розміщення обладнання. Тому вкрай важливо розробити метод для теоретичного оцінювання ефективності застосування локальної системи всмоктування.

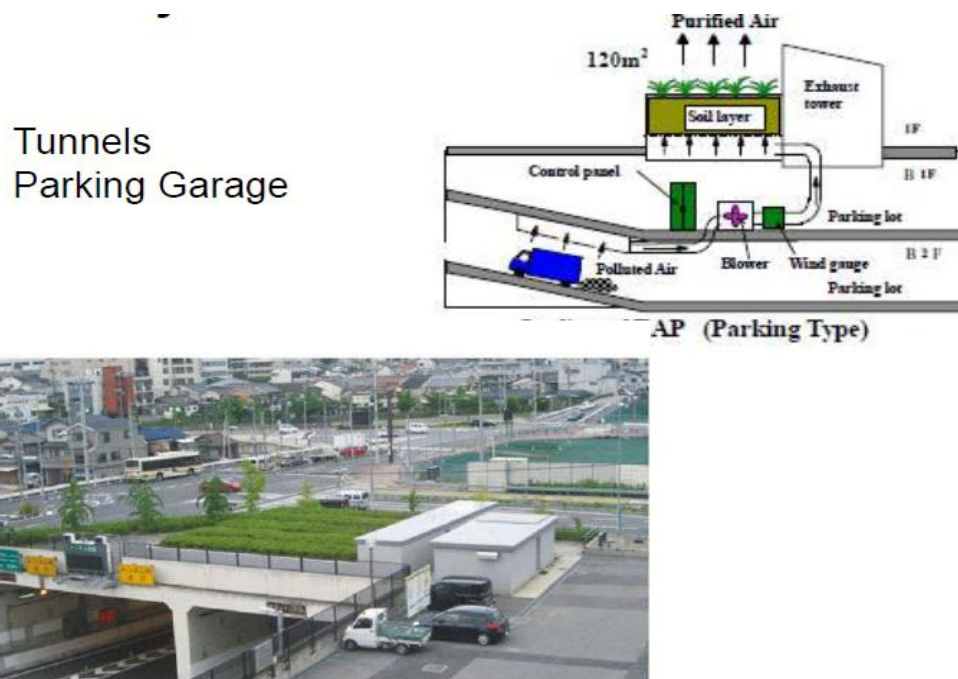


Рисунок 4.1 – Приклади всмоктувальних систем [235]

Ставиться основна задача дослідження впливу подвійного відбору забруднюючих речовин вихлопних газів на рівень забруднення повітря в робочій зоні. Відбір вихлопних газів може відбуватися на різній висоті відносно поверхні землі. Цей процес регулюється різною швидкістю відбору,

з врахуванням зміни відстані між патрубками даного пристрою.

У роботі проведено дослідження процесу відбору вихлопних газів для гаражів промислового об'єкту «Дніпропетровського маслоекстракційного заводу» Олейна (рис. 4.2).



Рисунок 4.2 – «Дніпропетровський маслоекстракційний завод» (Google Earth Image, 2019): 1 – гаражі для зберігання та обслуговування автотранспортної техніки

На відміну від підходу [91] пропонується використовувати дворівневий відбір забруднюючих речовин вихлопних газів з регульованою відстанню між патрубками, при чому швидкість відбору на відповідних рівнях може бути різною рис. 4.3 [25, 42, 47].

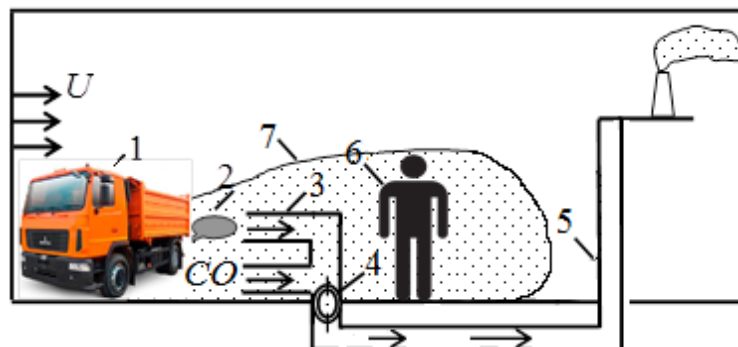


Рисунок 4.3 – Схема відбору вихлопних газів: 1 – автотранспорт, 2 – джерело викиду, 3 – патрубки відбору газів, 4 – витяжний вентилятор, 5 – газовідвід, 6 – працівник на робочому місці, 7 – зона забруднення

Пропонується здійснювати відведення відібраних продуктів вихлопних газів із гаража через трубу поєднану з існуючою системою вентиляції, щоб забезпечити розсіювання цих викидів в атмосфері, що знизить рівень забруднення повітряного середовища на робочому місці працівника.

На першому етапі дослідження було запропоновано робочу гіпотезу відносно зниження рівня забруднення атмосферного повітря викидами автотранспорту за рахунок застосування не одного, а двох отворів відбору газів. Було проведено фізичний експеримент по оцінці ефективності зменшення зони забруднення при наявності антропогенного джерела за рахунок використання пристрою, що має два отвори для відбору газів рис. 4.4.

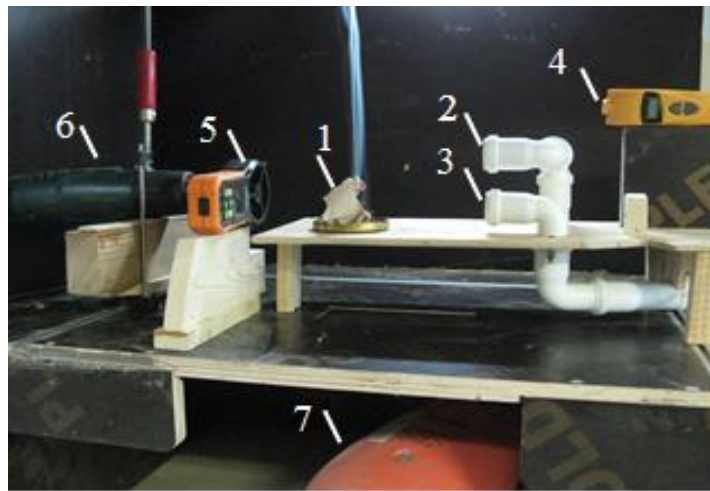


Рисунок 4.4 – Експериментальна установка відбору газів: 1 – джерело емісії; 2, 3 – отвори для відбору газів; 4 – пристрій для вимірювання концентрації CO ; 5 – динамометр для вимірювання швидкості повітряного потоку; 6 – напірний вентилятор, 7 – витяжний вентилятор [25, 42]

На рисунку 4.4 представлено ситуацію, коли напірний вентилятор не працює, швидкість повітряного потоку $V=0$ м/с, джерело емісії знаходиться на висоті $h=3$ см від площини основи та на відстані $ss=13$ см від осі вентилятора. Центри поперечних перерізів отворів відбору газів розташовані на відстані $ss_1=17$ см від джерела емісії та на висоті від площини основи установки $h_1=3$ см – нижній отвір, $h_2=6$ см – верхній отвір, відстань між центральними осями отворів 3 см. Положення нижнього отвору, відстань між

отворами, а отже і положення верхнього отвору щодо поверхні основи установки і щодо розташування нижнього отвору може змінюватися в рамках величини, що дорівнює діаметру поперечного перерізу $d=3$ см. Масштаб експериментальної установки 1:10.



Рисунок 4.5 – Зона забруднення в момент часу $t=4$ с (витяжний вентилятор не працює, перший етап) [42]

Надалі вмикається напірний вентилятор (рис. 4.5), швидкість повітряного потоку $V=1,3$ м/с, $t=4$ с, витяжний вентилятор не працює, потужність джерела емісії $C=100\text{--}357$ ppm, на рівні зросту людини (у масштабі) $H=18$ см, концентрація оксиду вуглецю складає $C=78$ ppm.



Рисунок 4.6 – Зона забруднення в моменті часу $t=4$ с (після початку роботи витяжного вентилятора, перший етап) [42]

Напірний вентилятор продовжує працювати зі швидкістю повітряного потоку $V=1,3$ м/с, джерело емісії діє $t=40$ с, ввімкнуто витяжний вентилятор, швидкості відбору газів $V_{\text{н}}=3,3$ м/с, $V_{\text{в}}=2,25$ м/с. Спочатку активно йде відбір обома отворами, концентрація CO починає падати і через $t=4$ с становить $C=42$ ppm (рис. 4.6).

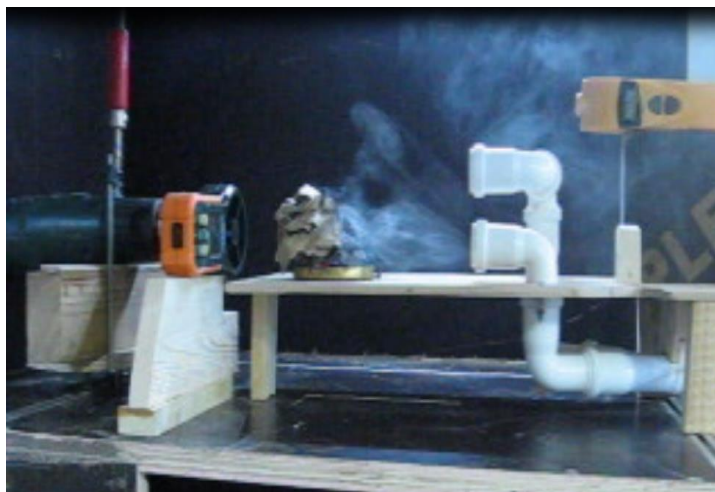


Рисунок 4.7 – Зона забруднення в моменті часу $t=8$ с (після початку роботи витяжного вентилятора, перший етап) [42]

Надалі нижній отвір активно виконує відбір газів, а верхній підтягує те забруднення, яке міститься в повітрі вище, тобто на рівні органів дихання, через $t=8$ с, концентрація знижується $C=36$ ppm (рис. 4.7).



Рисунок 4.8 – Зона забруднення в моменті часу $t=10$ с (після початку роботи витяжного вентилятора, перший етап) [42]

Концентрація знижується і через $t=10$ с складає $C=32$ ppm (рис. 4.8). Добре видно, що у верхній частині області повітря стало чистим, обидва отвори продовжують працювати, але можна спостерігати, що надалі уловлює забруднення лише нижній отвір, в момент часу $t=14$ с концентрація становить $C=23$ ppm (рис. 4.9).



Рисунок 4.9 – Зона забруднення в моменті часу $t=14$ с (після початку роботи витяжного вентилятора, перший етап) [42]

Після збільшення швидкості відбору газів ($V_n=3,94$ м/с, $V_b=3,05$ м/с) рівень концентрації різко зменшується і встановлюється рівним $C=4$ ppm, при подальшому збільшенні швидкості відбору газів ($V_n=5,94$ м/с, $V_b=4,52$ м/с) концентрація знижується до нуля $C=2-0$ ppm.

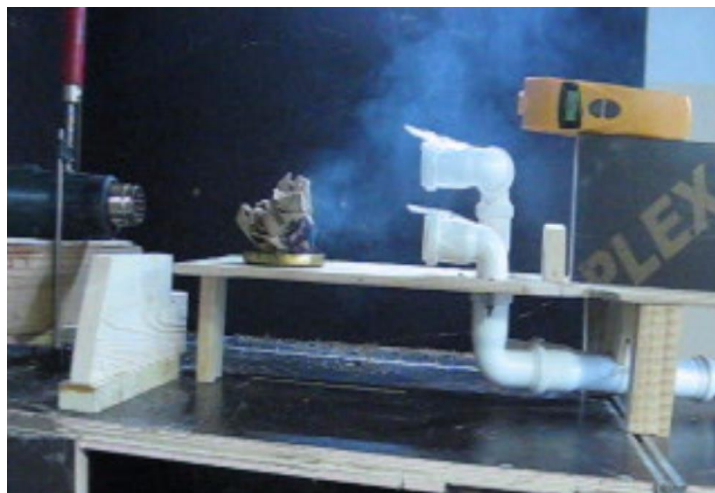


Рисунок 4.10 – Зона забруднення в моменті часу $t=4$ с (витяжний вентилятор не працює, другий етап) [25]

На другому етапі дослідження зверху отворів відсмоктувача встановлені горизонтальні пластини однакової довжини. Ця довжина дорівнює діаметру отворів $l=3$ см. Досягаємо показань приладу по концентрації приблизно як в попередньому експерименті $C=70-75$ ppm без роботи відсмоктувачів (рис. 4.10).

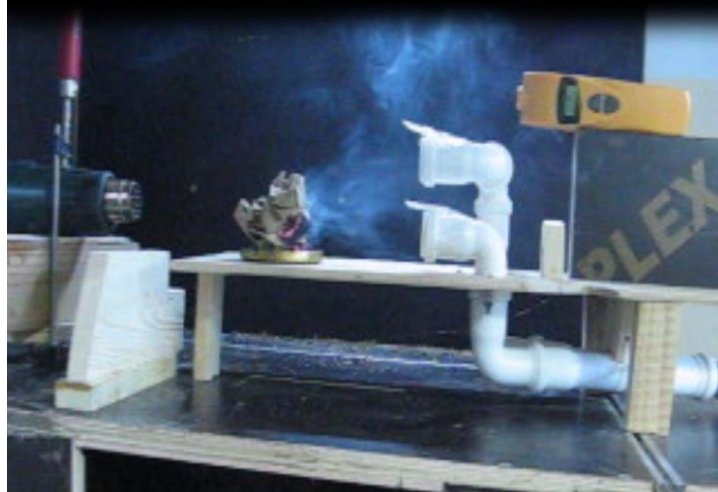


Рисунок 4.11 – Зона забруднення в моменті часу $t=4$ с (після початку роботи витяжного вентилятора, другий етап) [25]

Надалі починає працювати витяжний вентилятор, швидкості відбору газів: $V_n=3,3$ м/с, $V_v=2,25$ м/с. Відбувається активний відбір забруднення обома отворами, впродовж $t=4$ с після включення витяжного вентилятора концентрація CO зменшується до 38 ppm (рис. 4.11).

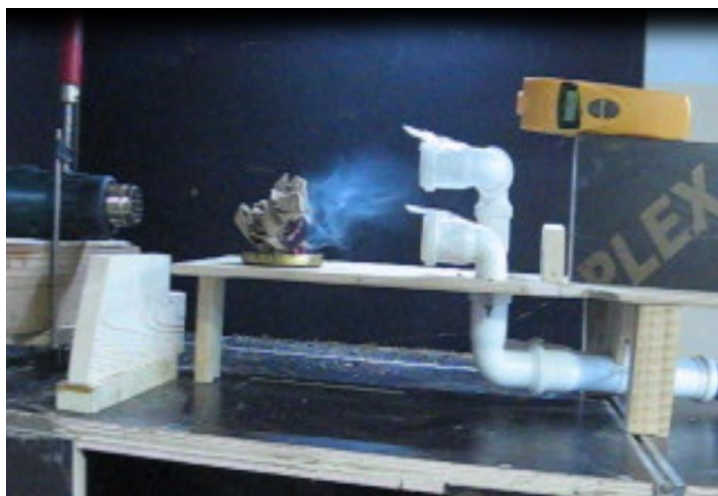


Рисунок 4.12 – Зона забруднення в моменті часу $t=14$ с (після початку роботи витяжного вентилятора, другий етап) [25]

На протязі часу $t=14$ с забруднення, яке містилося в повітрі вище другого отвору і на рівні органів дихання вже відібрано верхнім отвором, продовжує найбільш активно відбирати забруднення нижній отвір, концентрація знижується до 14 ppm і залишається рівною $C=14$ ppm, на відміну від випадку, коли вертикальні пластини були відсутні $C=23$ ppm. Нижній отвір швидше вловлює забруднення, пластини гальмують потік, тим самим затримуючи його на рівні відсмоктувачів, що забезпечує краще всмоктування (рис. 4.12).

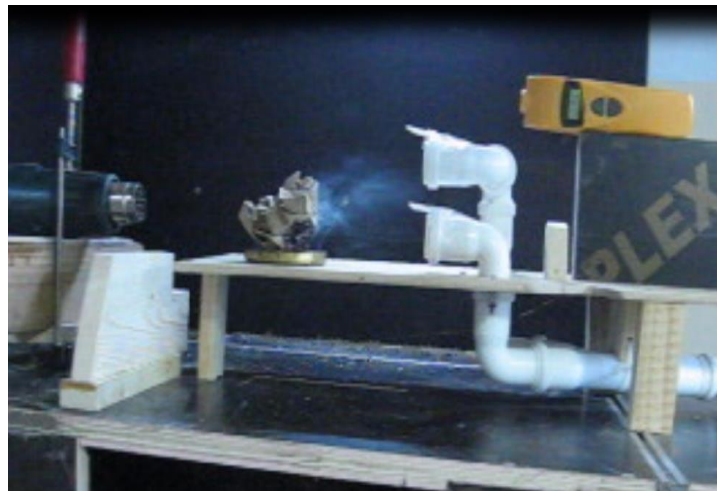


Рисунок 4.13 – Зона забруднення при роботі витяжного вентилятора (на другому режимі швидкості, другий етап) [25]

При збільшенні швидкості всмоктування (2-ий режим) $V_n=3,94$ м/с, $V_b=3,05$ м/с концентрація різко падає до нуля $C=2-0$ ppm, що відбувалося в попередньому експерименті при максимальній швидкості $V_n=5,94$ м/с, $V_b=4,52$ м/с (рис. 4.13).

На третьому етапі дослідження зверху верхнього отвору відсмоктувача встановлена горизонтальна пластина довжиною $l=6$ см, а на нижньому отворі довжиною $l=3$ см. Досягаємо показань приладу по концентрації приблизно, як в попередньому експерименті $C=70-75$ ppm без роботи відсмоктувачів, потім вмикаємо витяжний вентилятор, швидкості відбору газів $V_n=3,3$ м/с, $V_b=2,25$ м/с (рис. 4.14). Добре видно, як з кінця верхньої пластини сходять

вихори для уникнення нескінченної швидкості згідно постулату Жуковського і утворюють вихорові згустки, але не дивлячись на такий ефект, концентрація у робочій зоні зменшується $t=4$ с, $C=28\text{--}30$ ppm.



Рисунок 4.14 – Зона забруднення в моменті часу $t=4$ с (після початку роботи витяжного вентилятора, третій етап)

Верхня пластина спрямовує загазований потік в зону розташування отворів $t=8$ с, $C=18\text{--}26$ ppm (рис. 4.15), тим самим підключаючи до більш активного процесу відбору забруднення верхній отвір відсмоктувача на відміну від ситуації, коли пластини були відсутні і верхньому отвору майже не вдавалося відбирати забруднення.



Рисунок 4.15 – Зона забруднення в моменті часу $t=8$ с (після початку роботи витяжного вентилятора, третій етап)

На протязі часу $t=14$ с забруднення, яке містилося в повітрі вище другого отвору і на рівні органів дихання вже відібрано, продовжують одночасно відбирати забруднення нижній і верхній отвори, концентрація знижується і стає рівною $C=8-10$ ppm, на відміну від випадку, коли вертикальні пластини були однакової довжини $C=14$ ppm (рис. 4.16).



Рисунок 4.16 – Зона забруднення в моменти часу $t=14$ с (після початку роботи витяжного вентилятора, третій етап)

На четвертому етапі дослідження додатково на верхньому отворі відсмоктувача встановлена вертикальна пластина (екран) довжиною $l=3$ см. Досягаємо показань приладу по концентрації приблизно $C=70-75$ ppm без роботи відсмоктувачів.



Рисунок 4.17 – Зона забруднення в моменти часу $t=4$ с (після початку роботи витяжного вентилятора, четвертий етап)

Потім вмикаємо витяжний вентилятор, швидкості відбору газів складають: $V_H=3,3$ м/с, $V_B=2,25$ м/с (рис. 4.17). Чітко видно, як екран гальмує забруднення, а верхня пластина спрямовує його в зону розташування отворів, $t=4$ с, $C=18-24$ ppm.

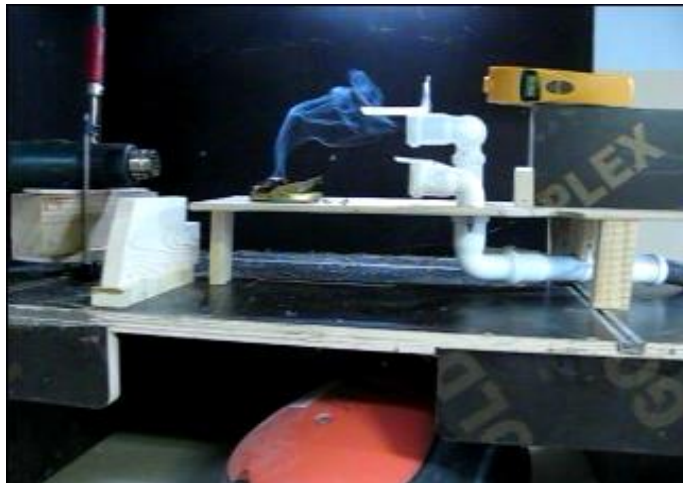


Рисунок 4.18 – Зона забруднення в моменти часу $t=10$ с (після початку роботи витяжного вентилятора, четвертий етап)

Швидко йде процес відбору загазованості, чітко просліджується ефект утворення вихорів верхньою пластиною, видно зміну напрямку потоку: $t=10$ с, $C=8-14$ ppm (рис. 4.18).

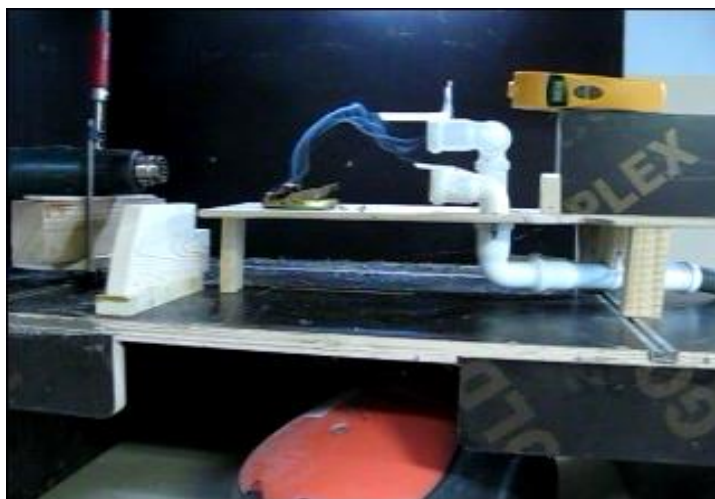


Рисунок 4.19 – Зона забруднення в моменти часу $t=14$ с (після початку роботи витяжного вентилятора, четвертий етап)

На момент часу $t=14$ с забруднення, яке надходить від джерела емісії відбирається з постійною інтенсивністю, форма потоку забруднення майже не змінюється, так як швидкість вітру залишається постійною. Екран є суттєвою перешкодою, а верхня довша пластина є прямою потоку. Видно, що потік огибає горизонтальну пластину, відхиляється від неї і відбирається верхнім отвором, концентрація знижується і на 14 с стає рівною $C=2-6$ ppm (рис. 4.19).

Результати фізичного експерименту відносно зміни значення концентрації оксиду вуглецю, представлено у табл. 4.1. [25, 42]

Таблиця 4.1 – Зміна значення концентрації CO з часом на різних етапах дослідження, при швидкостях відбору газів: $V_H=3,3$ м/с, $V_B=2,25$ м/с

Час, с	Концентрація CO , ppm (без напрямних пластин), перший етап	Концентрація CO , ppm (з напрямними пластинами однакової довжини), другий етап / зміна Δ , %		Концентрація CO , ppm (з напрямними пластинами різної довжини), третій етап / зміна Δ , %		Концентрація CO , ppm (з напрямними пластинами різної довжини і екраном), четвертий етап / зміна Δ , %	
0	75-78	75-78		75-78		75-78	
4	42-44	35-38	14-17%	28-30	32-33%	18-24	45-57%
8	33-36	26-30	17-22%	18-26	28-46%	15-16	55-56%
10	29-32	18-24	25-38%	12-16	50-58%	8-14	50-72%
14	21-23	14-16	31-34%	8-10	57-62%	2-6	75-90%
Ефективність			22-28%		42-50%		56-69%

На наступному етапі дослідження розроблено методику чисельного розрахунку процесу відбору газів, що враховує кількість отворів відборів газу, їх розміри та взаємне розташування.

Локальне поле швидкості повітряного потоку з урахуванням роботи патрубків забору вихлопних газів знаходиться із вирішення рівняння Лапласа для потенціалу швидкості P газового потоку [113, 143]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0. \quad (4.1)$$

Ставляться відповідні граничні та початкові умови: на твердих стінках – умова непротікання $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$, де $\vec{n}$ – одиничний вектор зовнішньої нормалі до твердої стінки; на границі входу газового потоку в патрубки відбору вихлопних газів (рис. 4.4, номер 2, 3) $\frac{\partial P}{\partial n} = -V_n$, де V_n – відоме значення швидкості газового потоку, який відбирається вентилятором (рис. 4.4, номер 7); на границі, де газовий потік виходить із розрахункової області $P = P_0 + const$, де P_0 – деяке число (умова Дірихле).

Для чисельного інтегрування рівняння Лапласа (4.1) використовується метод Лібмана [113–114], чисельна реалізація якого описана формулами (3.33) – (3.35).

Процес розповсюдження оксиду вуглецю в атмосферному повітрі моделюється на основі рівняння масопереносу [42, 143]:

$$\frac{\partial [CO]}{\partial t} + \frac{\partial u[CO]}{\partial x} + \frac{\partial v[CO]}{\partial y} = \text{div}(\mu \text{grad}[CO]) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (4.2)$$

де $[CO]$ – концентрація оксиду вуглецю; u, v – компоненти вектору швидкості; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коефіцієнт турбулентної дифузії; Q_i – інтенсивність емісії оксиду вуглецю; $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$ – дельта-функція Дірака; (x_i, y_i) – координати розташування джерела емісії оксиду вуглецю; t – час.

Для розв'язання рівняння (4.2) ставляться наступні граничні умови: на ділянці входу оксиду вуглецю в розрахункову область виконується гранична умова виду $[CO]|_{\text{вх}}$ в момент часу $t=0$; в кінці розрахункової області в чисельній моделі виконується «м'яка» гранична умова виду $[CO]_{i+1,j} = [CO]_{i,j}$; на твердих стінках реалізується умова непротікання.

Чисельне інтегрування рівняння (4.2) проводиться на різницевій сітці за допомогою п'ятикрокової різницевої схеми розщеплення [25, 42, 143].

Похідна за часом апроксимується розділеної різницею «назад»:

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

У конвективних похідних складові односпрямованого перенесення записуються у вигляді:

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

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

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

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

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

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

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:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial[CO]}{\partial x} \right) \approx \mu_x \frac{[CO]_{i+1,j}^{n+1} - [CO]_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} -$$

$$-\mu_x \frac{[CO]_{i,j}^{n+1} - [CO]_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- [CO]^{n+1} + M_{xx}^+ [CO]^{n+1};$$

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

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

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 (4.2) записується так:

$$\begin{aligned} & \frac{[CO]_{i,j}^{n+1} - [CO]_{i,j}^n}{\Delta t} + L_x^+ [CO]^{n+1} + L_x^- [CO]^{n+1} + L_y^+ [CO]^{n+1} + \\ & + L_y^- [CO]^{n+1} + \sigma [CO]_{ij}^{n+1} = (M_{xx}^+ [CO]^{n+1} + L_{xx}^- [CO]^{n+1} + \\ & L_{yy}^+ [CO]^{n+1} + L_{yy}^- [CO]^{n+1}) + q_{ij} \delta_{ij}. \end{aligned} \quad (4.3)$$

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

Різницеве рівняння (4.3) розщеплюється на п'ять різницевих рівнянь так, щоб на кожному кроці враховувався лише один напрямок перенесення збурень, який визначається знаком при конвективній похідній. В цьому випадку різницеві рівняння набувають такий вигляд:

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

$$\begin{aligned}
& \frac{[CO]_{ij}^{n+k} - [CO]_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+[CO]^k + L_y^+[CO]^k) + \frac{\sigma}{4}[CO]_{ij}^k = \\
& = \frac{1}{4}(M_{xx}^+[CO]^k + M_{xx}^-[CO]^n + M_{yy}^+[CO]^k + M_{yy}^-[CO]^n); \quad (4.4)
\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
& \frac{[CO]_{ij}^k - [CO]_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^-[CO]^k + L_y^-[CO]^k) + \frac{\sigma}{4}[CO]_{ij}^k = \\
& = \frac{1}{4}(M_{xx}^-[CO]^k + M_{xx}^+[CO]^c + M_{yy}^-[CO]^k + M_{yy}^+[CO]^c); \quad (4.5)
\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
& \frac{[CO]_{ij}^k - [CO]_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+[CO]^k + L_y^-[CO]^k) + \frac{\sigma}{4}[CO]_{ij}^k = \\
& = \frac{1}{4}(M_{xx}^-[CO]^c + M_{xx}^+[CO]^k + M_{yy}^-[CO]^k + M_{yy}^+[CO]^c); \quad (4.6)
\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
& \frac{[CO]_{ij}^k - [CO]_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^-[CO]^k + L_y^+[CO]^k) + \frac{\sigma}{4}[CO]_{ij}^k = \\
& = \frac{1}{4}(M_{xx}^-[CO]^k + M_{xx}^+[CO]^c + M_{yy}^-[CO]^c + M_{yy}^+[CO]^k). \quad (4.7)
\end{aligned}$$

– на п'ятому кроці розщеплення враховуємо джерело забруднення

$$\frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i(t^{n+1/2})\delta(x - x_i)\delta(y - y_i)}{\Delta x \Delta y}. \quad (4.8)$$

У результаті розроблено метод прогнозу з урахуванням наявності усмоктувача, що має геометричну форму. Обчислено поле швидкості повітряного потоку на основі чисельного розв'язання рівняння Лапласа та поле концентрації оксиду вуглецю при розв'язанні рівняння масопереносу на базі кінцево-різницевого методу. Створено програмний пакет «Gases purifier», який дозволяє проводити ряд обчислювальних експериментів.



Рисунок 4.20 – Вид розрахункової області (гараж на території «Дніпропетровського маслоекстракційного заводу»): 1 – робоча зона; 2 – вантажна техніка; 3 – існуюча система вентиляції гаража

У роботі розглядався процес моделювання робочої зони працівника гаража при ремонті та експлуатації автотранспортної техніки промислового об'єкту «Дніпропетровського маслоекстракційного заводу» Олейна (рис. 4.20) для встановлення відсмоктувача.

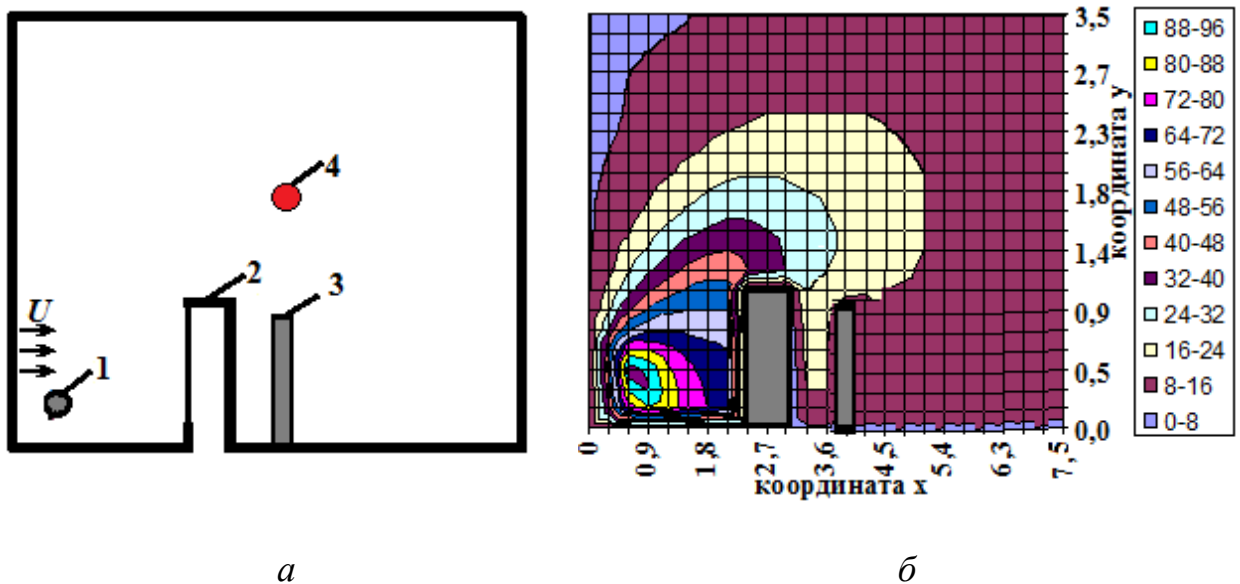
Вибір цієї зони пов'язаний з тим, що при ремонті та обслуговуванні вантажні автомобілі знаходяться з працюючими двигунами в гаражі впродовж 10–15 хвилин, тобто робітники, потрапляють під вплив викидів від

автотранспорту. Вирішувалася задача прогнозування ефекту застосування відсмоктувачів для зниження рівня загазованості повітряного середовища.

Геометричні розміри ділянки довжиною 7,5 м, шириною 3,5 м; коефіцієнт турбулентної дифузії $\mu_x = \mu_y = 2,01 \text{ м}^2/\text{с}$; інтенсивність надходження оксиду вуглецю від автотранспорту $Q = 0,02 \text{ г/с}$; діаметри отворів – 0,3 м, швидкість відбору оксиду вуглецю нижнім патрубком – 20 м/с, верхнім патрубком – 15 м/с ; відстань між патрубками – 0,3 м.

Математичне моделювання та чисельна реалізація проводилася для декількох сценаріїв. Результати чисельних розрахунків показано на наступних рисунках.

В першому сценарії площа відбору газів представляла собою тверду стінку (рис. 4.21 а), тобто відбір був відсутнім [42].



1 – джерело викиду (вихлопна труба автомобіля), 2 – закритий отвір для відбору газів, 3 – робоча зона (положення робітника), 4 – розташування органів дихання працівника

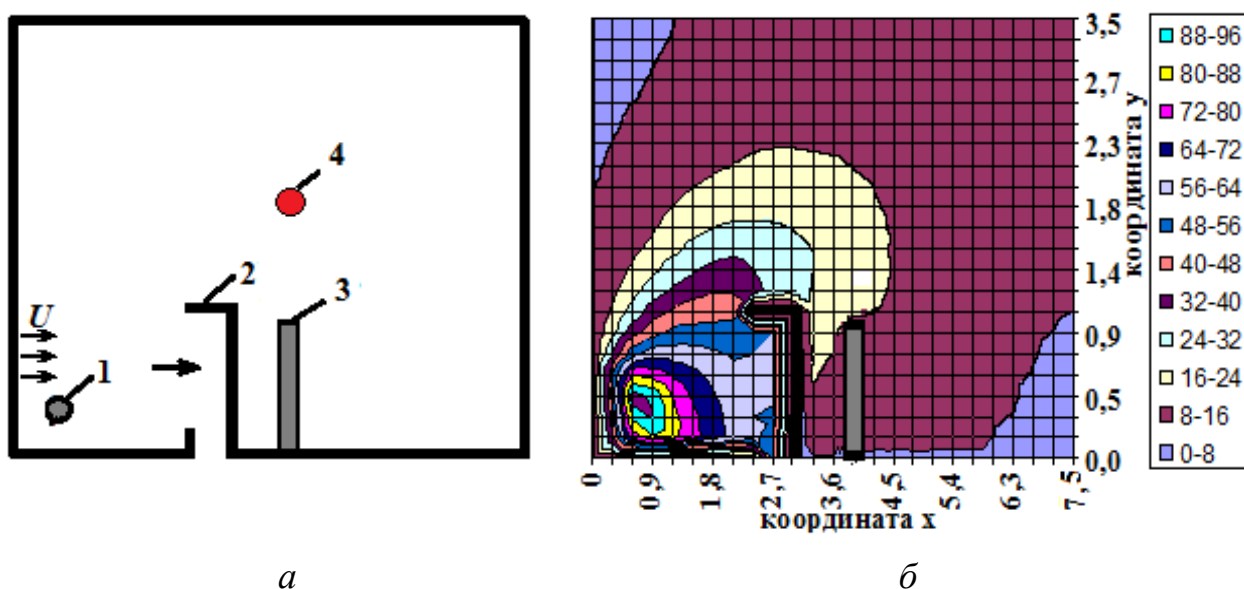
Рисунок 4.21 – Випадок відсутності відбору газу: а – схема математичної моделі; б – розподіл концентрації оксиду вуглецю в робочій зоні при відсутності відсмоктувача, $C_{\max} = 7,29 \text{ мг/м}^3$, (перший сценарій).

Цей сценарій розрахунку вважається базовим, з ним проводилося

порівняння наступних сценаріїв, коли усмоктувачі виконували відбір забруднення. В даному випадку тумба для відбору газу працює як екран, змінюючи положення та поведінку повітряного потоку в робочій зоні.

Як видно з рисунку 4.21 б, концентрація забруднення має достатньо високий рівень в робочій зоні, на рівні органів дихання складає 24 % від максимального значення, тому ризик хронічних захворювань через рік згідно формули (2.34) становить 44 %.

У другому сценарії розглядається ситуація, коли відбір забрудненого повітря відбувається через один отвір (рис. 4.22 а) [42].



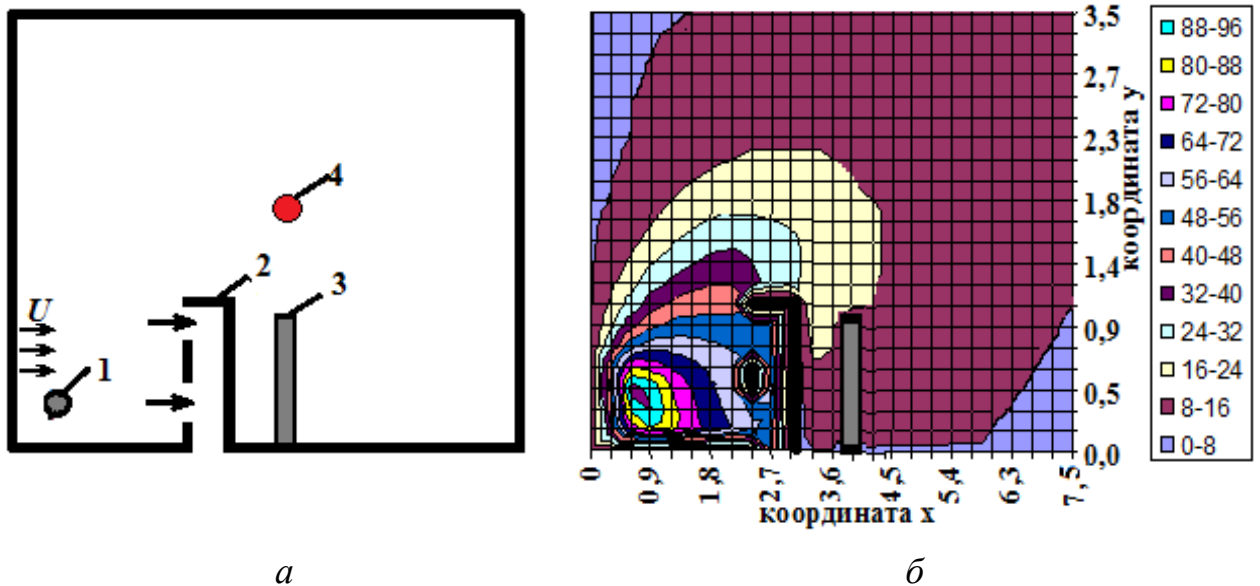
1 – джерело викиду (вихлопна труба автомобіля), 2 – відкритий отвір для відбору газів, 3 – робоча зона (положення робітника), 4 – розташування органів дихання працівника

Рисунок 4.22 – Випадок одного отвору відбору газів: а – схема математичної моделі; б – розподіл концентрації оксиду вуглецю в робочій зоні при наявності одного отвору відсмоктувача, $C_{\max}=7,14$ мг/м³, (другий сценарій)

Зона хімічного забруднення для даного сценарію показана на рисунку 4.22 б. В цьому випадку концентрація CO знижується і на рівні органів дихання складає 20 %, ризик захворювання через рік становить 33 %.

Таким чином, використання усмоктувача з одним отвором для відбору газів надало можливість знизити ризик виникнення хронічних захворювань на 11%.

В третьому сценарії розглядається ситуація, коли відбір забрудненого повітря виконується через два отвори (рис. 4.23 а) [42].



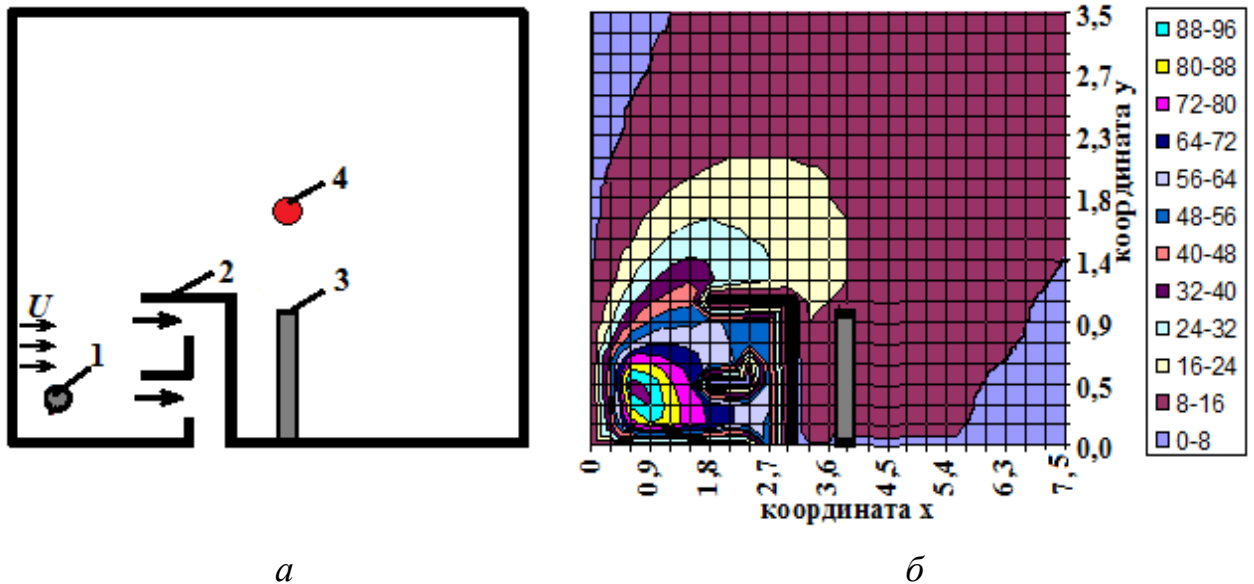
1 – джерело викиду (вихлопна труба автомобіля), 2 – відкриті отвори для відбору газів, 3 – робоча зона (положення робітника), 4 – розташування органів дихання працівника

Рисунок 4.23 – Випадок двох отворів відбору газів: а – схема математичної моделі; б – розподіл концентрації оксиду вуглецю в робочій зоні при наявності двох отворів відсмоктувача, $C_{\max}=7,15 \text{ мг/м}^3$, (третій сценарій)

Зона хімічного забруднення для даного сценарію показана на рис. 4.23 б. В цьому випадку концентрація CO на рівні органів дихання складає 21 %, ризик захворювання через рік становить 34 %.

Розглянутий сценарій показав, що наявність двох отворів у порівнянні з одним отвором не покращило ситуацію, а навпаки концентрація і ризик відповідно збільшилися на 1 %, оскільки зменшилась загальна площа отворів відбору газів.

В наслідок цього було розглянуто гіпотезу, стосовно якої запропоновано сценарій експерименту, коли на верхній частині отворів встановлюються напрямні пластини однакової довжини, розміри якої сумірні з діаметрами отворів (рис. 4.24 а) [25].

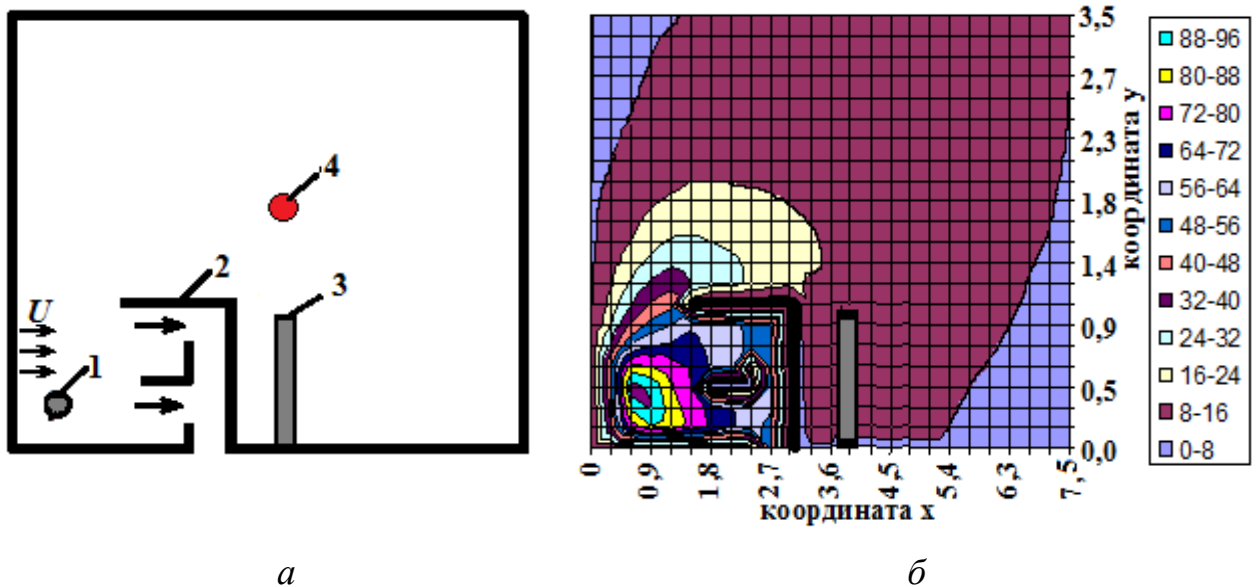


1 – джерело викиду (вихлопна труба автомобіля), 2 – відкриті отвори для відбору газів, 3 – робоча зона (положення робітника), 4 – розташування органів дихання працівника

Рисунок 4.24 – Випадок двох отворів та двох напрямних пластин однакової довжини при відборі газів: а – схема математичної моделі; б – розподіл концентрації оксиду вуглецю в робочій зоні при наявності двох отворів відсмоктувача і двох напрямних пластин однакової довжини, $C_{\max}=7,03 \text{ мг/м}^3$, (четвертий сценарій)

З гідродинамічної точки зору швидкість на рівні отворів зменшується, як було показано в роботі [158], до того ж вони допомагають спрямувати потік у сторону отворів, що було якісно доведено фізичним експериментом. Таким чином, зменшується концентрація CO і на рівні органів дихання складає 18 %, ризик захворювання через рік становить 28 % (рис. 4.24 б).

Надалі розглядається сценарій, коли довжина верхньої пластини удвічі більша за довжину нижньої (рис. 4.25 а).



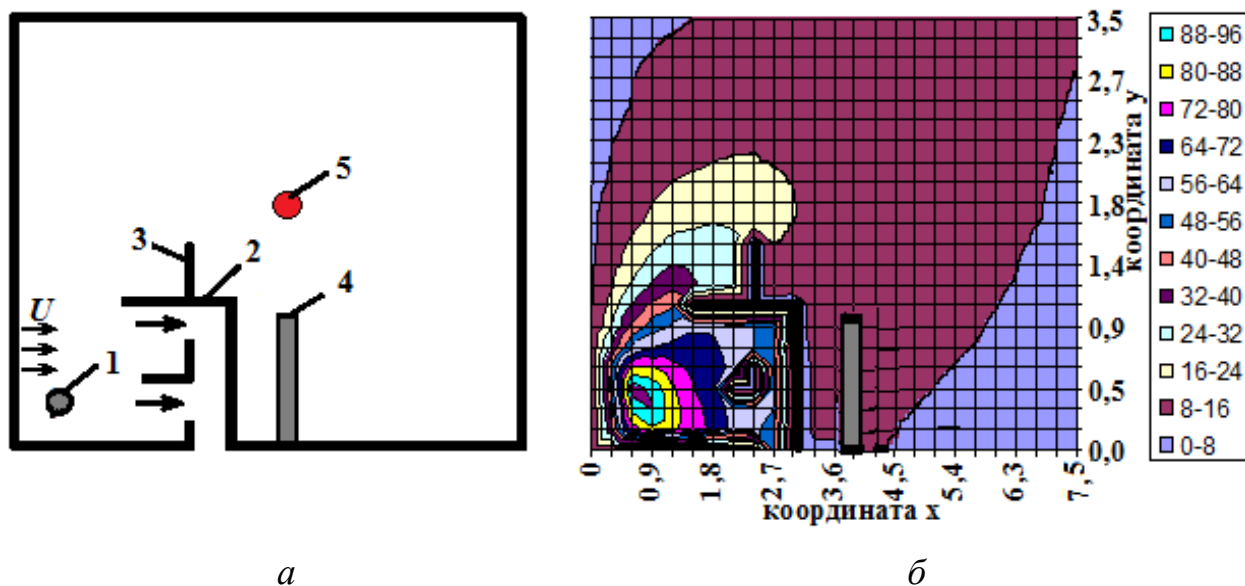
1 – джерело викиду (вихлопна труба автомобіля), 2 – відкриті отвори для відбору газів, 3 – робоча зона (положення робітника), 4 – розташування органів дихання працівника

Рисунок 4.25 – Випадок двох отворів та двох напрямних пластин різної довжини при відборі газів: *а* – схема математичної моделі; *б* – розподіл концентрації оксиду вуглецю в робочій зоні при наявності двох отворів відсмоктувача і двох напрямних пластин різної довжини, $C_{\max}=6,74 \text{ мг/м}^3$, (п'ятий сценарій)

Результат моделювання на базі побудованого методу показав, що застосування таких пластин дозволяє зменшити рівень концентрації CO до 16 % відносно до максимального значення, ризик захворювання через рік зменшується до 25 % (рис. 4.25 б).

Надалі проведено розрахунки поля концентрації CO у випадку вдосконаленої попередньої моделі, коли на верхній напрямній пластині встановлено вертикальну пластину (екран) однакової довжини з нижньою пластиною (рис. 4.26). Гідродинаміка процесу змінюється ще більше, з вільних кінців пластин сходять вихори, щоб значення швидкості біля гострих кромek не прямували до нескінченності згідно з постулатом Чаплигіна-Жуковського [78]. Вертикальна пластина гальмує потік, змінює його напрям, а в цей час верхній отвір відсмоктувача відбирає забруднене

повітря, тим самим зменшується концентрація забруднювача.



1 – джерело викиду (вихлопна труба автомобіля), 2 – відкриті отвори для відбору газів, 3 – робоча зона (положення робітника), 4 – розташування органів дихання працівника

Рисунок 4.26 – Випадок двох отворів, двох напрямних пластин різної довжини та екрана при відборі газів: *а* – схема математичної моделі; *б* – розподіл концентрації оксиду вуглецю в робочій зоні при наявності двох отворів відсмоктувача, двох напрямних пластин різної довжини та екрана, $C_{\max}=6,32 \text{ мг/м}^3$, (шостий сценарій)

Через те, що вертикальна пластина слугує бар'єром (екраном), рівень забруднення суттєво зменшується і складає 10 % відносно максимального значення, ризик захворювання через рік зменшується до 20 %.

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

$$R_3 = 1 - \exp \left[-0,174 \cdot \left(\frac{C}{ГДК_{с.д.} \cdot K_3} \right)^\beta \cdot t \right], \quad (4.9)$$

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 застосовується при рівні забруднення робочої зони до 10–15 $ГДК$.

Оцінка ефективності застосування відсмоктувачів виконувалась на основі розрахунку ризику виникнення хронічних захворювань у робітників, що знаходяться на відстані $l=1,5$ м від відсмоктувача. Ризик розраховувався на висоті $z=1,7$ м, що відповідає положенню органів дихання робітника. Результати розрахунку очікуваного ризику показано на рис. 4.27 протягом 5 років [25, 42].

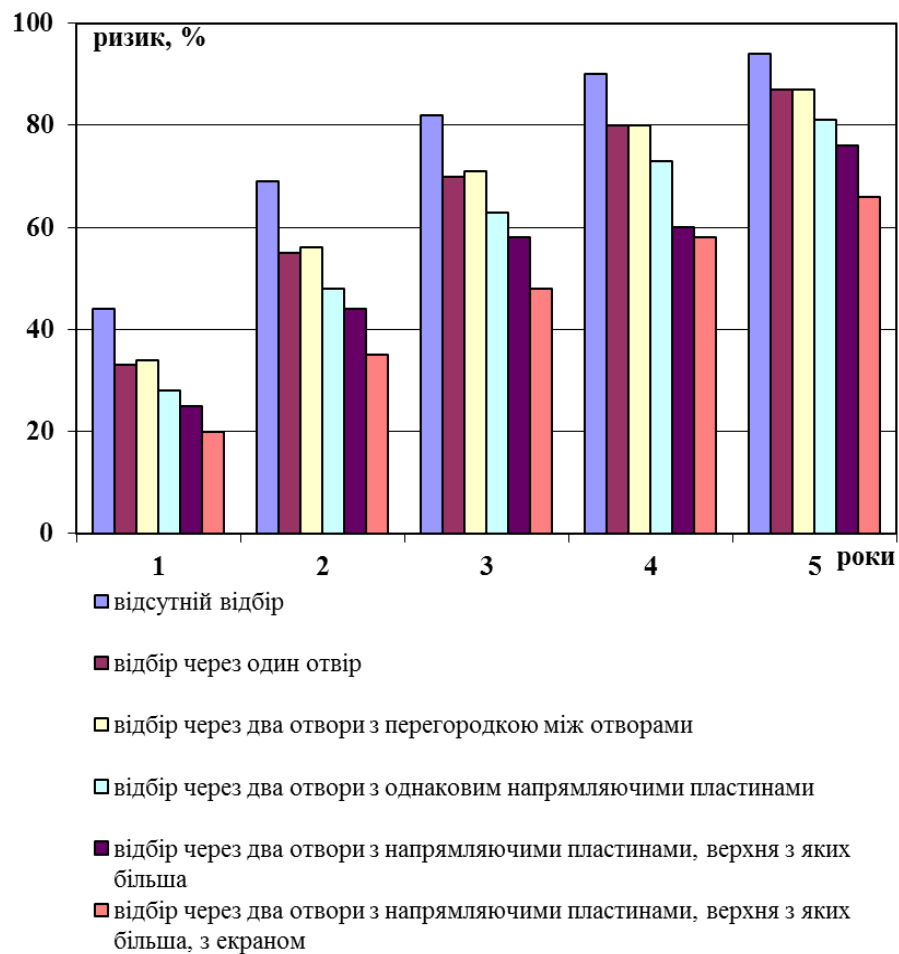


Рисунок 4.27 – Розподіл ризику протягом 5 років при різних випадках відбору забрудненого повітря

Як видно з даного рисунка, застосування двох отворів для відбору забрудненого повітря та двох напрямних пластинок дозволяє зменшити ризик виникнення хронічних захворювань у 1,8 разів порівняно з базовим. Встановлення додаткової вертикальної пластини (екрана) дозволяє зменшити ризик захворювання у 2,2 разів.

Отримані результати за розробленим методом прогнозу дозволяють зробити підсумок, який наведено у табл. 4.2.

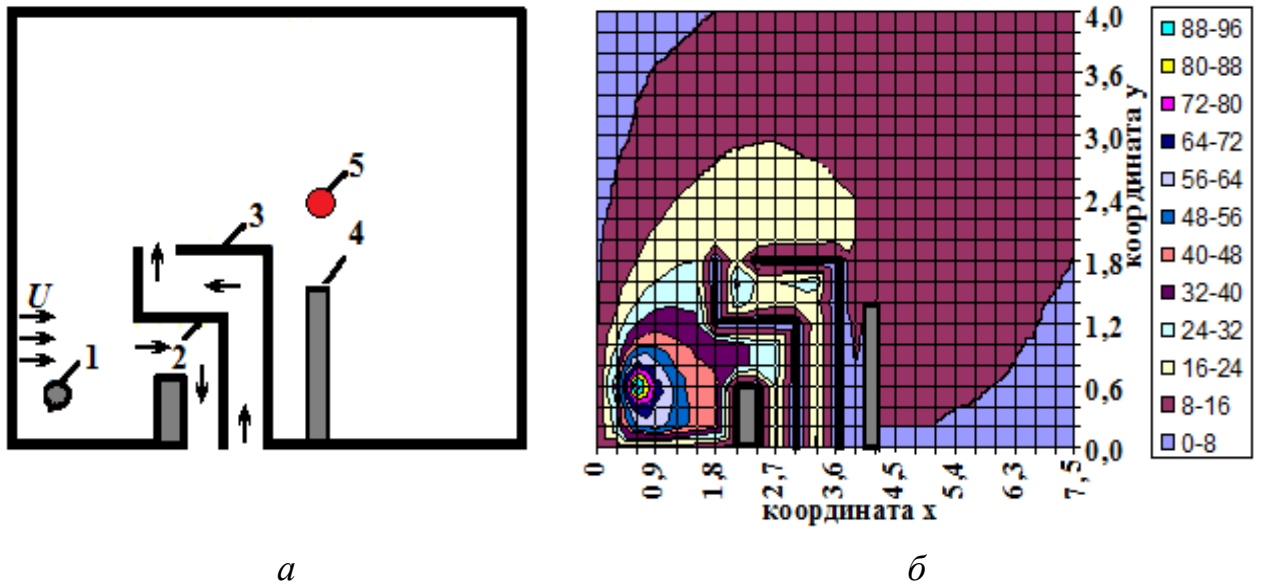
Таблиця 4.2 – Зміна значення концентрації CO і ризику для різних сценаріїв дослідження на рівні органів дихання (за розробленим методом)

Сценарій дослідження	Концентрація CO , у % відносно максимального значення	Рівень ризику хронічних захворювань через 1 рік, %
Відсутній відбір	24 %	44 %
Відбір через один отвір	20 %	33 %
Відбір через два отвори з перегородкою між отворами	21 %	34 %
Відбір через два отвори з однаковими напрямними пластинами	18 %	28 %
Відбір через два отвори з напрямними пластинами, верхня з яких більша	16 %	25 %
Відбір через два отвори з напрямними пластинами, верхня з яких більша, з екраном	10 %	20 %

У даному розділі роботи також розроблено метод прогнозу для розрахунку концентрації локальних зон забруднення атмосферного повітря для випадку відведення (скидання) забрудненого повітря. Як пропонують зарубіжні розробники [235], забруднене повітря можна відводити на більшу висоту, де воно швидше розсіюється за рахунок процесів дифузії (рис. 4.28 а), на рівні органів дихання концентрація складає 16 % відносно до максимального значення (рис. 4.28 б).

Задача, що розглядалася (рис. 4.28), має винятково методологічний характер: з однієї сторони вона показує можливості розробленого методу

розрахунку, а з іншої сторони вказує про можливість його використання, як інженерного рішення, а саме, коли пропонується зробити забір забрудненого повітря і виконати його відвід у вигляді повітряної завіси.

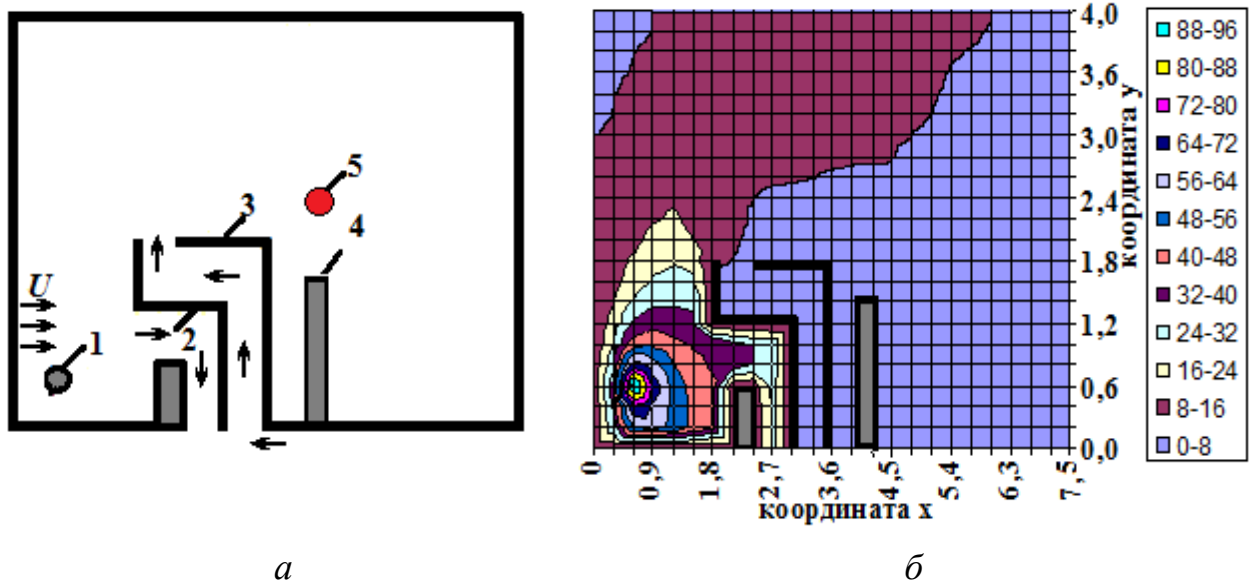


1 – джерело викиду (вихлопна труба автомобіля), 2 – відбір забрудненого повітря, 3 – патрубок для відведення забрудненого повітря, 4 – робоча зона (знаходження працівника), 5 – розташування органів дихання працівника

Рисунок 4.28 – Відведення загазованості без вдування чистого повітря:
а – схема математичної моделі; б – розподіл концентрації оксиду вуглецю

Для покращення дії зниження рівня концентрації забруднювача в розробленому методі чисельного розрахунку було враховано процес вдування чистого повітря за рахунок відповідних умов на вході в патрубок для відведення забрудненого повітря.

Якщо до забрудненого повітря при відведенні на більшу висоту вдувати чисте повітря (рис. 4.29 а), то значення концентрації значно знижується і на рівні органів дихання складає близько 8 % відносно до максимального значення (рис. 4.29 б). Можна бачити наочно, як змінюється поле концентрації (рис. 4.28 б) і (рис. 4.29 б). Зона забруднення зменшується у два рази.



1 – джерело викиду (вихлопна труба автомобіля), 2 – відбір забрудненого повітря, 3 – патрубок для вдуву чистого повітря та відведення забрудненого повітря, 4 – робоча зона (знаходження працівника), 5 – розташування органів дихання працівника

Рисунок 4.29 – Відведення загазованості із вдуванням чистого повітря:
а – схема математичної моделі; *б* – розподіл концентрації оксиду вуглецю

Ризик виникнення хронічних захворювань за 1 рік зменшується від 33 % до 2 %, за 5 років від 85 % до 15 %, а за 10 років від 98% до 20 % (рис. 4.30) [25, 42].



Рисунок 4.30 – Розподіл ризику на протязі 10 років при різних випадках відведення забрудненого повітря

4.2 Моделювання процесу нейтралізації угарного газу, що потрапляє від автотранспорту до робочих зон на промислових майданчиках

Вихлопні гази є основним джерелом токсичних речовин двигунів внутрішнього згоряння. Вони представляють собою неоднорідну суміш газоподібних речовин із різноманітними хімічними і фізичними властивостями. Ця суміш складається з продуктів повного і неповного згоряння палива, надлишкового повітря, аерозолів і різних мікродомішок (як газоподібних, так і у вигляді рідких і твердих частинок), що надходять із циліндрів двигунів у його випускну систему. Основними нормованими токсичними компонентами вихлопних газів двигунів є оксиди вуглецю, азоту та вуглеводні сполуки. Оксид вуглецю (CO , чадний газ) – прозорий, отруйний газ, що не має запаху, трохи легший за повітря, погано розчинний у воді. Оксид вуглецю – продукт неповного згоряння палива, він утворюється при незадовільному розпилюванні палива та його згорянні з нестачею кисню, а також внаслідок дисоціації діоксиду вуглецю при високих температурах. При подальшому згорянні під час розширення можливе горіння оксиду вуглецю при наявності кисню з утворенням діоксиду вуглецю, що триває у випускному трубопроводі. При експлуатації дизелів концентрація CO у вихлопних газах невелика (приблизно 0,1–0,2 %), тому концентрацію CO визначають для бензинових двигунів. Окислення CO в CO_2 відбувається у випускній трубі, а також за рахунок нейтралізаторів, які встановлюються на сучасних автомобілях, у зв'язку з необхідністю виконання норм токсичності. Автомобільний транспорт є одним із джерел надходження CO у навколишнє середовище, а особливо в робочі зони працівників на відкритій місцевості промислових підприємств та на прилеглій території.

Одним із активних методів захисту є відбір (відсмоктування) забруднюючих речовин біля дороги. Цій проблемі були присвячені розробки та дослідження попереднього параграфу четвертого розділу. Як відомо, для

нейтралізації відведеного забрудненого повітря можуть використовуватися каталізatori в системі відводу, але вони є дорогими.

Дана частина роботи присвячена дослідженню процесу зменшення концентрації оксиду вуглецю за рахунок його нейтралізації водяною парою при відборі вихлопних газів автотранспорту (рис. 4.31) [20–22, 30, 37].

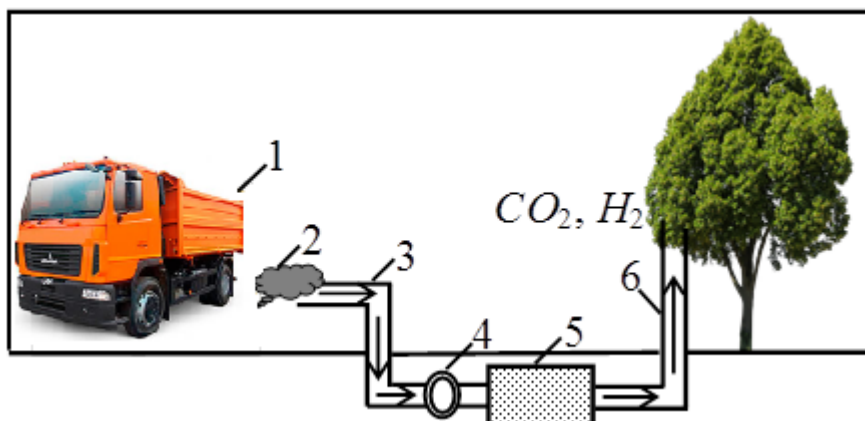


Рисунок 4.31 – Схема відбору вихлопних газів: 1 – автотранспорт, 2 – джерело викиду, 3 – газовідбір, 4 – відсмоктувач (пристрій, що відбирає забруднене повітря), 5 – камера реакції, 6 – газовідвід

Пропонується для нейтралізації оксиду вуглецю у вихлопних автомобільних газах використовувати подачу водяної пари до камери реакції. Розглядаються два сценарії схеми нейтралізації (рис. 4.32–4.33) [37].

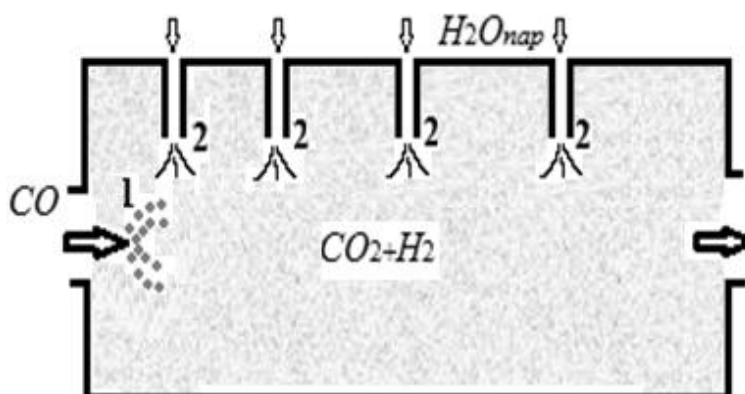


Рисунок 4.32 – Камера нейтралізації оксиду вуглецю (перший сценарій): 1 – підвід оксиду вуглецю, 2 – подача водяної пари

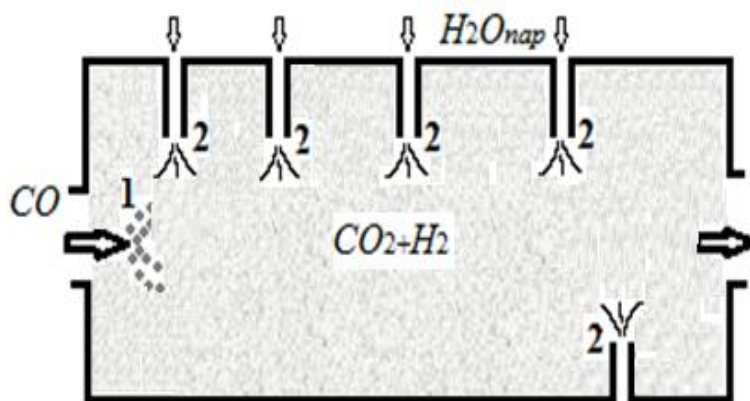
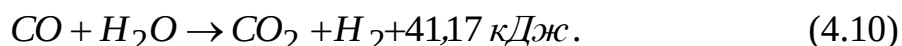


Рисунок 4.33 – Камера нейтралізації оксиду вуглецю (другий сценарій):
1 – підвід оксиду вуглецю, 2 – подача водяної пари

Установка може працювати як у проточному режимі, коли вхідний і вихідний клапани відкриті, так і в режимі типу «усереднювача», коли вихідний клапан закритий, газ накопичується в камері, а потім відбувається нейтралізація, отримується усереднена концентрація.

В цьому випадку відбувається наступна реакція [20–22, 30, 37]:



При застосуванні такого підходу необхідно мати інформацію про ефективність роботи камери змішування. Складність оцінювання полягає в тому, що надходження CO в камеру нерівномірне, тому доцільно перед камерою розміщувати датчик рівня CO та згідно з його показниками подавати відповідну кількість водяної пари. Процес розрахунку виконується на основі підходу, що був розглянутий у попередніх роботах [20–22]. Математичне моделювання процесу нейтралізації оксиду вуглецю водяною парою здійснюється послідовно: по-перше, розраховується поле швидкості газового потоку всередині камери, що є основою розв’язку гідродинамічної задачі; по-друге, виконується розв’язання задачі масопереносу для оксиду вуглецю та водяної пари.

Записується рівняння для потенціалу швидкості P газового потоку [113–114]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0. \quad (4.11)$$

Ставляться відповідні граничні та початкові умови з урахуванням того, що вісь Y напрямлена вертикально вгору: на стінках камери ставиться гранична умова непротікання $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$, де $\vec{n}$ – одиничний вектор зовнішньої нормалі до твердої стінки; на границі входу газового потоку із патрубку подачі газу $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$, де V_n – відоме значення швидкості газового потоку; на границі, де газовий потік виходить із камери (рис. 4.30–4.31) $P = P_0 + \text{const}$, де P_0 – деяке число (умова Діріхле).

Для чисельного інтегрування рівняння Лапласа (4.11) використовується метод Самарського [113–114]. Спочатку рівняння Лапласа (4.11) приводиться до рівняння еволюційного виду із застосуванням встановлення рішення за часом:

$$\frac{\partial P}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (4.12)$$

де η – фіктивний час, при $\eta \rightarrow \infty$, розв'язок рівняння (4.12) прямує до розв'язку рівняння Лапласа. Для розв'язання даного рівняння необхідно задати початкову умову, тобто поле потенціалу при $\eta = 0$. Наприклад, можна прийняти $P = 0$ в усій розрахунковій області при $\eta = 0$.

Різницеви рівняння в цьому випадку мають вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{P_{i,j}^{n+1/2} - P_{i,j}^n}{0,5\Delta\eta} = & \frac{P_{i+1,j}^n - P_{i,j}^n}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + \\ & + \frac{P_{i,j+1}^n - P_{i,j}^n}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i,j-1}^{n+1/2}}{\Delta y^2}, \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1/2}}{0,5\Delta\eta} = & \frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + \\ & + \frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i,j-1}^{n+1/2}}{\Delta y^2}. \end{aligned} \quad (4.14)$$

При використанні методу Самарського чисельне розв'язання двовірного рівняння (4.12) для визначення потенціалу швидкості здійснюється двома кроками (4.13–4.14). На першому знаходиться «проміжне» значення потенціалу $P_{i,j}^{n+1/2}$ на часовому шарі « $n+1/2$ », а на другому – «остаточне» значення потенціалу $P_{i,j}^{n+1}$ на часовому шарі « $n+1$ ».

Гранична умова непротікання $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ реалізується шляхом використання фіктивних різницевих комірок.

За знайденими значеннями потенціалу швидкості розраховуються компоненти вектору швидкості газового потоку на гранях різницевих комірок у кожний момент часу [143]:

$$u_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, \quad v_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y} \quad (4.15)$$

Процес розповсюдження оксиду вуглецю та водяної пари всередині камери виконується на основі рівняння масопереносу, яке вирішується як для оксиду вуглецю, так і для водяної пари [20–22, 30, 37, 143].

$$\frac{\partial[CO]}{\partial t} + \frac{\partial u[CO]}{\partial x} + \frac{\partial v[CO]}{\partial y} = \text{div}(\mu \text{grad}[CO]) + Q_0 \delta(x - x_0)(y - y_0), \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial[H_2O]_{\text{nap}}}{\partial t} + \frac{\partial u[H_2O]_{\text{nap}}}{\partial x} + \frac{\partial v[H_2O]_{\text{nap}}}{\partial y} =$$

$$= \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad}[H_2O]_{\text{пар}}) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (4.17)$$

де $[CO]$, $[H_2O]_{\text{пар}}$ – концентрація оксиду вуглецю (водяної пари); u, v – компоненти вектору швидкості; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коефіцієнт турбулентної дифузії; Q_0, Q_i – інтенсивність подачі оксиду вуглецю (водяної пари); $\delta(x - x_0) \delta(y - y_0), \delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$ – дельта-функція Дірака для дії джерела подачі оксиду вуглецю (водяної пари); $(x_0, y_0), (x_i, y_i)$ – координати розташування джерела подачі оксиду вуглецю (водяної пари); t – час.

Для розв'язання рівнянь (4.16–4.17) ставляться наступні граничні умови [20–22]: на ділянці входу оксиду вуглецю (водяної пари) в розрахункову область виконується гранична умова виду $[CO]|_{\text{вх}}$, $[H_2O]_{\text{пар}}|_{\text{вх}}$ в момент часу $t=0$; на ділянці, де нейтралізований газ відводиться з розрахункової області, в чисельній моделі виконується «м'яка» гранична умова виду $[CO]_{i+1,j} = [CO]_{i,j}$, $[H_2O]_{\text{пар } i+1,j} = [H_2O]_{\text{пар } i,j}$; на твердих стінках реалізується умова непротікання.

Чисельне інтегрування рівнянь (4.16–4.17) проводиться на прямокутній різницевій сітці за допомогою різницевого аналогу (4.3) та неявної п'ятикрокової різницевої схеми розщеплення (4.4) – (4.8) [143, 20–22].

Алгоритм розв'язання задачі передбачає наступну послідовність:

- у початковий момент часу камера заповнена оксидом вуглецю, вирішується гідродинамічна задача і визначається поле швидкості газового потоку всередині камери;

- розв'язується рівняння (4.16) для визначення концентрації оксиду вуглецю всередині камери на новий момент часу;

- потім розв'язується рівняння (4.17) для визначення концентрації водяної пари всередині камери на новий момент часу;

– далі в кожному різницевому осередку виконується перерахунок концентрації оксиду вуглецю та водяної пари внаслідок їх хімічної взаємодії, що визначається стехіометричними співвідношеннями. Вважається, що хімічна реакція протікає на часовому проміжку Δt .

У результаті обчислюються нові значення концентрації оксиду вуглецю та водяної пари, розрахунок повторюють, починаючи з другого кроку.

На основі розробленого методу нейтралізації оксиду вуглецю водяною парою та чисельної його реалізації було створено програмний пакет «Neutralization CO», який дозволяє проводити ряд обчислювальних експериментів. На наступних рис. 4.34–4.38 показано результати чисельних розрахунків. Процес нейтралізації відбувається таким чином, що спочатку в камеру надходять вихлопні гази, які містять оксид вуглецю в момент часу t_0 , потім подається водяна пара. Геометричні розміри задано у співвідношенні довжини та ширини 2:1, $\mu_x = \mu_y = 0,7 \text{ м}^2/\text{с}$, $\Delta t = 0,1 \text{ с}$. На рисунках 4.34–4.36 наведено розподіл концентрації оксиду вуглецю в різні моменти часу для випадку, коли водяна пара подається лише зверху (рис. 4.32).

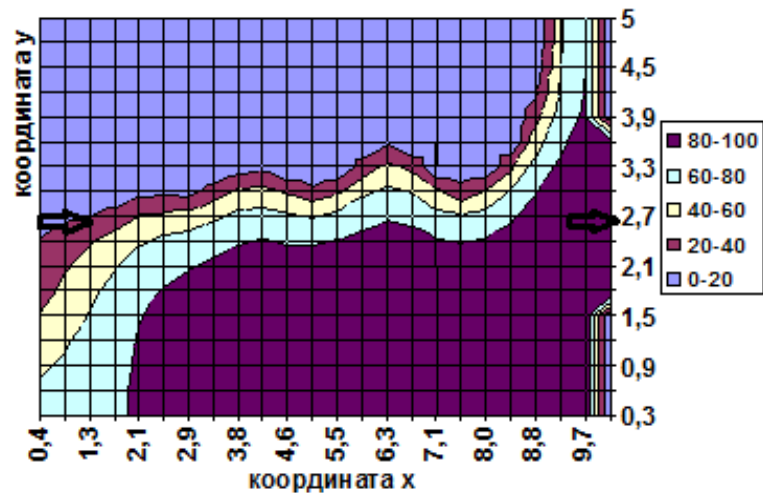


Рисунок 4.34 – Розподіл концентрації оксиду вуглецю (перший сценарій): $t=1 \text{ с}$, $C_{\max} = 2,67 \text{ мг/м}^3$ [37]

Значення концентрації оксиду вуглецю представлено у відсотках від максимального значення в камері нейтралізації. Зменшення концентрації

відбувається за напрямком руху потоку, в зоні розташування форсунок подачі водяної пари цей процес відбувається дуже швидко, але в нижньому правому куті дія нейтралізатора проявляється повільніше, спостерігається наявність застійних зон (рис. 4.35–4.36), тому пропонується в цілях прискорення даного процесу розмістити ще одну форсунку подачі водяної пари знизу рис. 4.33.

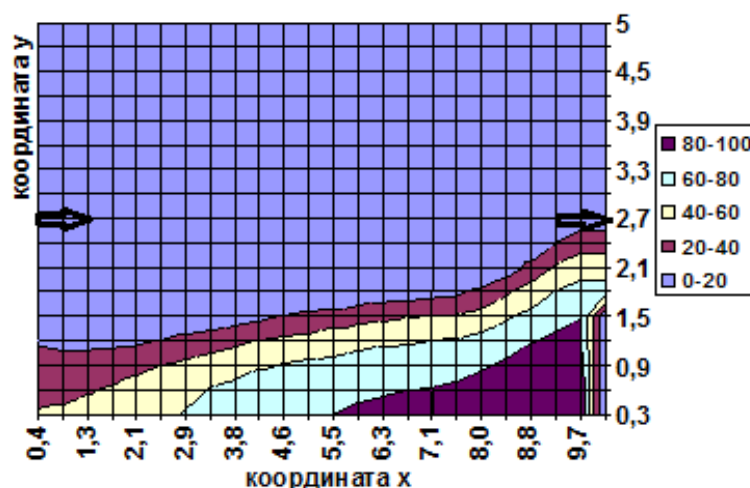


Рисунок 4.35 – Розподіл концентрації оксиду вуглецю (перший сценарій): $t = 1,6$ с, $C_{\max} = 2,42$ мг/м³ [37]

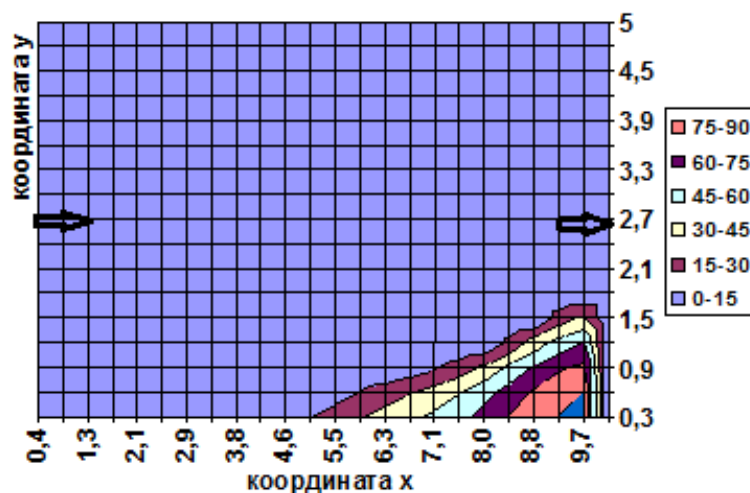


Рисунок 4.36 – Розподіл концентрації оксиду вуглецю (перший сценарій): $t = 2$ с, $C_{\max} = 1,56$ мг/м³ [37]

Розподіл концентрації оксиду вуглецю в різні моменти часу та динаміка зміни для другого сценарію наведено на рис. 4.37–3.38. На момент часу 1,6 с

концентрація оксиду вуглецю складає менше 5 %, зона забруднення практично відсутня.

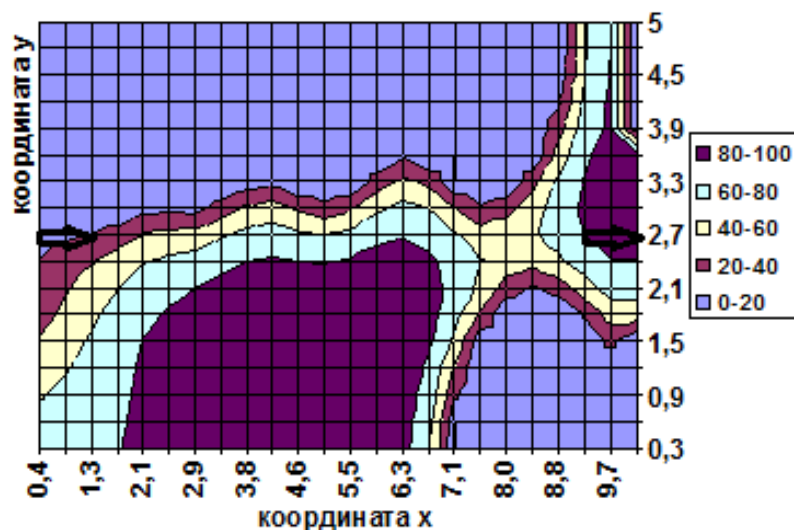


Рисунок 4.37 – Розподіл концентрації оксиду вуглецю (другий сценарій): $t = 1$ с, $C_{\max} = 2,64$ мг/м³ [37]

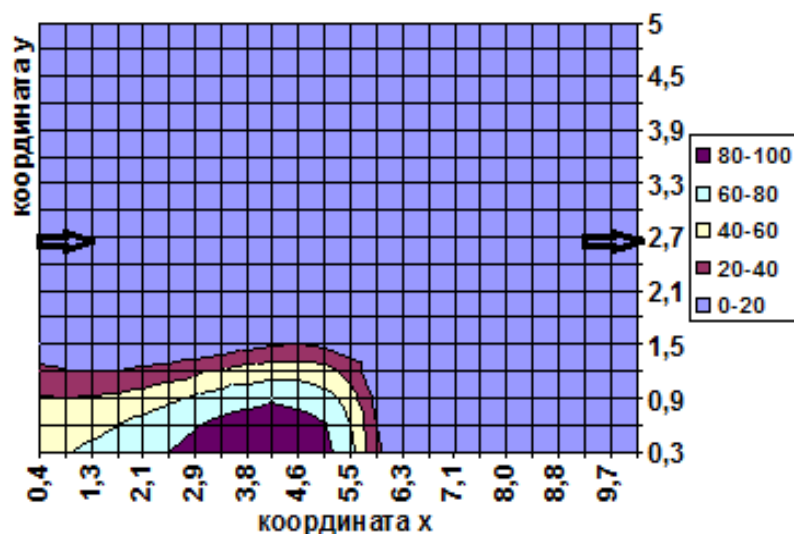


Рисунок 4.38 – Розподіл концентрації оксиду вуглецю (другий сценарій): $t = 1,6$ с, $C_{\max} = 1,71$ мг/м³ [37]

У результаті проведеного дослідження було розроблено метод нейтралізації оксиду вуглецю водяною парою, що дозволив отримати наступні результати:

- обчислити поле швидкості оксиду вуглецю в камері змішування при розв'язку гідродинамічної задачі;

- дослідити динаміку зміни концентрації оксиду вуглецю та водяної пари при розв’язку задачі масопереносу;
- виявити, що в камері нейтралізації можуть утворюватися «застійні» зони та розглянути способи їх уникнення.
- створити програмне забезпечення, що дозволяє проводити оперативні обчислювальні експерименти для дослідження зміни концентрації оксиду вуглецю з урахуванням форми камери, розташування форсунок подачі водяної пари, потужності джерел та їх місця знаходження.

4.3 Прогнозування параметрів мікроклімату в робочих зонах на відкритій місцевості при використанні зволожувача

Вологість повітря є одною із складових забезпечення комфортного мікроклімату. Всі зволожувачі повітря поділяються на побутові і промислові. При цьому, якщо побутові необхідні для підтримки комфортних умов для самопочуття людини, то застосування промислових зволожувачів в значній мірі впливає на технологічний процес і якість готової продукції. На рисунку 4.39 представлено застосування зволожувачів для комфортного перебування працівників торгівлі на відкритій місцевості та споживачів [43].



Рисунок 4.39 – Застосування зволожувачів в робочих зонах на відкритій місцевості [43]

Розв'язання задачі про прогнозування параметрів мікроклімату в робочій зоні при використанні зволожувача розбивається на два основні етапи. На першому етапі виконується розв'язання рівнянь, що моделюють розсіювання води, водяної пари, зміну температури під дією вітру та атмосферної дифузії (4.17–4.19) [43, 143].

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \mu \Delta C + \sum_{i=1}^n Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial uW}{\partial x} + \frac{\partial vW}{\partial y} = \mu \Delta W, \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} = a \Delta T, \quad (4.19)$$

де C – концентрація водяних крапель у повітрі; u, v – компоненти вектору швидкості вітру; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коефіцієнт турбулентної дифузії; x_i, y_i – координати джерела потрапляння крапель води; $\delta(x - x_0) \delta(y - y_0)$ – дельта-функція Дірака, за допомогою якої моделюється потрапляння крапель води в атмосферу. Значення коефіцієнтів дифузії розраховуються за формулами: $\mu_x = (0,1 \div 1) \cdot U$, $\mu_y = (0,1 \div 1) \cdot U$, де U – швидкість вітру, W – концентрація водяної пари у повітрі, T – температура повітря, σ враховує швидкість випарювання води, a – коефіцієнт температуропровідності [143].

Розробка методу включає розв'язання рівнянь (4.17)–(4.19) за допомогою кінцево-різницевого методу, чисельне інтегрування рівнянь (4.17–4.19) проводиться на прямокутній різницевій сітці за допомогою різницевого аналогу (3.39) та неявної п'ятикрокової різницевої схеми розщеплення (3.40) – (3.44) [80, 143].

На другому етапі розрахунку виконується моделювання процесу випарювання крапель води. Для цього використовується рівняння (4.20) [43]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\sigma \cdot (C - C_n), \quad (4.20)$$

де C_n – концентрація насиченого пару в конкретному контрольному об'ємі при конкретній температурі повітря в цьому об'ємі:

Зміна концентрації C води в кожному контрольному об'ємі моделюється рівнянням першого порядку [43]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\sigma \cdot C, \quad (4.21)$$

де σ враховує швидкість випарювання крапель води. Аналітичний розв'язок даного рівняння можна записати у виді $C = C_0 \cdot e^{-\sigma t}$, де C_0 – початкове значення концентрації води в контрольному об'ємі. Використовуючи цю залежність можна приблизно оцінити значення коефіцієнта σ виходячи із умови $e^{-10} \approx 0$, тоді $\sigma t = 10$, t – час випаровування, який приймається рівним 10^{-2} с для крапель води $d = 1$ мкм, що відповідає такому стану води, як туман. Звідкіля і отримаємо орієнтовне значення коефіцієнта σ .

На другому етапі в кожному різницевого осередку відбувається перерахунок температури повітря у зв'язку з випаровуванням крапель води. Для проведення експрес-розрахунку даного процесу використовується наступний підхід.

Нехай тепло, що було використане на випарювання води елементарної маси dm , складає $Q_w = r \cdot dm$, $r = 2,3 \cdot 10^6$ Дж/кг. Це тепло буде надходити з навколишнього середовища, тобто з повітря, величина цього тепла розраховується наступним чином [43]:

$$Q_{\text{повітря}} = m_{\text{cell}} \cdot c \cdot T^n,$$

де m_{cell} – маса повітря в комірці, c – питома теплоємність, T^n – поточний момент часу.

Процес випарювання призводить до зміни кількості тепла в контрольному об'ємі повітря [43]:

$$Q_{\text{повітря}} - Q_w = m_{\text{cell}} \cdot c_{\text{повітря}} \cdot T^n - r \cdot dm.$$

Маса і об'єм повітря в комірці становлять [43]:

$$m_{\text{cell}} = \rho_{\text{повітря}} \cdot W_{\text{комірки}},$$

$$W_{\text{cell}} = h_x \cdot h_y = 1.$$

У результаті температура навколишнього середовища змінюється до T^{n+1} , а в комірці відбувається зміна кількості теплоти [43]:

$$m_{\text{cell}} \cdot c_{\text{повітря}} \cdot T^{n+1} = m_{\text{cell}} \cdot c_{\text{повітря}} \cdot T^n - r \cdot dm.$$

З останнього співвідношення розраховується температура на новому часовому кроці $n+1$ за формулою [43]:

$$T^{n+1} = T^n - \frac{r \cdot dm}{m_{\text{cell}} \cdot c_{\text{повітря}}}. \quad (4.22)$$

При розрахунку в кожному контрольному об'ємі враховується значення температури точки роси, яке визначається за допомогою приладу згідно зі значеннями температури навколишнього середовища і вологості.

Для одночасного оцінювання температури і вологості повітря доцільно використовувати ефективну температуру повітря, яка розраховується за формулою [43]:

$$T_{\text{app}} = -2,653 + 0,994 \cdot T_{\text{air}} + 0,0153 \cdot T_{\text{dewpt}}^2,$$

де T_{app} – ефективна температура, T_{air} – температура повітря, T_{dewpt} – температура точки роси.

Вона розраховується на базі інформації про відносну вологість за формулою [43]:

$$T_{dewpt} = \frac{b \cdot \gamma(T, RH)}{a - \gamma(T, RH)},$$

де $\gamma(T, RH)$ обчислюється за формулою [43]:

$$\gamma(T, RH) = \frac{a \cdot T}{b + T} + \ln(RH / 100),$$

де T – температура повітря, RH – відносна вологість, a, b – константи, $a=17,271$, $b=237,7$. Схематизація процесу випаровування краплі представлена на рис. 4.40.

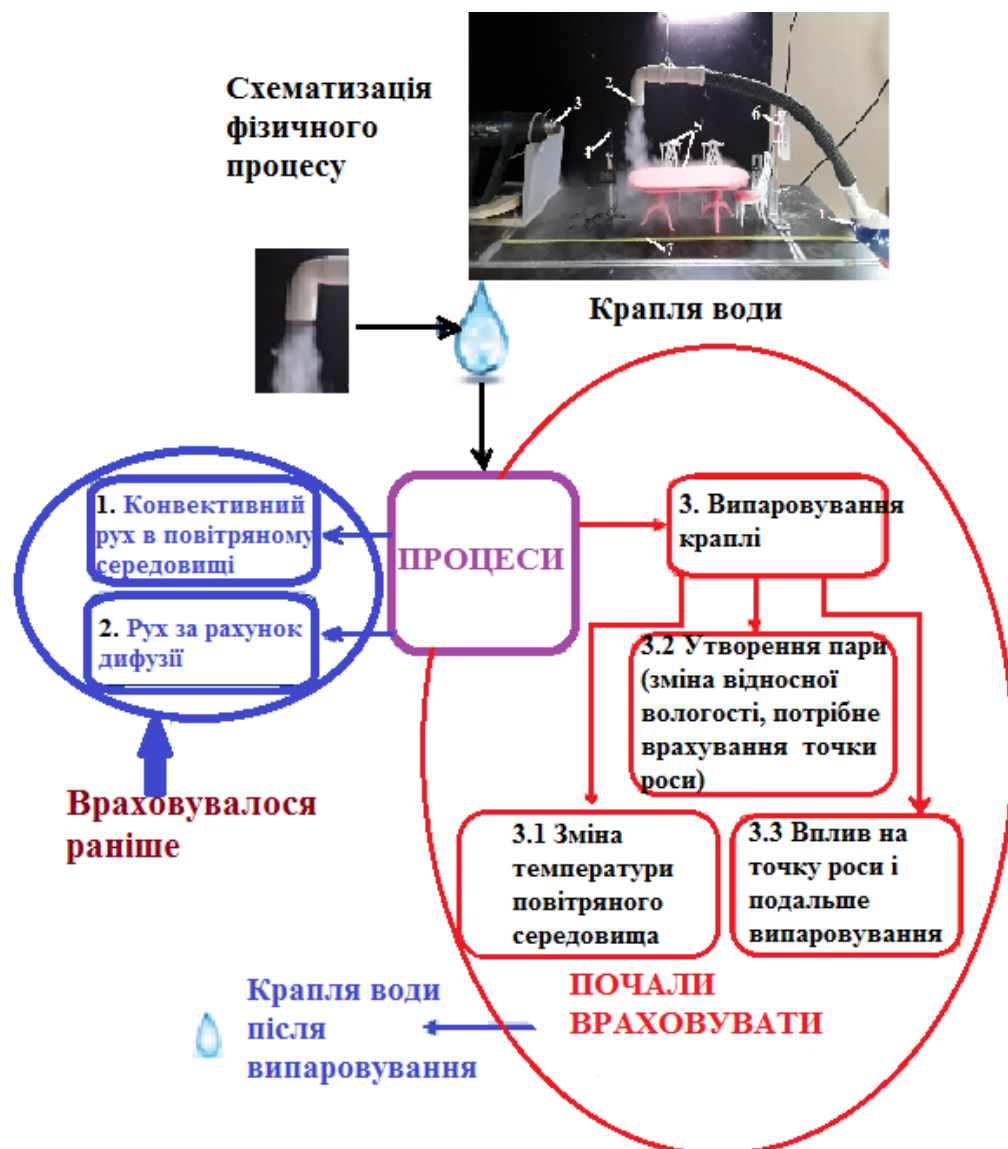


Рисунок 4.40 – Схематизація фізичного процесу в розрахунковому методі зволоження

На першому етапі дослідження було проведено експеримент по моделюванню робочої зони на вулиці (у відкритому кафе). Елементи меблів були представлені в масштабі 1:10 (рис. 4.41), моделювання проводилося по числу Рейнольдса. Подача дрібнодисперсної води здійснювалася вгору робочої зони, як це відбувається в кафе.

В експерименті використовувався ультразвуковий зволожувач повітря Supra HDS-104 з об'ємною витратою $Q = 300 \text{ мл/год}$. Випаровування відбувається за рахунок високочастотних (ультразвукових) коливань спеціальної мембрани, яка примусово перетворює воду на пару, що має температуру холодної води, тому такий тип випаровування часто називають «холодний пар». Принцип дії полягає в тому, що вода з бачка подається на вібруючу з високою (ультразвуковою) частотою пластину, де вода розбивається на дрібнодисперсну водяну суспензію. Потік повітря, що створюється вентилятором, подає водяну суспензію, де вона переходить в пароподібний стан [43].

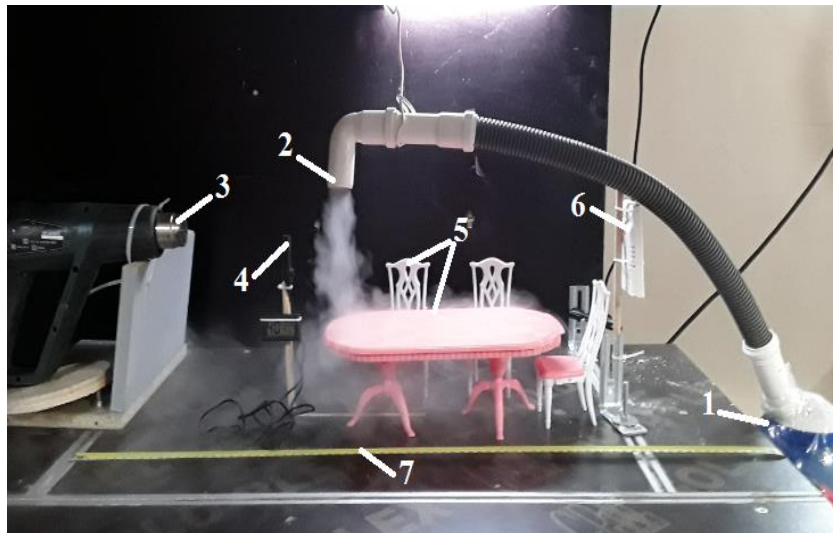


Рисунок 4.41 – Схема експериментальної установки $V = 0 \text{ м/с}$, $Q = 0,083 \text{ мл/с}$: 1 – зволожувач, 2 – патрубок подачі пари, 3 – напірний вентилятор, 4, 6 – прилади для вимірювання вологості, 5 – меблі та робоча зона, 7 – пристрій для вимірювання відстані, (перший сценарій)

Пара, що випускається, зовні дуже схожа на туман. Волога, отримана за рахунок роботи мембрани, захоплюється потоком повітря від вбудованого в зволожувач вентилятора і потрапляє в повітряний потік через спеціальну насадку-розпилювач. Розпилювач сконструйований таким чином, щоб подати аерозоль на якомога далеку відстань від самого зволожувача.

На рисунку 4.41 показана експериментальна установка, яка складалася із зволожувача повітря Supra HDS-104 з об'ємною витратою $Q = 300$ мл/год, від якого через допоміжний патрубок подавалася пара на висоті від поверхні установки $H = 25$ см. В початковий момент напірний вентилятор не працює, пара подається через отвір $d = 3$ см з постійною витратою $Q = 0,083$ мл/с. Для вимірювання вологості використовувався прилад Termo Hygrometer DC105. Вимірювання вологості проводилися на висоті 17 см і на різній відстані від джерела емісії. Повітряний потік утворювався каналним вентилятором Домовент 125 ВКО 188 м³/год, швидкість повітряного потоку вимірювалася за допомогою анемометра – PM 6252B Digital Anemometer. Швидкість повітряного потоку складала $V = 1,35 - 1,48$ м/с, $T = 21^\circ\text{C}$. В якості характерного розміру обиралася довжина столу $l = 0,29$ м, в'язкість повітря складала $\nu = 15,04 \cdot 10^{-6}$ м²/с, в якості критерія подібності застосовувалося число Рейнольдса, яке дорівнювало $Re = \frac{V \cdot l}{\nu} = 0,3 \cdot 10^5$.

У роботі розглядалося два сценарії подачі об'ємної секундної витрати пари. В першому сценарії – об'ємна секундна витрата $Q = 0,083$ мл/с, в другому сценарії – об'ємна секундна витрата $Q = 1,167$ мл/с. Проводилися вимірювання вологості на різній відстані від джерела подачі пари. Одночасно, в метод чисельного розрахунку вносилися початкові дані: об'ємна секундна витрата $Q = 1,167$ мл/с, швидкість набігаючого потоку $V = 1,35 - 1,48$ м/с та інші параметри. Результати експериментальних вимірювань та розрахункові дані отримані за допомогою розробленого методу наведено в табл. 4.3 – 4.4.

Таблиця 4.3 – Вологість на різних відстанях від джерела емісії
 $Q = 0,083$ мл/с, (перший сценарій)

Відстань, см	Вологість, % (експеримент)	Вологість, % (розрахунок за методом)
5	91,5–93,5	90,2
10	82,7–87,3	81,7
15	76,4–79,2	75,9
20	63,6–67,5	62,8
25	51,2–57,4	50,6
30	44,5–46,1	43,3
35	40,5–43,3	40,1
40	38,4–39,7	37,5
45	34,5–36,1	34,1

На рисунку 4.42 показано формування поля туману, що відповідає першому сценарію потужності джерела емісії пару $Q = 0,083$ мл/с. Дрібнодисперсні краплі води зносяться повітряним потоком в верхній частині робочої зони [43].



Рисунок 4.42 – Поле туману: $V = 1,35 - 1,48$ м/с, $Q = 0,083$ мл/с (перший сценарій) [43].

Далі наводяться результати досліджень для другого сценарію, коли потужність джерела емісії збільшена, рис. 4.43 – повітряний потік відсутній, тобто $V = 0$ м/с, рис. 4.44 – швидкість повітряного потоку $V = 1,35 - 1,48$ м/с.

Таблиця 4.4 – Вологість на різних відстанях від джерела емісії
 $Q = 1,167$ мл/с, (другий сценарій)

Відстань, см	Вологість, % (експеримент)	Вологість, % (розрахунок за методом)
5	97,4–99,3	96,1
10	88,6–93,4	87,9
15	82,5–85,7	82,3
20	69,6–73,8	68,5
25	57,2–63,4	57,1
30	50,5–52,1	50,3
35	46,5–49,4	45,9
40	44,4–45,9	43,7
45	40,6–42,5	40,5

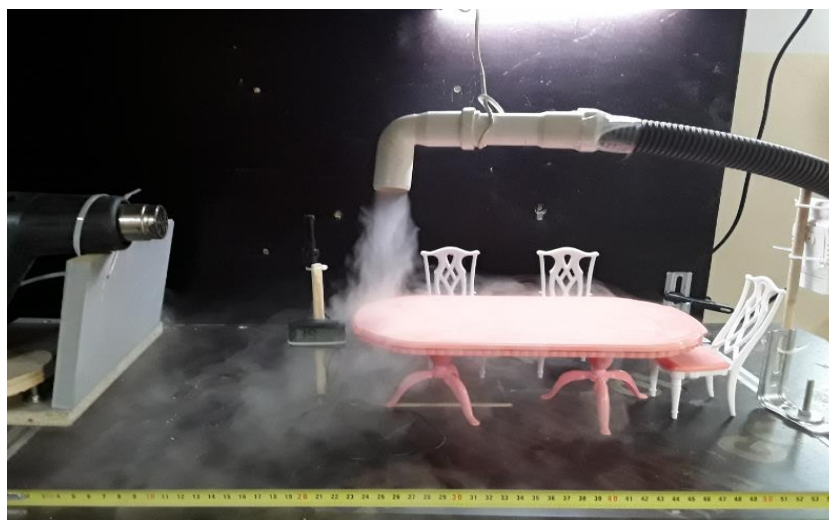


Рисунок 4.43 – Поле туману: $V = 0$ м/с, $Q = 1,167$ мл/с (другий сценарій)



Рисунок 4.44 – Поле туману: $V = 1,35 - 1,48$ м/с, $Q = 1,167$ мл/с (другий сценарій)

На рисунку 4.45 показано зміну вологості на висоті 17 см і на різній відстані від джерела емісії. З віддаленням від джерела емісії туману вологість повітря знижується.

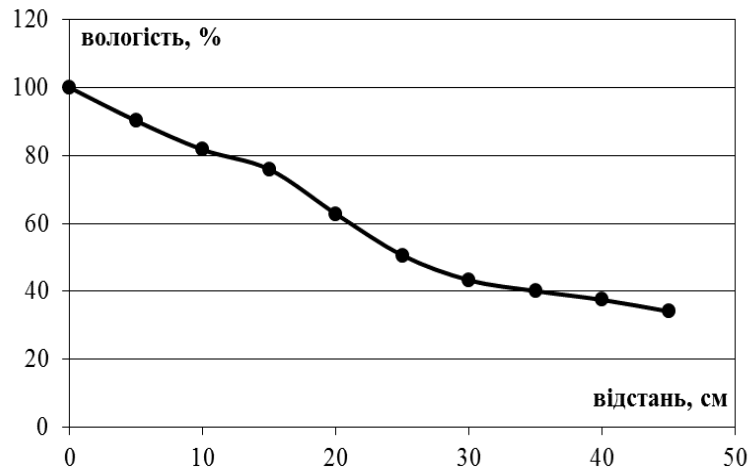


Рисунок 4.45 – Зміна вологості при віддаленні від джерела емісії [43]

На другому етапі дослідження проводився обчислювальний експеримент на базі розробленого методу. На території «Південного машинобудівного заводу» в літній період функціонує відкрите кафе для співробітників підприємства (рис. 4.46, позначка 2). Поряд з територією літнього кафе знаходиться ливарний цех. Зона відпочинку розрахована на 12 чоловік. В цеху працюють зварювальники, кранівники, металурги.

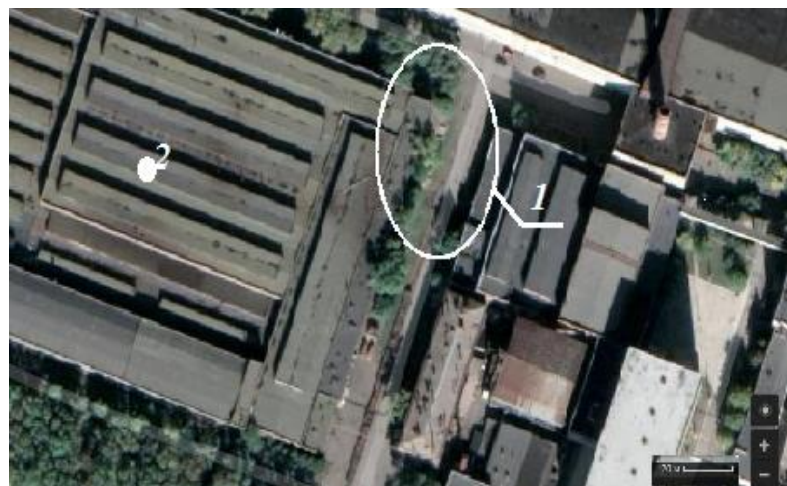


Рисунок 4.46 – Територія зони відпочинку робітників «Південного машинобудівного заводу» (Google Earth Image, 2019): 1 – літнє кафе, 2 – ливарний цех

На рисунку 4.47 показано схему розрахункової області, що відповідає зоні відпочинку (рис. 4.46), коли задається джерело емісії тепла – місце приготування (піч) $T=200$ °С, джерело емісії зволоження – штучний зволожувач $Q=100$ г/м³, задається розташування робочого місця працівника. На рисунку 4.48–4.49 представлено розподіл поля температури (ізотерм) та поля концентрації крапель води у перерізі $y=8$ м.

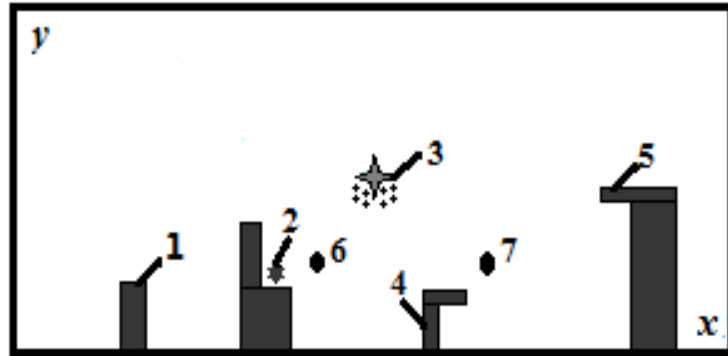


Рисунок 4.47 – Розрахункова область: 1 – бар’єр, 2 – джерело тепла (комплекс для приготування кави та гарячих блюд), 3 – джерело зволоження, 4 – робоче місце, 5 – відкрите кафе (навіс для відвідувачів), 6, 7 – точки спостереження [43]

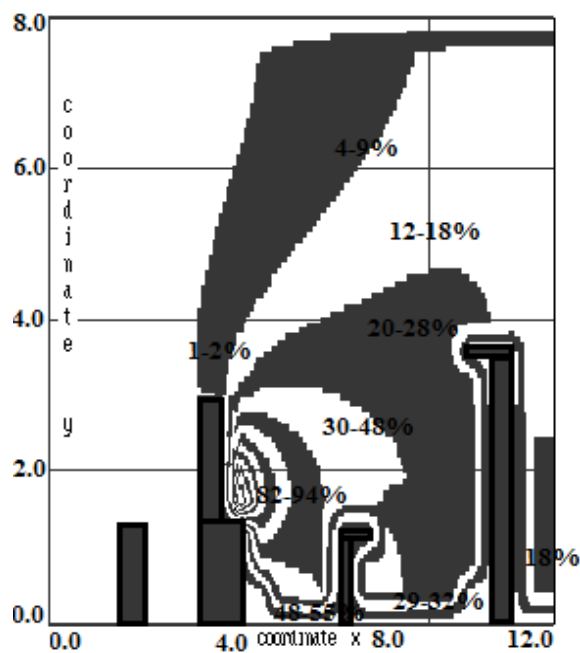


Рисунок 4.48 – Розподіл поля температури [43]

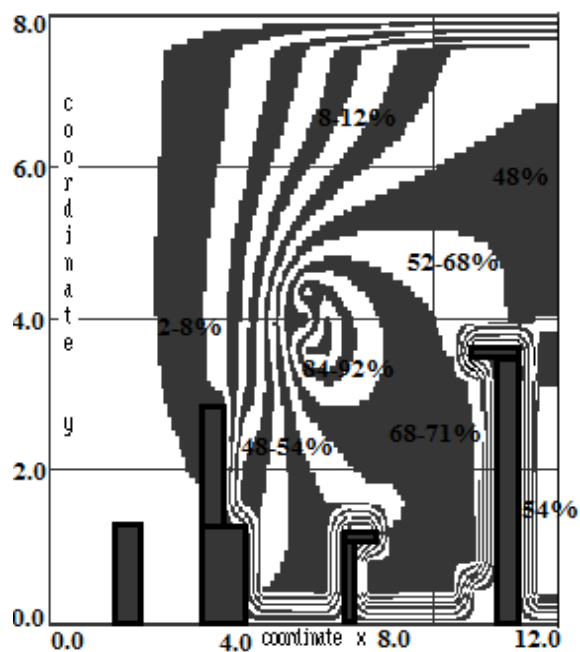


Рисунок 4.49 – Розподіл поля вологості [43]

Значення вологості в залежності від температури, які наведено в табл. 4.3 обчислювались на ділянці, що розміщується між точками 6 та 7 (рис. 4.47)

Таблиця 4.3 – Значення вологості від температури

Відстань, м	Температура, °C (чисельно)	Вологість, % (чисельно)	Вологість, г/м ³ (чисельно)
4,5	42,0	85,0	52,4
5,0	37,8	76,5	47,2
5,5	34,4	69,5	42,9
6,0	31,5	63,8	39,3
6,5	29,1	58,8	36,3
7,0	27,0	54,6	33,7
7,5	25,2	51,0	31,4
8,0	23,6	47,8	29,5
8,5	22,2	45,0	27,7
9,0	21,0	42,5	26,2
9,5	19,9	40,3	24,8
10,0	18,9	38,3	23,6

Оптимальні та допустимі норми температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень залежно від

пори року і категорії виконуваних робіт (Іа, Іб, Іа, Іб, ІІ) наведено в ГОСТ 12.1.005-88 «ССБП. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони».

Робочою зоною вважається простір, обмежений по висоті 2 м над рівнем підлоги чи площадки, на яких знаходяться місця постійного чи непостійного (тимчасового) перебування працівників. Холодний період року характеризується середньодобовою температурою зовнішнього повітря $+10^{\circ}\text{C}$ і нижче, теплий – температурою вище $+10^{\circ}\text{C}$.

Зі збільшенням ступеня важкості роботи норми оптимальної та допустимої температури повітря на постійних і непостійних робочих місцях в холодний і теплий періоди року зменшуються, а нормовані значення швидкості руху повітря в цих умовах, навпаки, збільшуються. Це так, оскільки збільшення фізичної напруги і тепловиділення вимагають інтенсифікації теплообмінних процесів.

Як приклад можна навести такі дані з ГОСТ 12.1.005-88. Оптимальна температура повітря в теплий період року під час виконання легкої роботи категорії Іа складає $22\text{--}24^{\circ}\text{C}$, важкої (категорія ІІ) – $16\text{--}18^{\circ}\text{C}$. Допустима температура повітря на постійних робочих місцях в цих умовах під час виконання вказаних робіт складає відповідно $21\text{--}25^{\circ}\text{C}$ та $13\text{--}19^{\circ}\text{C}$.

Якщо під час виконання легкої роботи категорії Іа оптимальна та допустима швидкість руху повітря приймається не більше $0,1\text{ м/с}$, то під час виконання важкої роботи оптимальна швидкість руху повітря встановлюється не більше $0,3\text{ м/с}$ і допустима – не більше $0,5\text{ м/с}$.

В теплий період року оптимальні та допустимі норми температури і швидкості руху повітря дещо більші, ніж в холодний період. Підвищення норм температури повітря в теплий період року компенсується збільшенням швидкості його руху. Так, якщо під час виконання легкої роботи категорії Іб в холодний період року оптимальна швидкість його руху не більше $0,1\text{ м/с}$, то під час виконання цієї ж роботи в теплий період року оптимальна швидкість не більше $0,2\text{ м/с}$.

Мінімально допустима температура повітря в холодний період року під час виконання важкої роботи на постійних і непостійних робочих місцях складає відповідно $+12^{\circ}\text{C}$ і $+13^{\circ}\text{C}$. Максимально допустима температура встановлена для теплого періоду року під час виконання легкої роботи категорії Ia: $+28^{\circ}\text{C}$ – на постійних робочих місцях, $+30^{\circ}\text{C}$ – на непостійних робочих місцях. Мінімальна норма швидкості руху повітря $0,1\text{ м/с}$, максимально допустима – $0,2\text{--}0,6\text{ м/с}$ (під час виконання важкої роботи в теплий період року).

Як в холодний, так і в теплий період року оптимальною вважається відносна вологість повітря в межах $40\text{--}60\%$. В холодний період року відносна вологість повітря на постійних робочих місцях не повинна перевищувати 75% . В теплий період року допустиме значення відносної вологості повітря залежить від категорії виконуваної роботи. Так, під час виконання легкої роботи категорії Ia допустима відносна вологість повітря, яке має температуру 28°C , складає 55% , під час виконання важкої роботи 75% , якщо температура повітря 24°C і нижче.

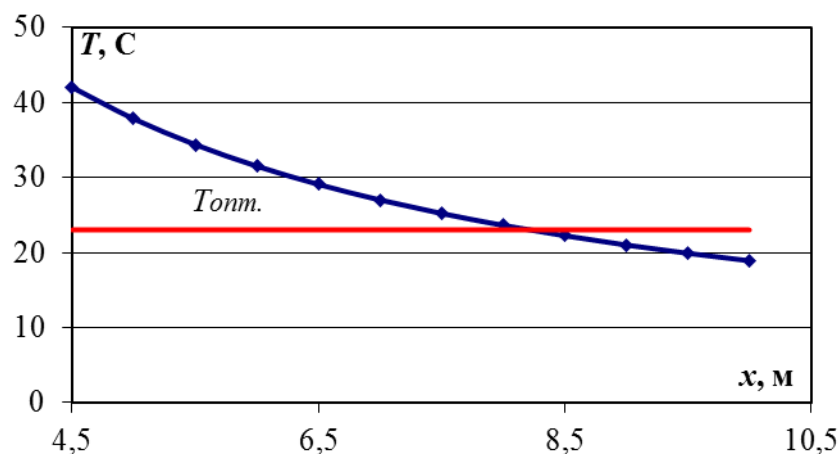


Рисунок 4.49 – Розподіл температури на території відкритого кафе

На рисунку 4.50 наведено розподіл температури на території кафе між точками 6 та 7 (рис. 4.47) і на відстані $8,3\text{ м}$ температура відповідає оптимальній температурі повітря в робочій зоні, тобто працівники кафе на відстані між $4,5\text{ м}$ і $8,3\text{ м}$ знаходяться в зоні перевищення T_{optm} .

На рисунку 4.51 представлено розподіл відносної вологості повітря на території кафе між точками 6 та 7 (рис. 4.47) і на відстані 6,2 м–9,4 м відносна вологість відповідає оптимальному значенню вологості в робочій зоні, тобто працівники кафе на відстані між 4,5 м і 6,5 м знаходяться в зоні перевищення відносної вологості повітря.

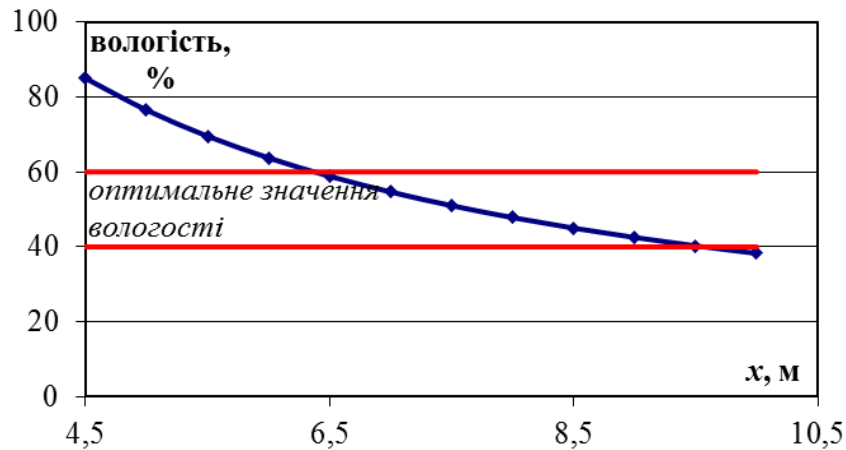


Рисунок 4.50 – Розподіл відносної вологості на території відкритого кафе

Розроблено комплексний метод оцінювання параметрів мікроклімату в робочих зонах на відкритій місцевості, який дозволяє прогнозувати рівень вологості та температури у робочих зонах за наявності використання штучного зволожувача повітря.

Висновки до розділу 4

1. На основі проведених експериментальних досліджень виявлено основні закономірності поведінки повітряного потоку в робочій зоні в залежності від геометрії усмоктувача, а саме за рахунок застосування не одного, а двох отворів відбору газів. Сформульована та розв’язана задача мінімізації рівня хімічного забруднення в робочих зонах на відкритій місцевості за допомогою усмоктувачів.

Встановлено, що при наявності горизонтальних та вертикальних пластин на отворах зменшується рівень забруднення в робочій зоні, а саме ефективність застосування напрямних пластин однакової довжини складає

28 %, напрямних пластин різної довжини – 50 %, напрямних пластин різної довжини і екрана – 69 %. Оскільки вертикальний екран затримує забруднення, а верхня більш видовжена пластина спрямовує його в зону розташування отворів. Тим самим підтверджується доцільність застосування другого отвору.

2. Розроблено метод чисельного розрахунку для процесу відбору газів, що враховує кількість отворів відбору, їх розміри та взаємне розташування. Проведено обчислювальні дослідження, які дозволили отримати поле концентрації забруднювача та розрахувати ризик виникнення хронічних захворювань. Встановлено, що застосування двох отворів з однаковими напрямними пластинами зменшує рівень захворювання через 2 роки на 16 %, двох отворів з напрямними пластинами, верхня з яких більша – ще на 6 %, двох отворів з напрямними пластинами, верхня з яких більша і вертикальної пластини – ще на 8 % в порівнянні з випадком двох отворів без пластин.

3. Розроблений метод вдосконалено тим, що він дозволяє враховувати не тільки відбір забруднення, а і його відведення на більшу висоту при відсутності та наявності вдуву чистого повітря. Проведені чисельні розрахунки дозволили встановити, що рівень хронічних захворювань через 2 роки у випадку вдуву знижується на 54 % в порівнянні з відсутністю вдуву, а через 10 років на 78 %.

4. Сформульована та розв'язана задача про моделювання процесу нейтралізації угарного газу, що потрапляє від автотранспорту до робочих зон промислових майданчиків. Розроблено чисельний метод дослідження процесу зменшення концентрації оксиду вуглецю за рахунок його нейтралізації водяною парою з урахуванням форми камери, розташування форсунок подачі водяної пари, потужності джерел емісії та їх місця знаходження. На базі проведених обчислювальних експериментів виявлено наявність «застійних» зон в камерах проведення реакцій та запропоновано заходи щодо їх ліквідації, а саме розташування додаткових форсунок подачі водяної пари знизу ємкості.

5. Сформульована та розв'язана задача прогнозування параметрів мікроклімату в робочій зоні на відкритій місцевості при використанні

зволоження. Проведені експериментальні та чисельні дослідження підтвердили достовірність розробленого методу прогнозу з похибкою чисельного моделювання 5–7 %.

6. Розроблено комплексний метод оцінювання параметрів мікроклімату в робочих зонах на відкритій місцевості промислових майданчиків, який дозволяє прогнозувати вітровий режим, вологість та температуру в робочих зонах за наявності використання штучного зволожувача повітря.

Розроблені в даному розділі математичні методи мінімізації рівня хімічного забруднення в робочих зонах на промислових майданчиках за допомогою усмоктувачів, нейтралізації та зволоження реалізовано у вигляді прикладних програм для розрахунку поля концентрації забруднення та ризику виникнення хронічних захворювань у робітників.

Основні положення розділу 4 опубліковані автором у наукових працях [20, 21, 22, 25, 30, 37, 42, 43, 47, 48, 111, 162].

Список використаних джерел у розділі 4

Список використаних джерел у розділі 4 наведено у загальному списку використаних джерел [1, 20, 21, 22, 25, 30, 37, 42, 43, 47, 49, 50, 53, 78, 80, 81, 98, 104, 113, 114, 123, 143, 235].

РОЗДІЛ 5

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ ПРИ НАЯВНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ

Перспектива розвитку електромобілів призведе до зростання напруженості електричного поля на вулиці. Неоднорідність розподілу електромагнітного та електростатичного полів полягає в тому, що в деяких районах, на вулицях або проспектах їх фон змінюється в 5-7 разів і більше. Причинами цього є різний рельєф місцевості, різноповерхова забудова, різна потужність генеруючих джерел. Людина потрапляє в зони з різною напруженістю поля, тому повинні спрацьовувати механізми адаптації. Очевидно, що такий режим не є природним для людини, тому є небезпечним.

Для захисту від електромагнітного поля розроблено спеціальні рекомендації щодо зниження напруженості електричного поля, що генерується системами розподілу і передачі електроенергії, наприклад: заземлити металевий дах, а на неметалевий дах встановлювати заземлену сітку; на відкритій місцевості можуть застосовуватися залізобетонні огорожі, тросові екрани або просто посадки дерев висотою більше 2 м. Прийнято наступні гранично допустимі значення напруженості електричного поля: всередині житлових будинків – 0,5 кВ/м; на території зони житлової забудови – 1 кВ/м; у населеній місцевості, поза зоною житлової забудови, а також на території городів і садів – 5 кВ/м; на ділянках перетину ПЛ з автомобільними дорогами I-IV категорії – 10 кВ/м; в населеній місцевості (незабудовані місцевості, хоча б і часто відвідувані людьми, доступні для транспорту, та сільськогосподарські угіддя) – 15 кВ/м; в важкодоступній місцевості, спеціально огороженій для виключення доступу населення – 20 кВ/м.

У даному розділі розглядається розробка методів прогнозу параметрів мікроклімату при наявності електричних полів, які створюються позитивними та негативними аероіонами, а також присутністю інших джерел електричного поля. Даному класу задач присвячені роботи [2, 10–14, 58–60,

72, 79, 95, 113–114, 122–125, 127–133, 136–138, 139–141, 145, 181, 197, 209, 213, 215, 223, 226–227, 239–241].

5.1 Метод прогнозу параметрів аероіонного режиму в робочих зонах

Відомо, що на формування концентраційного поля аероіонів впливає комплекс фізичних факторів: потік повітря, дифузія, вплив електричного поля, та інші. Крім цього відбувається взаємодія іонів різної полярності і взаємодія їх з частинками пилу. Для врахування цих процесів, при моделюванні розсіювання аероіонів використовується 3D рівняння масопереносу, яке записується для кожної компоненти (позитивних аероіонів, пилу, негативних аероіонів.) Моделюючі рівняння мають вигляд [10–14, 223]:

– для опису процесу розсіювання позитивних іонів

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_p}{\partial t} + \frac{\partial u A_p}{\partial x} + \frac{\partial v A_p}{\partial y} + \frac{\partial w A_p}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial A_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial A_p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial A_p}{\partial z} \right) - \\ - \alpha A_p A_n - \beta A_p A_d + \sum_{p_i=1}^n Q_{p_i}(t) \delta(x - x_{p_i}) \delta(y - y_{p_i}) \delta(z - z_{p_i}); \end{aligned} \quad (5.1)$$

– для моделювання переносу пилу

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_d}{\partial t} + \frac{\partial u A_d}{\partial x} + \frac{\partial v A_d}{\partial y} + \frac{\partial w A_d}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial A_d}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial A_d}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial A_d}{\partial z} \right) + \\ + \sum_{d_i=1}^n Q_{d_i}(t) \delta(x - x_{d_i}) \delta(y - y_{d_i}) \delta(z - z_{d_i}); \end{aligned} \quad (5.2)$$

– для опису процесу розсіювання негативних іонів

$$\frac{\partial A_n}{\partial t} + \frac{\partial (u + bE) A_n}{\partial x} + \frac{\partial (v + bE) A_n}{\partial y} + \frac{\partial (w + bE) A_n}{\partial z} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial A_n}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial A_n}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial A_n}{\partial z} \right) - \alpha A_n A_p - \beta A_n A_d +$$

$$\sum_{n_i=1}^n Q_{n_i}(t) \delta(x - x_{n_i}) \delta(y - y_{n_i}) \delta(z - z_{n_i}). \quad (5.3)$$

Позначення фізичних параметрів в цих рівняннях наступні:

A_p , A_n , A_d – концентрація позитивних, негативних аероіонів і частинок пилу відповідно; u , v , w – компоненти вектору швидкості руху повітряного потоку; $\mu = \mu_x$, μ_y , μ_z – коефіцієнти дифузії; t – час; α – швидкість рекомбінації іонів, що мають різну полярність; β – швидкість рекомбінації іонів з частинками пилу; $Q_{A_{p_i}}(t)$, $(Q_{A_{n_i}}(t))$, $Q_{A_{d_i}}(t)$ – інтенсивність емісії позитивних (негативних) іонів чи пилу у відповідних точках з координатами x_{p_i} (x_{n_i}) чи x_{d_i} , y_{p_i} (y_{n_i}) чи y_{d_i} , z_{p_i} (z_{n_i}) чи z_{d_i} ; $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i)$ – дельта-функція Дірака; b – коефіцієнт мобільності іонів; E – напруженість електричного поля.

Приймається до уваги, що простір, в якому відбувається рух аероіонів обмежений. На границі входу повітряного потоку в розрахункову область ставиться початкова умова:

$$A_p|_{\text{ex}} = A_{p_0},$$

A_{p_0} – початкове значення концентрації аероіонів.

На границі виходу повітряного потоку із розрахункової області ставиться «м'яка» гранична умова:

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

де $\vec{n}$ – одиничний вектор зовнішньої нормалі до твердої поверхні.

В чисельній реалізація така гранична умова записується:

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

де $A_p(i+1, j, k)$ – значення іонів в останній граничній комірці, $A_p(i, j, k)$ – значення іонів в передостанній різницевій комірці.

На поверхні Землі та на усіх твердих поверхнях ставиться гранична умова непротікання:

$$\frac{\partial A_p}{\partial n} = 0.$$

Дана умова фізично означає, що потік іонів на цих границях дорівнює нулю.

При використанні моделі (5.1) компоненти швидкості $u(x, y, z)$, $v(x, y, z)$, $w(x, y, z)$ повинні задовольняти рівнянню неперервності [143]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (5.4)$$

Для виконання такої умови вирішується аеродинамічна задача по визначенню поля швидкості.

Для визначення компонентів вектору швидкості повітряного потоку $u(x, y, z)$, $v(x, y, z)$, $w(x, y, z)$ можна використовувати різноманітні аеродинамічні моделі. Достатньо часто моделювання повітряного потоку виконується на базі рівняння Нав'є-Стоксу. Проте відомо, що при їх використанні затрати комп'ютерного часу можуть складати декілька суток. Такий підхід є незручним при проведенні серійних розрахунків, тому в даній роботі пропонується використання другої аеродинамічної моделі, а саме моделі потенційної течії.

Розглядається тривимірна модель потенційної течії, де моделюючим рівнянням виступає рівняння Лапласа для потенціалу швидкості [143, 223]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0, \quad (5.5)$$

де P – потенціал швидкості.

Компоненти вектору швидкості повітряного середовища пов'язані з потенціалом швидкості наступними співвідношеннями :

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial P}{\partial z}. \quad (5.6)$$

Для рівняння Лапласа граничні умови можна поставити наступним чином:

- на твердих границях ставиться умова непротікання $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$;
- на границі виходу потоку із розрахункової області ставиться гранична умова Дірихле $P = const$;
- на границі входу повітряного потоку в розрахункову область, ставиться гранична умова $\frac{\partial P}{\partial n} = V$, де V – відома швидкість втікання.

При моделюванні процесу розповсюдження аероіонів необхідно враховувати вплив електричного поля на цей процес. Оскільки аероіони мають заряд, то вони генерують електричне поле E . Для моделювання електричного поля використовується наступне рівняння [145]:

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = \frac{q_e}{\varepsilon_0}, \quad (5.7)$$

де ε_0 – діелектрична проникність; q_e – об'ємна щільність заряду.

Від рівняння (5.7) можна перейти до скалярного потенціалу, якщо врахувати таку залежність:

$$E_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (5.8)$$

Тоді отримаємо рівняння Пуассона:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = -\frac{q_e}{\varepsilon_0}, \quad (5.9)$$

де $q_e = -e A_p(x, y, z)$, $A_p(x, y, z)$ – концентрація позитивних аероіонів; φ – скалярний потенціал; e – елементарний заряд. На базі даного рівняння здійснюється моделювання електричного поля.

В якості граничної умови використовується умова електричної ізоляції:

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

де $\vec{n}$ – одиничний вектор зовнішньої нормалі до твердої поверхні.

5.2 Засоби оцінювання параметрів аероіонного режиму

Розглядаються різницеві схеми, що використовуються для чисельного інтегрування рівнянь масопереносу, аеродинаміки та електростатики.

Для чисельного інтегрування рівнянь масопереносу (5.1)–(5.3) проводиться їх геометричне розщеплення – на кожному дробовому кроці враховується лише один напрямок переносу збурень, і фізичне розщеплення – на п'ятому кроці розщеплення враховується зміна величини концентрації аероіонів за рахунок дії джерела емісії. Застосовуємо п'ятикрокову поперемінно-трикутна різницева схему, що апроксимує моделюючі рівняння (5.1)–(5.3), розрахунок виконується на прямокутній різницевій сітці. Концентрація величин A_p , A_n , A_d визначається в центрах різницевих комірок, тоді як компоненти вектору швидкості повітряного середовища задаються на межах різницевих комірок.

Апроксимація похідних по часу виконується наступним чином [143, 223]:

$$\frac{\partial A_p}{\partial t} = \frac{A_{p_{ijk}}^{n+1} - A_{p_{ijk}}^n}{\Delta t}.$$

Перед дискретизацією конвективні похідні записуються у вигляді суми знакопостійних величин [143, 223]:

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

$$\frac{\partial v A_p}{\partial y} = \frac{\partial v^+ A_p}{\partial y} + \frac{\partial v^- A_p}{\partial y}, \quad \frac{\partial w A_p}{\partial z} = \frac{\partial w^+ A_p}{\partial z} + \frac{\partial w^- A_p}{\partial z},$$

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

Різницеві апроксимації перших похідних записуються у вигляді [143, 223]:

$$\frac{\partial u^+ A_p}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1jk}^+ A_{p_{ijk}}^{n+1} - u_{ijk}^+ A_{p_{i-1jk}}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ A_p^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- A_p}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1jk}^- A_{p_{i+1jk}}^{n+1} - u_{ijk}^- A_{p_{ijk}}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- A_p^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ A_p}{\partial y} \approx \frac{v_{ij+1k}^+ A_{p_{ijk}}^{n+1} - v_{ijk}^+ A_{p_{ij-1k}}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ A_p^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- A_p}{\partial y} \approx \frac{v_{ij+1k}^- A_{p_{ij+1k}}^{n+1} - v_{ijk}^- A_{p_{ijk}}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- A_p^{n+1},$$

$$\frac{\partial w^+ A_p}{\partial z} \approx \frac{w_{ijk+1}^+ A_{p_{ijk}}^{n+1} - w_{ijk}^+ A_{p_{ijk-1}}^{n+1}}{\Delta z} = L_z^+ A_p^{n+1},$$

$$\frac{\partial w^- A_p}{\partial z} \approx \frac{w_{ijk+1}^- A_{p_{ijk+1}}^{n+1} - w_{ijk}^- A_{p_{ijk}}^{n+1}}{\Delta z} = L_z^- A_p^{n+1},$$

де $L_x^+ = \frac{u_{i+1,jk}^+ A_{p,ijk}^{n+1} - u_{ijk}^+ A_{p,i-1,jk}^{n+1}}{\Delta x}$, $L_x^- = \frac{u_{i+1,jk}^- A_{p,i+1,jk}^{n+1} - u_{ijk}^- A_{p,ijk}^{n+1}}{\Delta x}$ – позначення

відповідних різницевих операторів при апроксимації конвективних похідних.

Різницеві апроксимації похідних другого порядку записуються таким чином [143, 223]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial A_p}{\partial x} \right) &\approx \mu_x \frac{A_{p,i+1,jk}^{n+1} - A_{p,ijk}^{n+1}}{\Delta x^2} - \\ &- \mu_x \frac{A_{p,ijk}^{n+1} - A_{p,i-1,jk}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- A_p^{n+1} + M_{xx}^+ A_p^{n+1}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial A_p}{\partial y} \right) &\approx \mu_y \frac{A_{p,ij+1,k}^{n+1} - A_{p,ijk}^{n+1}}{\Delta y^2} - \\ &- \mu_y \frac{A_{p,ijk}^{n+1} - A_{p,ij-1,k}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- A_p^{n+1} + M_{yy}^+ A_p^{n+1}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial A_p}{\partial z} \right) &\approx \mu_z \frac{A_{p,ijk+1}^{n+1} - A_{p,ijk}^{n+1}}{\Delta z^2} - \\ &- \mu_z \frac{A_{p,ijk}^{n+1} - A_{p,ijk-1}^{n+1}}{\Delta z^2} = M_{zz}^- A_p^{n+1} + M_{zz}^+ A_p^{n+1}. \end{aligned}$$

Для скорочення запису різницевих рівнянь застосовуються наступні позначення [143, 223]:

$$M_{xx}^+ = -\mu_x \frac{A_{p,ijk}^{n+1} - A_{p,i-1,jk}^{n+1}}{\Delta x^2}, \quad M_{xx}^- = \mu_x \frac{A_{p,i+1,jk}^{n+1} - A_{p,ijk}^{n+1}}{\Delta x^2}.$$

Застосовуючи введені позначення різницевих операторів, рівняння переносу набуває наступного виду [143, 223]:

$$\begin{aligned}
& \frac{A_{p_{i,j,k}}^{n+1} - A_{p_{i,j,k}}^n}{\Delta t} + L_x^+ A_p^{n+1} + L_x^- A_p^{n+1} + L_y^+ C A_p^{n+1} + L_y^- A_p^{n+1} + \\
& + L_z^+ A_p^{n+1} + L_z^- A_p^{n+1} - \alpha A_{p_{i,j,k}}^{n+1} A_{n_{i,j,k}}^{n+1} - \beta A_{p_{i,j,k}}^{n+1} A_{d_{i,j,k}}^{n+1} = \\
& = M_{xx}^+ A_p^{n+1} + M_{xx}^- A_p^{n+1} + M_{yy}^+ A_p^{n+1} + M_{yy}^- A_p^{n+1} + \\
& M_{zz}^+ A_p^{n+1} + M_{zz}^- A_p^{n+1} + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l(t)}{4} \delta_l. \tag{5.10}
\end{aligned}$$

На наступному етапі побудови різницевої схеми виконується розщеплення даного різницевого рівняння на п'ять кроків при інтегруванні на інтервалі по часу dt . На кожному кроці розщеплення наведеного різницевого рівняння (5.10) при апроксимації других похідних використовується два часових шари за часом. На верхньому часовому шарі обчислюється та частина різницевих операторів, яка узгоджується з напрямком поділеної різниці для конвективної похідної. За рахунок односторонньої апроксимації конвективних похідних використовується значення невідомої функції у трьох різницевих вузлах на верхньому часовому шарі для кожного кроку розщеплення. Використовується форма шаблонів різницевих рівнянь (5.11)–(5.14), що представлена на рис. 5.1 [143]. На кожному кроці розщеплення розрахунок починається з певного кута розрахункової області і при цьому враховується лише один напрямок переносу збурень. На першому кроці розщеплення $k = n + 1/4$ (5.11) враховуються лише збурення які рухаються зовні через сторони різницевої комірки 1 і 4, а уходять із комірки через сторони 2 і 3 [143]. На другому кроці розщеплення $k = n + 1/2$ (5.12) враховуються збурення, що вносяться в комірку через сторони 2 і 3 та виходять через сторони 1 і 4 і т. д. Напрямок переносу збурень на кожному кроці розщеплення наведено на рис. 5.2.

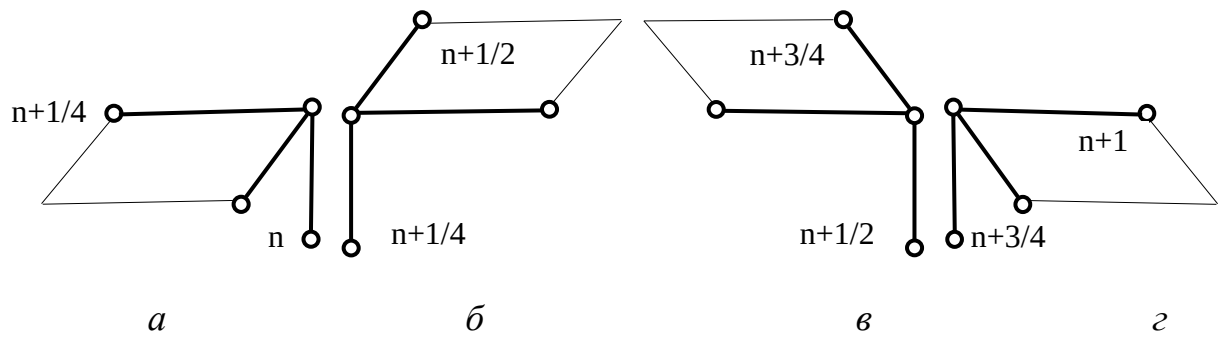


Рисунок 5.1 – Форма шаблонів різницьових рівнянь [124]: *a* – (4.11); *б* – (4.12); *в* – (4.13); *г* – (4.14)

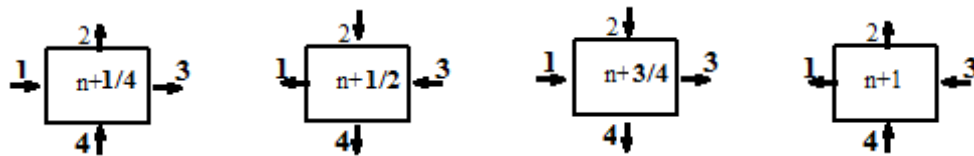


Рисунок 5.2 – Напрямок розповсюдження збурень на кожному кроці розщеплення [143]

За рахунок використання явних формул для визначення невідомого значення концентрації аероіонів на кожному кроці розщеплення будується ефективний чисельний алгоритм інтегрування диференційного рівняння, який є абсолютно стійким [143].

– На першому кроці розщеплення $k = n + 1/4$:

$$\frac{A_{p_{ijk}}^{n+k} - A_{p_{ijk}}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ A_p^k + L_y^+ A_p^k + L_z^+ A_p^k) = \frac{1}{4}(M_{xx}^+ A_p^k + M_{xx}^- A_p^n +$$

$$+ M_{yy}^+ A_p^k + M_{yy}^- A_p^n + M_{zz}^+ A_p^k + M_{zz}^- A_p^n) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l(t)}{4} \delta_l; \quad (5.11)$$

– на другому кроці розщеплення $k = n + 1/2$, $c = n + 1/4$:

$$\frac{A_{p_{ijk}}^k - A_{p_{ijk}}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- A_p^k + L_y^- A_p^k + L_z^- A_p^k) = \frac{1}{4}(M_{xx}^- A_p^k + M_{xx}^+ A_p^c +$$

$$+ M_{yy}^- A_p^k + M_{yy}^+ A_p^c + M_{zz}^- A_p^k + M_{zz}^+ A_p^c) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l(t)}{4} \delta_l; \quad (5.12)$$

– на третьому кроці розщеплення $k = n + 3/4$, $c = n + 1/2$:

$$\begin{aligned} \frac{A_{p_{ijk}}^k - A_{p_{ijk}}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ A_p^k + L_y^- A_p^k + L_z^- A_p^k) = \frac{1}{4}(M_{xx}^- A_p^c + M_{xx}^+ A_p^k + \\ + M_{yy}^- A_p^k + M_{yy}^+ A_p^c + M_{zz}^- A_p^k + M_{zz}^+ A_p^c) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l(t)}{4} \delta_l; \end{aligned} \quad (5.13)$$

– на четвертому кроці розщеплення $k = n + 1$, $c = n + 3/4$:

$$\begin{aligned} \frac{A_{p_{ijk}}^k - A_{p_{ijk}}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- A_p^k + L_y^+ A_p^k + L_z^+ A_p^k) = \frac{1}{4}(M_{xx}^- A_p^k + M_{xx}^+ A_p^c + \\ + M_{yy}^- A_p^c + M_{yy}^+ A_p^k + M_{zz}^- A_p^c + M_{zz}^+ A_p^k) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l(t)}{4} \delta_l. \end{aligned} \quad (5.14)$$

В дискретному вигляді дельта-функція Дірака «розподіляється» на одну різницеву комірку таким чином, що зберігається сумарна кількість q_i забруднюючої домішки, яка розміщується в комірці, при чому $\bar{q}_l(t)$ – середньо розподілена величина по комірці для конкретного точкового джерела з потужністю $q_l(t)$, а саме $\bar{q}_l(t) = \frac{q_l(t)}{4\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z}$. Причому, функція δ_l , яка використовується в різницевих виразах, не дорівнює нулю тільки в комірках, де розташоване джерело емісії забруднюючої домішки. При використанні приведеної вище схеми розщеплення отримуються різниці рівняння більш простої форми, що дає можливість виконати їх програмну реалізацію.

На п'ятому кроці виконується розрахунок за співвідношеннями:

$$\frac{A_{p_{ijk}}^{n+1} - A_{p_{ijk}}^n}{\Delta t} = -\alpha \cdot A_{p_{ijk}}^n \cdot A_{n_{ijk}}^n - \beta \cdot A_{p_{ijk}}^n A_{d_{ijk}}^n, \quad (5.15)$$

де $A_{p_{ijk}}^n$ – значення концентрації позитивних аероіонів після четвертого кроку;

$A_{p_{ijk}}^{n+1}$ – значення концентрації позитивних аероіонів після п'ятого кроку; $A_{n_{ijk}}^n$ – концентрація негативних аероіонів після четвертого кроку; $A_{d_{ijk}}^n$ – концентрація частинок пилу відповідно після четвертого кроку.

Початкова умова для кожного рівняння розщеплення має наступний вид [143]:

$$A_p^1 \Big|_{t=t^n} = A_p(x, y, z, t^n), \quad A_p^k \Big|_{t=t^n} = A_p^{k-1} \Big|_{t=t^{k-1}}, \quad k = 2, 3, 4,$$

$$A_p(x, y, z, t^{n+1}) = A_p^5 \Big|_{t=t^5}, \quad (5.16)$$

де A_p^1 , A_p^k , A_p^5 – значення концентрації домішки на тому чи іншому розрахунковому кроці. Гранична умова непротікання реалізується за рахунок використання фіктивних осередків.

Для чисельного розв'язання рівняння Лапласа для потенціалу швидкості (5.5) використовується кінцево-різницеий метод сумарної апроксимації. Спочатку рівняння Лапласа приводиться до рівняння еволюційного виду, тобто застосовується ідея встановлення рішення за часом [113–114, 143, 223]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}, \quad (5.17)$$

де t – фіктивний час, при $t \rightarrow \infty$ розв'язок рівняння (5.17) прямує до розв'язку рівняння Лапласа. Для розв'язання даного рівняння необхідно задати початкову умову, тобто поле потенціалу при $t = 0$. Наприклад, приймається $P = 0$ в усій розрахунковій області при $t = 0$.

Для чисельного інтегрування використовується центрально-різницева апроксимація похідних за часом та по координаті. Розглядається рівномірно

розподілена прямокутна сітка в тривимірному просторі, кожна комірка сітки має розміри $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ вздовж відповідної декартової осі, координати вузлів сітки обчислюються, як $(x, y, z)_{i,j} = (i \cdot \Delta x, j \cdot \Delta y, k \cdot \Delta z)$, $i, j, k \in Z$. Час рівномірно дискретизується $t = n \cdot \Delta t$. Функція $P(x, y, z, t)$ виражається в будь-якому вузлі дискретним аналогом [113–114, 143, 223]:

$$P(x, y, z, t) = P(i \cdot \Delta x, j \cdot \Delta y, k \cdot \Delta z, n \cdot \Delta t) = P_{i,j,k}^n,$$

$$\begin{aligned} \frac{P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j,k}^n}{\Delta t} = & \left[\frac{-P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \\ & + \left[\frac{-P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right] + \left[\frac{-P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j,k-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2} \right], \end{aligned} \quad (5.18)$$

$$\begin{aligned} \frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = & \left[\frac{P_{i+1,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \\ & + \left[\frac{P_{i,j+1,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y^2} \right] + \left[\frac{P_{i,j,k+1}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z^2} \right]. \end{aligned} \quad (5.19)$$

Невідома величина $P_{i,j,k}$ на кожному кроці розщеплення розраховується за формулами [113–114, 143, 223]:

– на першому кроці

$$P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} = \left[P_{i,j}^n + \Delta t \left[\frac{P_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j-1,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} + \frac{P_{i,j,k-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2} \right] \right] /$$

$$\left/ \left[1 + \frac{\Delta t}{\Delta x^2} + \frac{\Delta t}{\Delta y^2} + \frac{\Delta t}{\Delta z^2} \right] \right., \quad (5.20)$$

– на другому кроці

$$P_{i,j,k}^{n+1} = \left[P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \Delta t \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1}^{n+1}}{\Delta y^2} + \frac{P_{i,j,k+1}^{n+1}}{\Delta z^2} \right] \right] \left/ \left[1 + \frac{\Delta t}{\Delta x^2} + \frac{\Delta t}{\Delta y^2} + \frac{\Delta t}{\Delta z^2} \right] \right. \quad (5.21)$$

Дана схема є неявною, але як видно з представлених залежностей, розрахунок значення потенціалу швидкості на кожному кроці розщеплення здійснюється за явною схемою – методом «стрімкого рахунку» [143]. Це дозволяє створити ефективний алгоритм розрахунку в областях складної геометричної форми – якою є робоча зона працівника на відкритій місцевості.

Розрахунок закінчується при виконанні умови $\left| P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^n \right| \leq \varepsilon$, де ε – точність розрахунків, $\varepsilon = 10^{-3} \div 10^{-6}$, n – номер ітерації (кількість кроків по часу). У чисельній моделі застосовуються фіктивні різницеві осередки для реалізації умови непротікання на поверхні землі.

На другому етапі розраховуються компоненти вектору швидкості вітру на гранях осередків [143, 223]:

$$u_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i-1,j,k}}{\Delta x}, \quad v_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j-1,k}}{\Delta y}, \quad w_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j,k-1}}{\Delta z}.$$

Для використання розробленого методу оцінювання аероіонного режиму в робочих зонах необхідно задавати інтенсивність емісії аероіонів від конкретних джерел. Як вже відмічалось, одним із таких джерел є сам робітник, який видихає позитивні аероіони. Для отримання науково-

обґрунтованої інформації відносно величини такої емісії було проведено фізичний експеримент.

Для експерименту було вибрано групу людей різного віку по 16 чоловік в кожній віковій групі. Вимірювалася площа роту $S=9,5 \text{ см}^2$, швидкість повітряного потоку при видиху $V=0,4 \text{ м/с}$, витрата $Q = V \cdot S \text{ м}^3/\text{с}$, інтенсивність емісії позитивних аероіонів при видиху $I = V \cdot S \cdot C \text{ іонів/с}$, де C – концентрація позитивних аероіонів при видиху. Результати виміру середньої концентрації позитивних аероіонів при видиху людини, для кожної вікової групи наведено в табл. 5.1.

Експеримент по вимірюванню концентрації аероіонів від видиху людини проводився за допомогою приладу KT-401 AIRION TESTER, $1 \cdot 10 - 2 \cdot 10^6 \text{ іонів/см}^3$.

Таблиця 5.1 – Значення концентрації позитивних аероіонів при видиху людини

Вік людини, роки	Концентрація позитивних аероіонів, іонів/см ³ ,
8-9	166-176
18-19	232-349
40	277-329
78	210-256

Дані, отримані на основі проведеного фізичного експерименту, використовувались при проведенні обчислювальних експериментів. Під час проведення обчислювальних експериментів джерело емісії позитивних аероіонів при видиху людини було періодичної дії, а саме видих впродовж 1 с в кількості Q , потім вдих – емісія відсутня і через 2 с знову видих з тією ж емісією. Тобто джерело емісії періодичної дії $Q(t)$ відоме.

5.3 Метод прогнозу напруженості електричного поля в робочих зонах

Більшість практичних задач відносно формування електромагнітного поля може бути вирішена внаслідок інтегрування системи рівнянь Максвелла (5.22 – 5.25) [41, 145]:

$$\operatorname{rot} H = J + \frac{\partial D}{\partial t}, \quad (5.22)$$

де H – напруженість магнітного поля (А/м), J – щільність струму провідності (А/м²), $\frac{\partial D}{\partial t}$ – щільність струму зміщення (А/м²). Перше рівняння Максвелла виражає той факт, що магнітне поле існує скрізь, де змінюється від часу вектор електричного зміщення або вектор напруженості електричного поля, що обумовлює зміщення:

$$\operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad (5.23)$$

де $\frac{\partial B}{\partial t}$ – зміна магнітної індукції з часом (В/м²), E – напруженість електричного поля (В/м). Фізичний зміст другого рівняння Максвелла полягає в тому, що в просторі, де магнітна індукція змінюється з часом, з'являється напруженість електричного поля.

Перше додаткове рівняння або третє рівняння Максвелла висловлює відсутність джерел вектору магнітної індукції:

$$\operatorname{div} B = 0. \quad (5.24)$$

Друге додаткове рівняння системи розглядається для визначення щільності заряду, його називають також диференціальної формою теореми Гауса:

$$\operatorname{div} D = \rho. \quad (5.25)$$

Між векторами D і E , B і H , E і J , що входять в систему рівнянь (5.22 – 5.25), існують співвідношення, що залежать від того середовища, в якому розглядається поле:

$$D = \varepsilon \cdot E, \quad B = \mu \cdot H, \quad J = \gamma \cdot (E + E_e). \quad (5.26)$$

де ε , μ , γ – відповідно діелектрична проникність, магнітна проникність і електрична провідність (питома електропровідність) середовища, E_e – стороння напруженість, складова, яка утворює електрорушійну силу.

Щільність енергії поля w_e пов'язана з напруженням електричного та магнітного полів рівністю:

$$w_e = \frac{1}{2} ED + \frac{1}{2} HB. \quad (5.27)$$

Рівняння (5.22–5.27) утворюють систему, за допомогою якої при заданих початкових умовах визначається електричне поле для будь-якого із подальших моментів часу.

Ця задача є дуже складною з математичної точки зору, тому що розв'язання ускладняється тим, що потрібно шукати розв'язок в області складної геометричної форми. Наприклад, на вулиці таку складну форму створюють малі архітектурні форми, тимчасові споруди, будівлі.

Розв'язання повної системи рівнянь Максвелла для кожного часткового випадку є складним, тому на практиці використовуються більш прості математичні моделі. Наприклад, для моделювання електричного поля широко застосовується рівняння Лапласу для електричного потенціалу, яке справедливе при відсутності заряду [41, 145].

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0. \quad (5.28)$$

При розв'язанні крайових задач використовуються наступні граничні умови:

$\varphi = 0$ – на поверхні Землі та на віддалених границях розрахункової області;

$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$, якщо внутрішня тверда границя в розрахунковій області (екран) виступає діелектриком, де $\vec{n}$ – одиничний вектор зовнішньої нормалі до твердої стінки;

$\varphi = 0$, якщо внутрішня тверда границя в розрахунковій області (екран) виступає провідником.

Для чисельного інтегрування рівняння Лапласа (5.28) використовується метод Лібмана [41, 113-114, 143], який дозволяє апроксимувати рівняння Лапласа такими залежностями:

$$\frac{\varphi_{i+1,j} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{\varphi_{i,j+1} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i,j-1}}{\Delta y^2} = 0. \quad (5.29)$$

Значення потенціалу швидкості визначається залежністю:

$$\varphi_{i,j} = \frac{(\varphi_{i+1,j} + \varphi_{i-1,j}) \cdot \Delta y^2 + (\varphi_{i,j+1} + \varphi_{i,j-1}) \cdot \Delta x^2}{2 \cdot (\Delta y^2 + \Delta x^2)}. \quad (5.30)$$

Для початку процесу розрахунку по методу Лібмана задається «початкове» наближення для електричного потенціалу в розрахунковій області. Розрахунок ітераційного процесу закінчується при виконанні умови $|\varphi_{i,j}^{m+1} - \varphi_{i,j}^m| \leq \varepsilon$, де ε – точність розрахунків, m – номер ітерації.

Знайдені значення електричного потенціалу використовуються для розрахувати компонентів вектору напруженості електричного поля на гранях різницевих комірок в кожний момент часу.

$$E_{x \ i,j} = \frac{\varphi_{i,j} - \varphi_{i-1,j}}{\Delta x}, \quad E_{y \ i,j} = \frac{\varphi_{i,j} - \varphi_{i,j-1}}{\Delta y}. \quad (5.31)$$

5.4 Алгоритм розв'язання задачі по прогнозуванню аероіонного режиму в робочих зонах промислових майданчиків

В роботі розроблено методи чисельного розрахунку, які враховують основні фізичні фактори, що впливають на зміну параметрів мікроклімату в робочій зоні. Практична реалізація цих методів вимагає невеликих затрат комп'ютерного часу (від декількох секунд до декількох хвилин) на комп'ютерах малої і середньої потужності. Призначення таких методів полягає в тому, що вони дозволяють провести велику кількість серійних розрахунків різноманітних сценаріїв впливу конкретної ситуації на зміну параметрів мікроклімату в робочій зоні. Методи даного класу забезпечують оперативне прогнозування аероіонного режиму в робочих зонах та напруженості електричного поля для ситуації, що моделюється.

В даній роботі розроблено методи чисельного розрахунку, що реалізовані у вигляді прикладних програм (кодів) для проведення обчислювальних експериментів на персональному комп'ютері.

Пакет програм «Aeroionu». Даний пакет програм реалізує розрахунок аероіонного режиму в робочих зонах на базі тривимірного рівняння переносу домішки в атмосфері. Пакет програм включає в себе наступні підпрограми (модулі):

1. Subroutine Aerodynamics – розв'язання рівняння для потенціалу швидкості повітряного потоку кінцево-різницеvim методом сумарної апроксимації;
2. Subroutine Speed – розрахунок поля швидкості повітряного потоку в робочій зоні;
3. Subroutine Neg_Aeroions – чисельний розрахунок розповсюдження негативних іонів методом п'ятикрокової поперемінно-трикутної різницевої схеми розщеплення 3D рівняння переносу домішки;

4. Subroutine Posit_Aeroions – чисельний розрахунок розповсюдження позитивних іонів методом п'ятикрокової поперемінно-трикутної різницевої схеми розщеплення 3D рівняння переносу домішки;

5. Subroutine Dust – чисельний розрахунок розсіювання пилу методом п'ятикрокової поперемінно-трикутної різницевої схеми розщеплення 3D рівняння переносу домішки;

6. Subroutine Field_Aeroions – побудова поля концентрації позитивних, негативних аероіонів та пилу на рівні органів дихання людини;

7. Subroutine Result – друк результатів: значення потенціалу швидкості, компонент вектору швидкості, концентрації аероіонів в робочій зоні.

На базі розробленого пакету програм «*Aeroiony*» створено комп'ютерно-інформаційну систему, що представлено на рис. 5.3

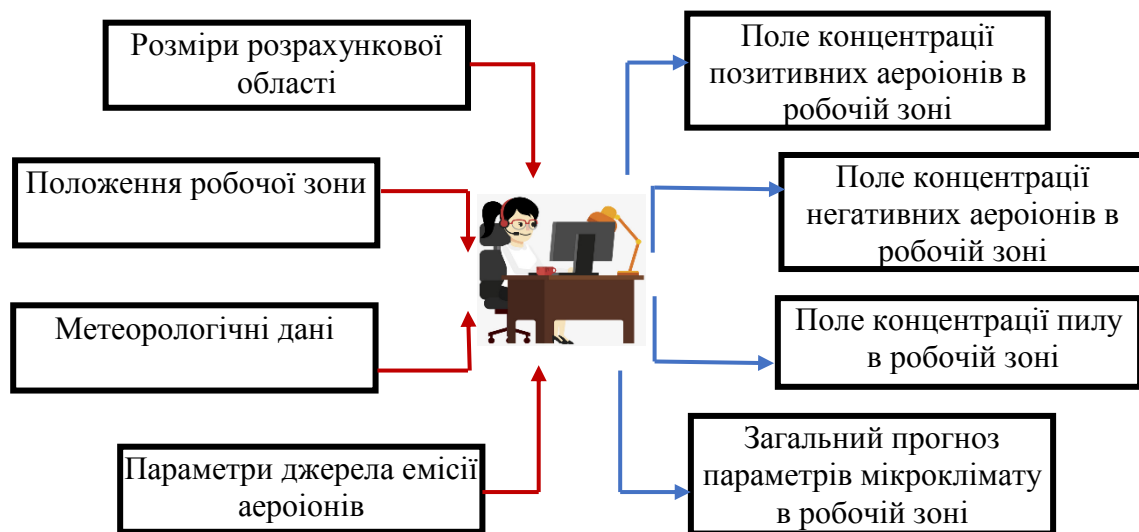


Рисунок 5.3 – Структура комп'ютерно-інформаційної системи прогнозу параметрів мікроклімату в робочій зоні

Алгоритм розв'язання задачі по прогнозуванню аероіонного режиму в робочих зонах показано на рис. 5.4.

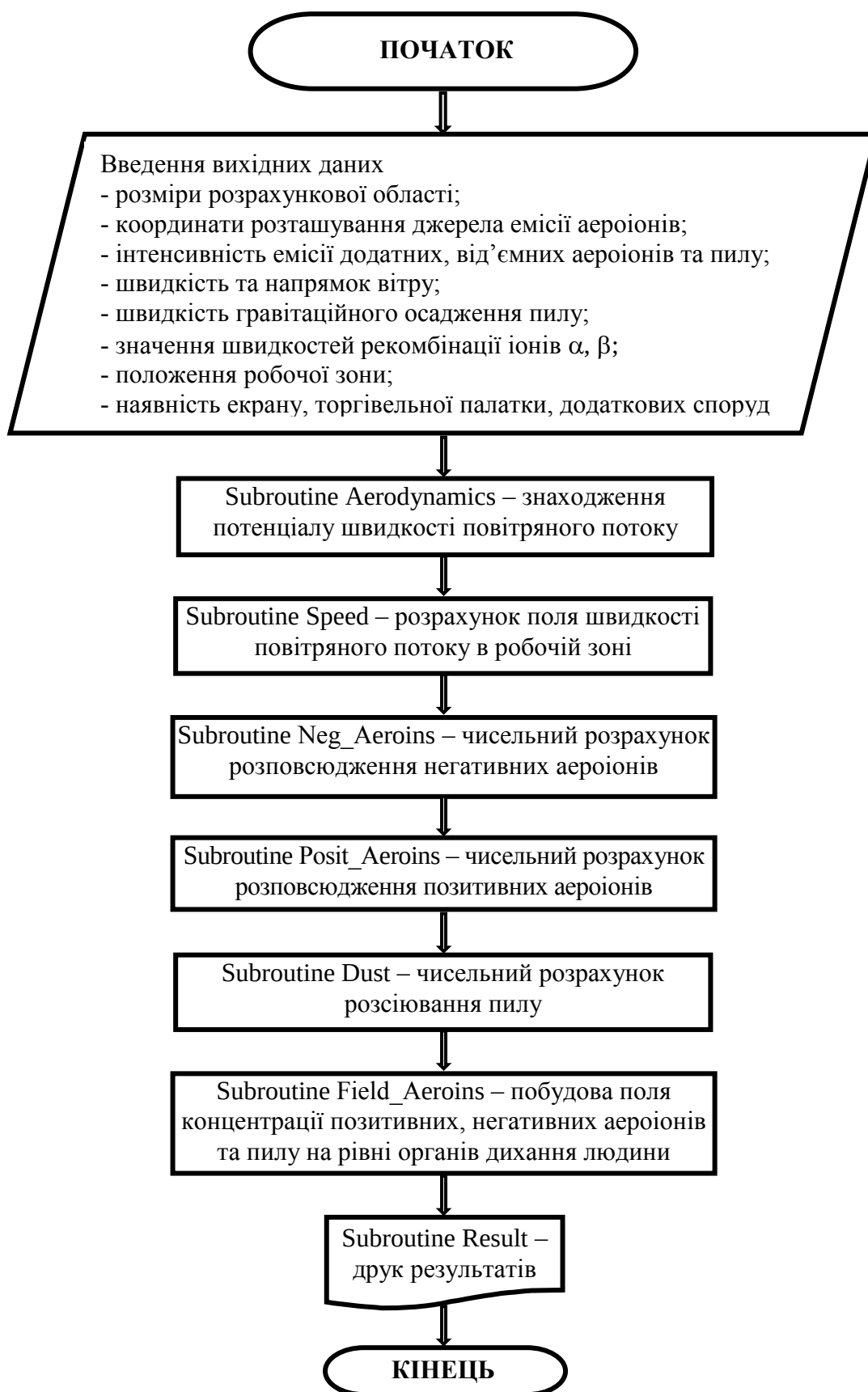


Рисунок 5.4 – Основні етапи алгоритму розв'язання задачі по прогнозуванню аероіонного режиму в робочих зонах за допомогою пакету програм «*Aeroiony*»

5.5 Верифікація розроблених методів прогнозування

Тестова задача 5.1. Розрахунок викиду позитивних аероіонів з вихлопними газами автотранспорту.

При проведенні фізичного експерименту здійснювалося вимірювання позитивних аероіонів на різній відстані від вихідного отвору вихлопної труби автомобіля Daewoo Matiz п.п. 2.6 (рис. 2.3) Для вимірювання концентрації аероіонів використовувався прилад KT-401 AIRION TESTER (рис. 5.5).



Рисунок 5.5 – Прилад для вимірювання аероіонів

Швидкість вітру та газового потоку на виході з вихлопної труби вимірювалися за допомогою анемометру PM 6252 В Digital Anemometer. Швидкість повітряного потоку складала $V_{\text{п}}=1,2\text{--}1,4$ м/с, а швидкість газового потоку $V_{\text{г}}=1,7\text{--}1,9$ м/с, діаметр отвору вихлопної труби $d=32$ мм розміщувався відносно поверхні землі на висоті $H_0=320$ мм. Методика проведення експерименту описана в тестовій задачі 2.1 розділу 2 пункту 2.6. Результати вимірювання та розрахункові дані, отримані за допомогою розробленого методу чисельного розрахунку, наведено в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Концентрація позитивних аероіонів на різних відстанях від джерела емісії

Відстань від вихлопної труби автомобіля, см	Концентрація позитивних аероіонів, іонів/см ³ (експеримент)	Концентрація аероіонів, іонів/см ³ (розрахунок)
5	1400-1443	1425
10	1080-1097	1092
20	650-738	721
30	420-546	465
40	143-158	152
50	67-76	72
60	43-57	52
70	12-19	10

Тестова задача 5.2. Моделювання електричного поля на вулиці.

На першому етапі дослідження було проведено фізичні експерименти по оцінці величини напруженості електричного поля, індукованого роботою різних джерел.

Мета проведення експериментів – тестування розробленого методу прогнозу. В якості першого джерела електричного поля було обрано двофазний електродвигун рис. 5.6.



Рисунок 5.6 – Експериментальна установка: 1 – двофазний електродвигун; 2 – прилад для вимірювання напруженості електричного поля

Для вимірювання напруженості електричного поля використовувався прилад Electromagnetic Radiation Tester KMOON GM 3120. Результати вимірювань і розрахунку згідно розробленого методу показано в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Величина напруженості електричного поля біля двофазного електродвигуна

Відстань, см	Величина напруженості електричного поля (експеримент), В/м	Величина напруженості електричного поля (розрахунок), В/м
4	65-78	61
8	21-29	18
12	10-15	8
16	3-6	2

На другому етапі дослідження проводилося вимірювання напруженості електричного поля на різній відстані від світлодіодної лампи потужністю 20 W (рис. 5.7). Результати проведеного дослідження показано в табл. 5.4.



Рисунок 5.7 – Експериментальна установка: 1 – світлодіодна лампа; 2 – прилад для вимірювання напруженості електричного поля; 3 – штатив з вимірювальною лінійкою

Таблиця 5.4 – Величина напруженості електричного поля від світлодіодної лампи

Відстань, см	Величина напруженості електричного поля (експеримент), В/м	Величина напруженості електричного поля (розрахунок), В/м
2	187-192	176
7	71-75	67
12	33-37	28
16	17-21	14
19	11-14	8

Аналізуючи дані представлені в таблицях 5.2–5.4 можна зробити висновок про адекватність розробленого методу прогнозу аероіонного режиму та оцінювання напруженості електричного поля.

5.6 Моделювання аероіонного режиму в робочих зонах на промислових майданчиках

Джерелом емісії позитивних аероіонів на вулиці виступають в першу чергу люди, автомобілі. Розроблений метод був використаний для розв'язання задачі прогнозу аероіонного режиму в робочих зонах, що розташовані на відкритій місцевості при безпосередньому впливі викидів транспортних засобів. При проведенні розрахунків враховувався комплекс чинників, які раніше в наукових публікаціях не бралися до уваги:

- врахування емісії аероіонів від автомобілів;
- врахування емісії аероіонів від людей;
- врахування впливу різних перешкод на вулиці на формування аероіонного режиму;
- врахування впливу нерівномірного поля швидкості вітру на формування аероіонного режиму;
- врахування впливу нерівномірного поля атмосферної дифузії на формування аероіонного режиму;
- моделювання розсіювання аероіонів в тривимірній постановці (3D моделювання).

Необхідно підкреслити, що врахування перелічених факторів вкрай ускладнює вирішення задач даного класу.

Рішення задачі ґрунтується на трьох етапах:

1. Моделювання утворення поля концентрації позитивних, негативних аероіонів та пилу під дією вітру і атмосферної дифузії.
2. Моделювання переносу аероіонів під дією електричного поля.
3. Зміна поля концентрації аероіонів, пилу в наслідок їх взаємодії.

На першому етапі дослідження було поставлено лабораторний експеримент з вивчення закономірностей розсіювання аероіонів в робочій зоні при наявності в ній комплексу перешкод: стіл, стільці, екран і таке інше рис. 5.8 [223].

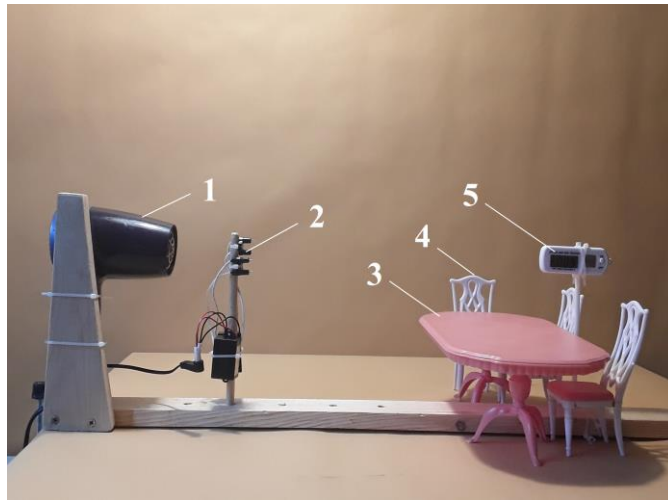


Рисунок 5.8 – Експериментальна установка: 1 – напірний вентилятор; 2 – сопло та живлення іонізатора; 3 – стіл; 4 – стільці; 5 – пристрій для вимірювання концентрації аероіонів [223]

На рисунку 5.8 показано фото експериментальної установки. Джерелом емісії аероіонів виступав пристрій Airnasa KJF03, DC 12 V, 3W, $1 \cdot 10 - 1 \cdot 10^6$ іонів/см³. Для вимірювання концентрації аероіонів використовувався AIRION TESTER КТ-401, $1 \cdot 10 - 2 \cdot 10^6$ іонів/см³. Вимірювання проводилися на висоті 22 см і на різній відстані від джерела емісії аероіонів. Повітряний потік утворювався каналним вентилятором Домовент 125 ВКО 188 м³/год, швидкість повітряного потоку вимірювалася за допомогою анемометра – РМ 6252 В Digital Anemometer. Швидкість повітряного потоку та температури відповідно дорівнювала: $V = 6,17 - 9,41$ м/с, $T = 23^\circ\text{C}$. В якості визначаючого характерного розміру обиралися довжина столу $l = 0,29$ м, кінематична в'язкість повітря $\nu = 15,06 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Для моделювання обирався критерій подібності, а саме число Рейнольдса $Re = \frac{V \cdot l}{\nu} = 1,73 \cdot 10^5$, значення якого відповідає турбулентному режиму повітряного потоку. Результати експериментальних вимірювань та розрахункові дані отримані за допомогою розробленого методу наведено в табл.°5.5.

Таблиця 5.5

Концентрація негативних аероіонів на різних відстанях від джерела емісії без екрана

Відстань, см	Концентрація негативних аероіонів, коли вентилятор не працює (експеримент)/ розрахунок за розробленим методом, іонів/см ³	Концентрація негативних аероіонів, коли працює напірний вентилятор (експеримент)/розрахунок за розробленим методом, іонів/см ³
	без екрана	
5	(-1838) – (-1945) / (-1822)	(-1225) – (-1248) / (-1211)
10	(-1526) – (-1564) / (-1518)	(-1024) – (-1034) / (-1016)
15	(-1338) – (-1375) / (-1326)	(-897) – (-912) / (-881)
20	(-1138) – (-1164) / (-1124)	(-679) – (-724) / (-665)
25	(-965) – (-934) / (-951)	(-482) – (-496) / (-477)
30	(-838) – (-892) / (-824)	(-226) – (-248) / (-213)
35	(-624) – (-645) / (-612)	(-124) – (-154) / (-112)
40	(-437) – (-456) / (-426)	(-82) – (-96) / (-77)
45	(-218) – (-236) / (-204)	(-54) – (-58) / (-46)

На другому етапі лабораторних досліджень було проведено експеримент для іншого сценарію, коли встановлювався екран із матеріалу гетинакс між джерелом емісії аероіонів та робочою зоною рис. 5.9.

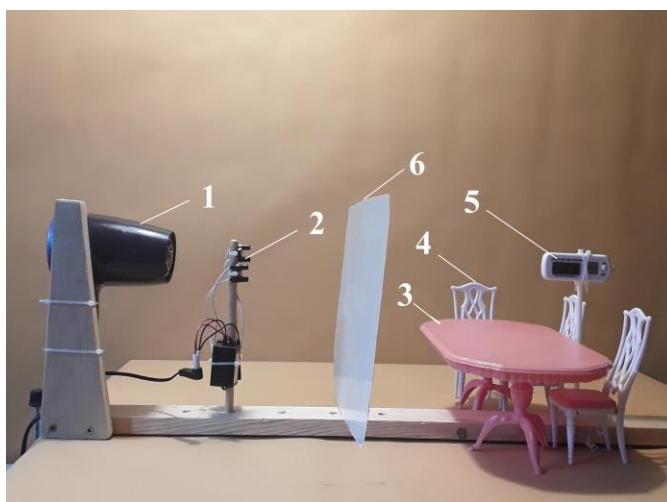


Рисунок 5.9 – Експериментальна установка: 1 – напірний вентилятор; 2 – сопло та живлення іонізатора; 3 – стіл; 4 – стільці; 5 – пристрій для вимірювання концентрації аероіонів; 6 – екран [223]

В представленій нижче таблиці 5.6 наведено результати експериментальних вимірювань та розрахункові дані, що було отримано за допомогою розробленого методу для даного сценарію.

Таблиця 5.6 – Концентрація негативних аероіонів на різних відстанях від джерела емісії з екраном

Відстань, см	Концентрація негативних аероіонів, коли вентилятор не працює (експеримент)/ розрахунок за розробленим методом, іонів/см ³	Концентрація негативних аероіонів, коли працює напірний вентилятор (експеримент)/розрахунок за розробленим методом, іонів/см ³
	з екраном	
5	(-1731) – (-1845) / (-1721)	(-839) – (-864) / (-821)
10	(-1526) – (-1454) / (-1504)	(-675) – (-694) / (-664)
15	(-1232) – (-1164) / (-1264)	(-438) – (-456) / (-425)
20	(-1056) – (-986) / (-1041)	(-279) – (-284) / (-261)
25	(-848) – (-7346) / (-838)	(-165) – (-196) / (-153)
30	(-792) – (-654) / (-787)	(-86) – (-98) / (-73)
35	(-564) – (-438) / (-552)	(-54) – (-62) / (-48)
40	(-337) – (-286) / (-321)	(-21) – (-26) / (-19)
45	(-126) – (-198) / (-118)	(-9) – (-15) / (-8)

Аналіз даних, що представлено в табл. 5.5–5.6, дозволяє зробити висновок про адекватність розробленого методу.

Розроблений метод прогнозу було використано для розв’язання задачі по оцінці рівня забруднення робочих зон на відкритій місцевості при наявності джерела емісії: позитивних аероіонів – викиди автотранспорту та людини; пилу – рух автотранспорту; джерела негативних аероіонів – іонізатору, встановленому в робочій зоні та екрана (паркану), що змінює аеродинаміку руху аероіонів та пилу.

В якості об’єкту дослідження було обрано Дніпровський масло екстракційний завод, а саме територія, де розміщуються вантажні терези (рис. 5.10), куди заїжджають вантажні автомобілі з насінням. Дана територія є джерелом пилу, позитивних аероіонів, а працівники, які відповідають за

розвантаження автомобілів, постійно знаходяться під впливом цих негативних факторів.



Рисунок 5.10 – Вид моделюючої області (Google Earth Image, 2019)
Дніпровський маслоекстракційний завод: 1 – вантажні терези

Схема розрахункової області представлена на рис. 5.11 [223].

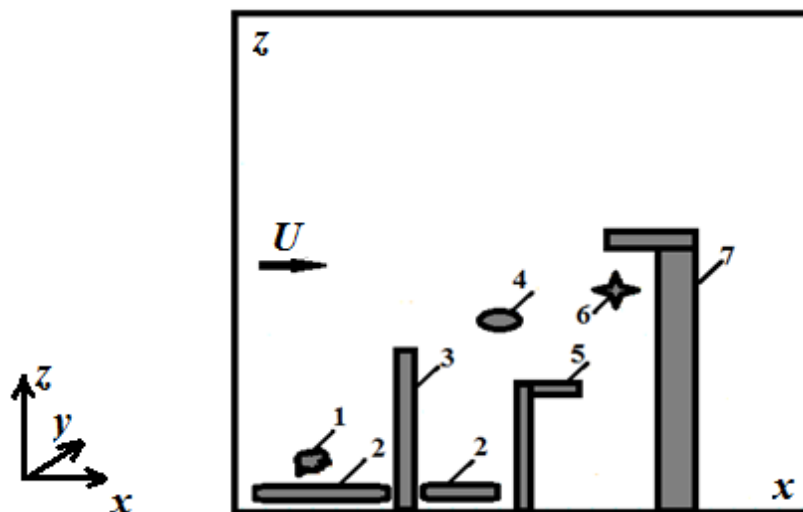


Рисунок 5.11 – Схема розрахункової області: 1 – джерело емісії (автомобіль), 2 – джерело емісії (пил), 3 – екран, 4 – джерело позитивних аероіонів, 5 – робоча зона працівника, 6 – джерело негативних аероіонів (іонізатор), 7 – тимчасова споруда [223]

Нижче наведено результати обчислювального експерименту по розрахунку поля концентрації позитивних, негативних аероіонів та пилу в робочій зоні біля автомагістралі (рис. 5.12, 5.14, 5.16). Швидкість повітряного потоку 5 м/с, розміри розрахункової області 8 м на 4 м, інтенсивність джерел емісії аероіонів 1000 іонів/см³. На рисунку 5.13, 5.15, 5.17 представлено відсотковий розподіл концентрації негативних, позитивних аероіонів в робочій зоні на висоті 1,7 м в перетині $y=4$ м [223].

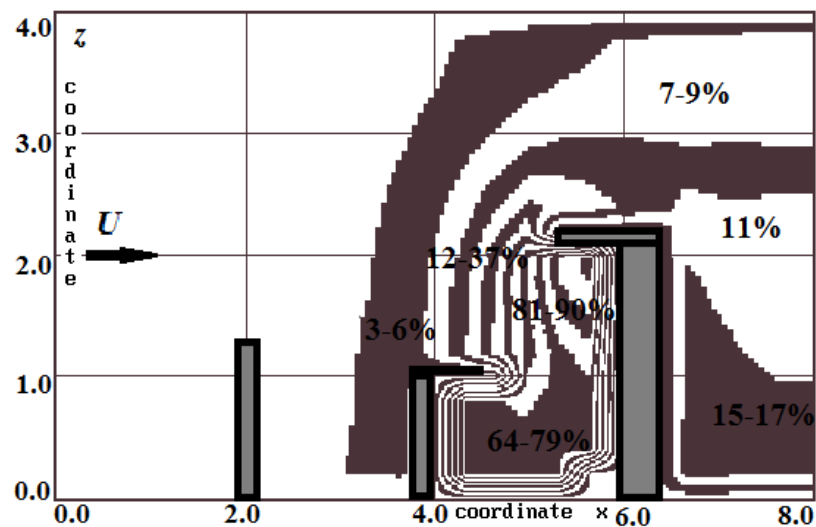


Рисунок 5.12 – Розподіл концентрації негативних аероіонів $t=3$ хв, перетин $y=4$ м [223]

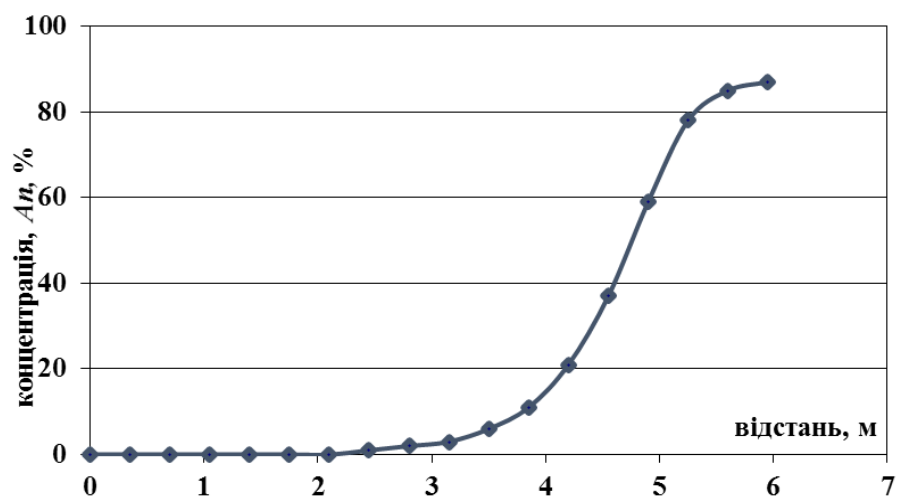


Рисунок 5.13 – Розподіл концентрації негативних аероіонів на висоті $H=1,7$ м, перетин $y=4$ м [223]

На рисунку 5.12 видно, що на відстані 3 м від початку розрахункової області спостерігається відсутність негативних аероіонів, оскільки на цій ділянці не має джерела їх емісії, а на іншій ділянці видно складну картину розподілу, що викликана рухом повітряного потоку і дією атмосферної дифузії. Значення концентрації на висоті $H=1,7$ м повільно зростає під дією джерела емісії та дифузії (рис. 5.13) [223].

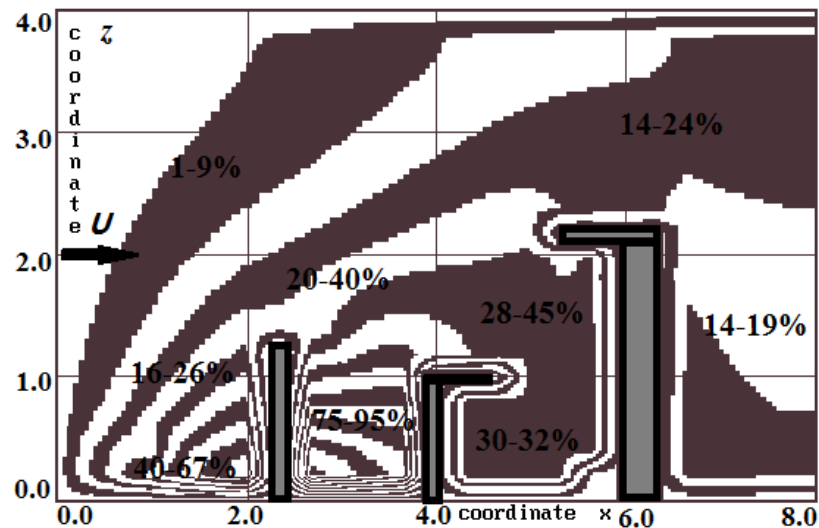


Рисунок 5.14 – Розподіл концентрації пилу $t=3$ хв, перетин $y=4$ м [223]

На рисунку 5.14 видно, що вся досліджувана область заповнена пилом, що пов'язано з її інтенсивним виділенням на двох ділянках: до екрана – емісія пилу від автомобілей; від екрана до розташування терезів – робоча зона працівників. Пил зноситься вітровим потоком і потрапляє в робочу зону працівників відкритого майданчика, *ПДК* пилу приймається $ПДК_{с.д.}=0,15$ мг/м³, тому концентрація пилу в цій зоні перевищує $ПДК_{с.д.}$ на 20 %.

Значення концентрації на висоті $H=1,7$ м повільно зростає під дією джерела емісії (автотранспорту), потім за рахунок дії екрана гальмується і на незначній відстані спадає, але під дією джерела емісії (робітників) знову зростає та за рахунок зміни напрямку потоку біля піддашку тимчасової споруди та за рахунок дифузії зменшується (рис. 5.15) [223].

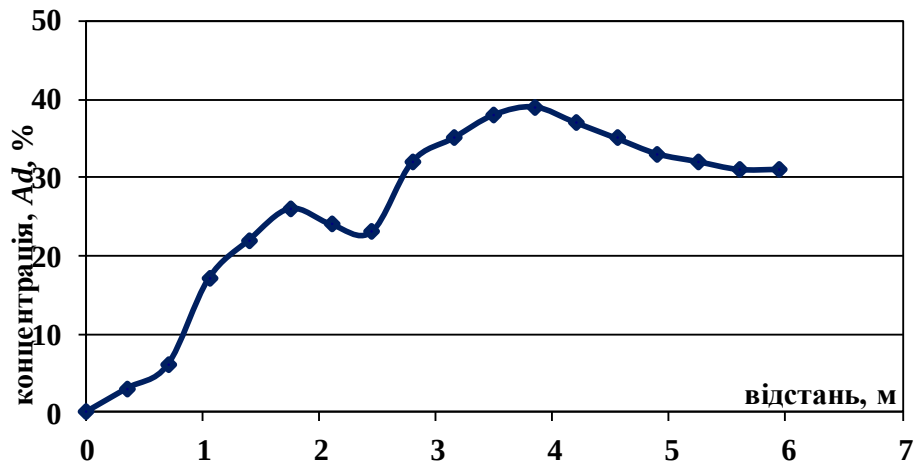


Рисунок 5.15 – Розподіл концентрації пилу на висоті $H=1,7$ м, перетин $y=4$ м [223]

На рисунку 5.16 представлено розподіл позитивних аероіонів. Як видно в робочій зоні спостерігається динаміка їх росту, що обумовлено зносом вітровим потоком позитивних аероіонів від автотраси (джерело емісії – автомобілі) та емісією позитивних аероіонів від людей, які знаходяться в робочій зоні, тобто має місце взаємовплив джерел емісій аероіонів [223].

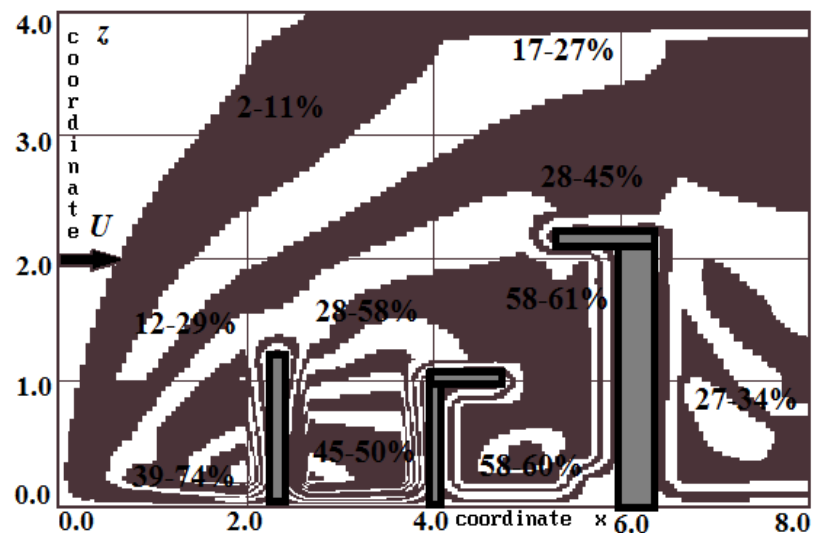


Рисунок 5.16 – Розподіл концентрації позитивних аероіонів $t=3$ хв, перетин $y=4$ м [223]

Значення концентрації на висоті $H=1,7$ м повільно зростає під дією джерела емісії позитивних аероіонів (автотранспорту), потім за рахунок дії

екрана гальмується і на незначній відстані спадає, але під дією джерела емісії (робітників) знову зростає та за рахунок зміни напрямку потоку біля піддашку тимчасової споруди та за рахунок дифузії зменшується (рис. 5.17) [223].

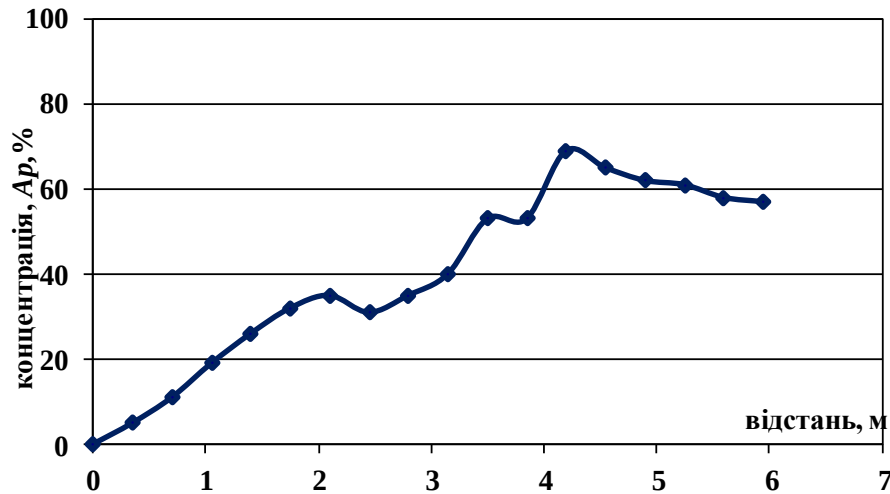


Рисунок 5.17 – Розподіл концентрації позитивних аероіонів на висоті $H=1,7$ м, перетин $y=4$ м [223]

Оптимальний рівень позитивних аероіонів $1500-3000$ іонів/см³, максимально допустимий рівень 50000 іонів/см³, в робочій зоні спостерігається перевищення допустимого рівня на 10 %.

5.7 Оцінювання величини напруженості електричного поля в робочих зонах на промислових майданчиках

Розроблений метод було використано для вирішення задачі прогнозу напруженості електричного поля в робочих зонах, що розташовані на відкритій місцевості поблизу джерела електричного поля (електрокарів). При проведенні розрахунків враховувалися чинники, які суттєво ускладнюють практичне рішення задачі:

- врахування впливу перешкод на деформацію електричного поля;
- моделювання різного положення джерела електричного поля відносно розміщення робочої зони.

Розглядається розв'язання модельної задачі: на промисловому майданчику «Дніпропетровського маслоекстракційного заводу» постійно працюють електро-погрузчики (електрокари) – джерела електричного поля, в межах проїжджої частини майданчика знаходяться паркани та інші перешкоди (екрани), а також робочі зони працівників (рис. 5.18). Кожної зміни на електрокарах працює 6 водіїв, які постійно потрапляють в зону дії електричного поля. При моделюванні враховується величина електричного поля Землі. Потрібно визначити напруженість електричного поля в робочій зоні при різній висоті бар'єру [41].

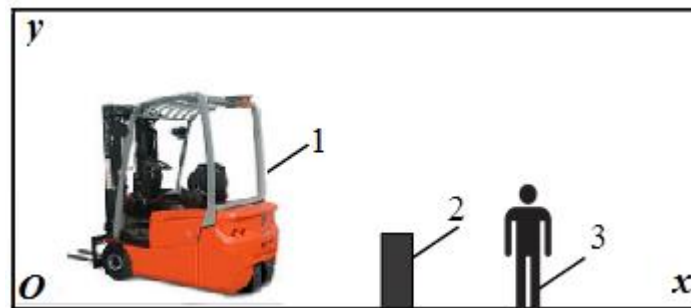


Рисунок 5.18 – Схема розрахункової області: 1 – електропогрузчик, 2 – екран, 3 – робітник в робочій зоні [41]

Апроксимація джерела випромінювання задається двома точками. Розглядаються варіанти низького та високого екрана, який виступає діелектриком. Ставиться задача оцінювання впливу висоти екрана на рівень електричного поля за екраном, де знаходиться робоча зона працівника (рис. 5.18).

Задача, що розглядається, є модельною, але ілюструє можливості використання розробленого методу для прогнозування напруженості електричного поля при наявності електрокарів на робочих майданчиках.

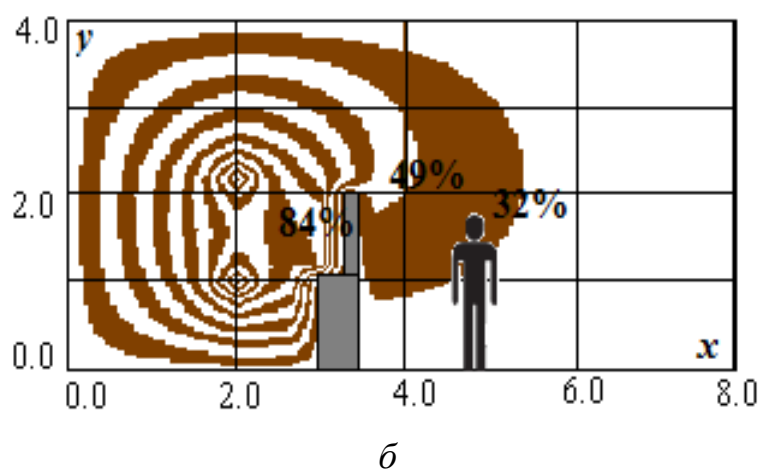
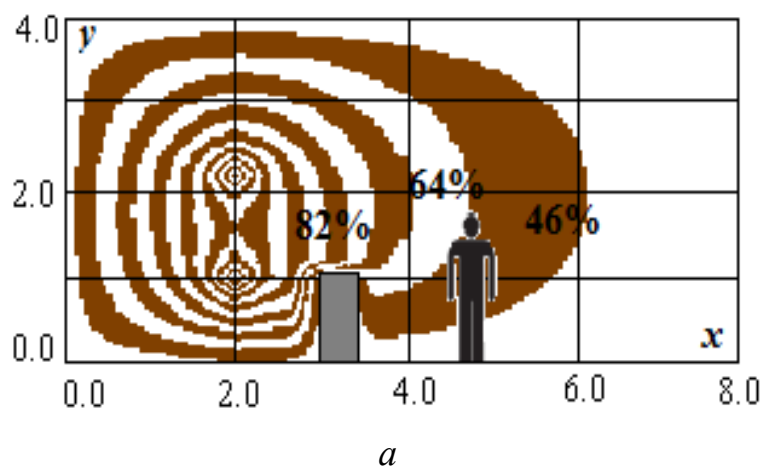


Рисунок 5.19 – Поле електричного потенціалу з використанням екранів:
a – низький екран; *б* – високий екран [41]

На рисунку 5.19 представлено результати комп'ютерного моделювання, зображено поле електричного потенціалу у випадках використання різного по висоті екрана. Добре видно, як наявність екрана призводить до деформації ізоліній електричного поля. На рисунку чітко визначається розміщення джерел електричного поля – це дві підзони з великим градієнтом електричного потенціалу, що має форму кола. Із рис. 5.19 *б* видно, що контур електричного потенціалу при наявності високого екрана змінює свою форму за екраном, він менш опущений вниз, ніж у випадку низького екрана (рис. 5.19 *a*).

Як відомо, при напруженості електричного поля менше 5 кВ/м людина може перебувати необмежений час, тому її можна використати як гранично

допустиму напруженість $E_{\text{доп}}$. Згідно (ГОСТ 12.1.002-84) гранично допустима напруженість електричного поля всередині житлових будинків – 0,5 кВ/м, на території зони житлової забудови – 1 кВ/м;

Це підтверджує можливості моделі «вловлювати» зміни у внутрішніх граничних умовах, що впливають на формування поля електричного потенціалу.

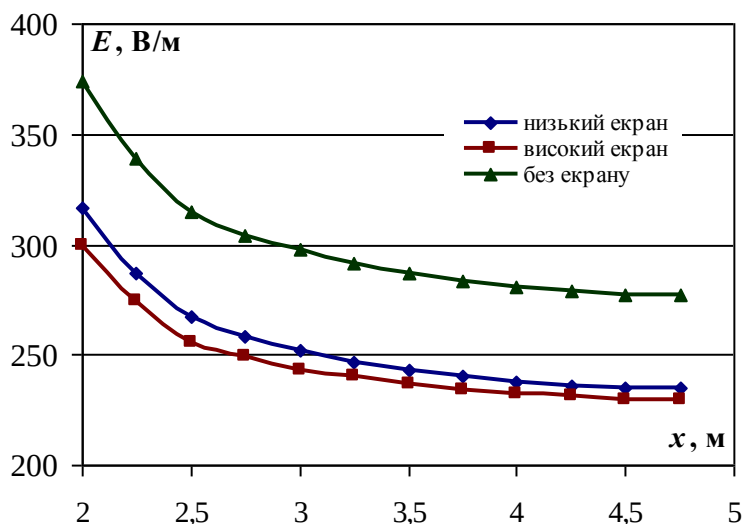


Рисунок 5.20 – Розподіл напруженості електричного поля на висоті $h=1,7$ м при використанні екранів різної висоти [41]

На рисунку 5.20 представлено значення напруженості електричного поля в робочій зоні на різній відстані від екрана. Це значення не перевищує гранично-допустиме значення, але видно, що використання високого екрана $H=2$ м призводить до зниження напруженості електричного поля в робочій зоні на 8–10 % в порівнянні з низьким екраном і на 20 % в порівнянні з відсутністю екрана.

Запропоновано новий метод для оцінювання електричного поля на різній відстані від джерела з урахуванням перешкод, де і відбувається деформація електричного поля.

Висновки до розділу 5

1. Розроблено метод прогнозу аероїнного режиму в робочих зонах, який базується на тривимірному моделюванні розповсюдження негативних, позитивних ієроіонів та пилу під дією вітру та дифузії. Особливістю запропонованого методу є можливість прогнозу аероїнного режиму з урахуванням практично всіх фізичних факторів, що суттєво впливають на формування концентраційних полів аероіонів в робочих зонах на промислових майданчиках.

2. Запропонований метод прогнозу було використано для розв'язання задачі по оцінці рівня забруднення в робочих зонах на відкритій місцевості промислового майданчика при наявності джерела емісії: позитивних аероіонів – викиди автотранспорту та дихання людей; пилу – рух робітників та автотранспорту; джерела негативних аероіонів – іонізатору, встановленому в робочій зоні та екрана, що змінює аеродинаміку руху аероіонів та пилу. Встановлено закономірності зміни концентрації аероіонів та пилу на висоті 1,7 м, що відповідає розташуванню органів дихання робітників.

3. Розроблено метод для аналізу напруженості електричного поля на промисловому майданчику, який дозволяє розраховувати величину напруженості електричного поля з урахуванням розміщення екранів (перешкод) та провести оцінку ефективності застосування екранів для зменшення величини електричного поля в робочій зоні.

4. Розроблено програмне забезпечення для розрахунку електричного потенціалу на основі алгоритмів кінцево-різницевих методів розв'язання рівняння Лапласа. Проведено обчислювальні експерименти, які показали можливості розробленого методу. Встановлено закономірності розподілу напруженості електричного поля на висоті $h=1,7\text{ м}$ при використанні екранів різної висоти. З'ясовано, що використання високого екрана $H=2\text{ м}$

призводить до зниження напруженості електричного поля в робочій зоні на 8–10 % в порівнянні з низьким екраном $H=1,2$ м і на 20 % в порівнянні з відсутністю екранів.

Розроблені та описані в даному розділі математичні методи прогнозу, можна застосовувати для оцінювання ефектів зниження напруженості електричного поля, концентрації аероіонів та пилу. Ці методи реалізовано у вигляді прикладних програм для розрахунку параметрів повітряного середовища в робочих зонах на відкритій місцевості.

Основні положення розділу 5 опубліковані автором у наукових працях [32, 41, 44, 45, 46, 110, 223].

Список використаних джерел у розділі 5

Список використаних джерел у розділі 5 наведено у загальному списку використаних джерел роботи [2, 10, 11, 12, 13, 14, 41, 58, 59, 60, 72, 79, 95, 113, 114, 122, 123, 124, 125, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 145, 181, 197, 209, 213, 215, 223, 226, 227, 239, 240, 241].

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, в якій вирішена важлива науково-прикладна проблема розвитку наукових основ та практичної оцінки шкідливих факторів у робочих зонах на території промислових підприємств і зменшення їх впливу на рівень хронічних захворювань робітників, що має важливе значення для забезпечення допустимих умов праці на робочих місцях промислових майданчиків підприємств та при проектуванні робочих місць на відкритій місцевості промислових регіонів. За результатами роботи зроблено такі висновки:

1. Проведено комплексне дослідження складу шкідливих викидів промислових підприємств міста Дніпро. Виконано оцінювання сумарного показника забруднення сумішшю речовин, які потрапляють в атмосферне повітря від кожного із розглянутих підприємств, та встановлено, що він перевищує в 4–7 разів допустиме значення, що призводить до зростання рівня хронічних захворювань у робітників, чий робочі зони розташовуються на відкритій місцевості цих підприємств.

Застосування методу оцінювання рівня хімічного забруднення повітря в робочих зонах на промислових майданчиках дозволяє: враховувати хімічну трансформацію забруднюючих речовин на базі тривимірного розрахунку полів концентрації домішки; проводити розрахунок окремо для постійно діючого точкового джерела забруднення і лінійно розподіленого джерела забруднення, так і з урахуванням їх взаємного впливу та хімічної трансформації шкідливих домішок в атмосферному повітрі. Це комплексне врахування призводить до більш точних розрахунків полів концентрації забруднювачів, а відповідно і отримання об'єктивного значення ризику виникнення хронічних захворювань.

2. З використанням уточненого методу оцінювання ризику хронічної інтоксикації працівників, робочі зони яких розміщуються на відкритій місцевості промислових майданчиків та на прилеглій території промислових

районів, проведено оцінювання ризику хронічної інтоксикації робітників, пов'язаної із забрудненням атмосферного повітря конкретними видами домішок (діоксидом сірки, оксидами азоту тощо), та комбінованого ризику дії суміші речовин. Доведено, що з роками ризик хронічного впливу зростає і змінюється від прийнятного (5 %) до надзвичайно небезпечного (50–84 %).

3. Розроблено чисельно-аналітичний метод, який дозволяє проводити дослідження щодо ефективності застосування екранів на промислових майданчиках для зменшення рівня забруднення повітря в робочих зонах. 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 у порівнянні з випадком відсутності екрана. Доведено, що встановлення екранів в робочій зоні на відкритій місцевості промислових підприємств знижує ризик хронічної інтоксикації СО на 10 %, збільшення висоти екрана до 1,8 м призводить до зменшення ризику на 16 %. Ризик хронічних захворювань змінюється від небезпечного до прийнятного.

4. З використанням удосконаленого методу оцінювання рівня хімічного забруднення повітря в робочих зонах на промислових майданчиках при врахуванні впливу рослинності (екоінжинірингу) на формування зон забруднення встановлено, що присутність рослинності (пористої пластини) призводить до зниження концентрації забруднювача в робочій зоні приблизно на 7–14 %, а при врахуванні і процесу сорбції – на 11–20 %. У першому випадку ризик зменшується на 28 %, а в другому – на 32 %.

5. Вдосконалений метод оцінювання аероіонного режиму в робочих зонах на промислових майданчиках, що базується на тривимірному моделюванні розповсюдження аероіонів, дозволяє враховувати взаємодію аероіонів різної полярності та пилу, наявність перешкод в робочих зонах, нерівномірність поля швидкості повітряного потоку та турбулентну дифузію.

Цей метод використано для розв'язання задачі з оцінювання рівня забруднення в робочих зонах на відкритій місцевості промислового

майданчика при наявності джерела емісії: позитивних аероіонів – викиди автотранспорту та дихання людей; пилу – рух робітників та автотранспорту; джерела негативних аероіонів – іонізатора, встановленого в робочій зоні, та екрана, що змінює аеродинаміку руху аероіонів та пилу. Виявлено закономірності зміни концентрації аероіонів та пилу на висоті 1,7 м, що відповідає розташуванню органів дихання робітників.

6. Застосований метод оцінювання напруженості електричного поля в робочих зонах дозволяє враховувати вплив перешкод різної геометричної форми на формування електричних полів.

Проведені дослідження встановили, що використання високого екрана $H=2$ м призводить до зниження напруженості електричного поля в робочій зоні на 8–10 % в порівнянні з низьким екраном $H=1,2$ м і на 20 % – в порівнянні з відсутністю екранів.

7. Запропонована технологія зниження хімічного забруднення в робочих зонах за рахунок використання дворівневих усмоктувачів та спеціальних напрямних пластин показує, що ефективність застосування пластин однакової довжини складає 22–28 %; різної довжини, коли верхня довша – 42–50 %; різної довжини, коли верхня довша і вертикального екрана – 56–69 %. Рівень ризику виникнення хронічних захворювань через один рік без відбору забруднення – 44 %, але найбільше цей показник зменшується при наявності відбору через два отвори з напрямними пластинами та вертикальним екраном – 20 %.

Розроблений інструментарій чисельного розрахунку концентрації забруднювача та ризику хронічних захворювань працівників із урахуванням наявності в робочій зоні дворівневих усмоктувачів дозволив провести обчислювальні розрахунки для різних сценаріїв розташування напрямних пластин.

8. З використанням уточненого методу розрахунку процесу нейтралізації чадного газу в спеціальній камері для зменшення рівня хімічного забруднення в робочих зонах розроблено програмний модуль, що дозволяє

проводити обчислювальні експерименти для дослідження зміни концентрації оксиду вуглецю при його нейтралізації водяною парою з урахуванням форми камери, розташування форсунок подачі водяної пари, потужності джерел та їх місця знаходження.

9. Розроблений комплексний метод оцінювання параметрів повітряного середовища в робочих зонах на відкритій місцевості дозволяє розрахувати передбачуваний вітровий режим, вологість та температуру в робочих зонах відповідно до допустимих норм.

10. Проведено верифікацію розроблених методів оцінювання параметрів повітряного середовища та виконано їх впровадження для зниження впливу шкідливих чинників в робочих зонах підприємств: «ЛУГОВСЬКЕ», «РИН», «Енергосервіс-КР», АТ ДТЕК «Дніпровські електромережі». Програмні модулі впроваджено в навчальному процесі Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

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. Беляев Н. Н., Цыганкова С. Г. CFD моделирование аэроионного режима в помещениях. *Технічні науки та технології: науковий журнал*. 2015. №2 (2). С. 242–247.

12. Беляев Н. Н., Цыганкова С. Г. Оценка аэроионного режима в рабочей зоне при искусственной ионизации воздуха в помещении. *Науковий вісник будівництва*. 2015. № 3 (81). С. 158–161.

13. Беляев Н. Н., Цыганкова С. Г. Численные модели для экспресс расчета концентрации аэроионов в помещении. *Науковий вісник будівництва*. 2015. №4 (82). С. 190–193.

14. Беляев Н. Н., Цыганкова С. Г. Математическое моделирование аэроионного режима в помещении при искусственной ионизации воздуха. *Сборник научных трудов: Строительство, материаловедение, машиностроение». Серия: Безопасность жизнедеятельности*. 2015. Вып. 83. С. 40–46.

15. Беляев Н. Н., Русакова Т. И., Кириченко П. С. Моделирование загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта на улицах городов : монографія. Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. 159 с.

16. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Математическое моделирование процесса вентиляции тупиковой подземной выработки. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2015. Вип. 47. С. 35–41.

17. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Исследование техногенного влияния на окружающую среду газовых выбросов Приднепровской ТЭС. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Механіка*. 2016. Вип. 20, т. 24, № 5. С. 53–60. ISSN 2312–2897.

18. Беляев Н. Н., Русакова Т. И., Колесник В. Е., Павличенко А. В. Прогноз уровня загрязнения атмосферного воздуха в зоне влияния городских автомагистралей. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2016. №1. С. 90–97. ISSN 2071-2227 (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).

19. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Информационная система оценки

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., Якобовська З. Н. Численное моделирование процессов массопереноса при нейтрализации сточных вод. *Науковий вісник будівництва*. 2017. Т. 87, №1. С. 159–165. ISSN 2311-7257.

23. Біляєв 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. Біляєв 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 : Гидрометеиздат, 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. Р. 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 освіті: 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. Є. 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. Вып. 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.dneprstat.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 : Гидрометеиздат, 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 дыхания. 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. *АМІТ* 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. Біляєв 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/crpnmu/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. *Пожезна 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 И. О. Біполярна іонізація повітряного середовища приміщень функціональних підрозділів мобільного госпіталю МНС України. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2011. № 14. С. 161–171.

130. Толкунов И. О., Попов И. И. 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 «ХПІ»*. 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 прозрес 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 1. 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 Universytetu*. 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/EE9.0000000000000014

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.ENVSOFT.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. Mărunțălu 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- ϵ 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 megapole 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.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Сільськогосподарське товариство з обмеженою відповідальністю
«ЛУГОВСЬКЕ»

52423, Дніпропетровська область, Солонянський район, с. Олександропіль,
вул. Тюрина, №4

№ 19/11-18 дата 22.11.2018

АКТ

**про впровадження результатів наукових досліджень з теми докторської
дисертації Русакової Тетяни Іванівни
в практичну діяльність товариства «ЛУГОВСЬКЕ»**

Товариство «ЛУГОВСЬКЕ» надає позитивну оцінку впровадження результатів наукових досліджень, що одержані к.т.н. Русаковою Т.І. під час виконання дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Результати дисертаційного дослідження Русакової Тетяни Іванівни, а саме розроблені методи прогнозу хімічного забруднення повітряного середовища та оцінки параметрів мікроклімату в робочих зонах на відкритих майданчиках (обслуговування сільськогосподарської техніки) використано в роботі товариства «Луговське». Під час апробації розробленого програмного забезпечення, Русаковою Т.І. було проведено ряд обчислювальних експериментів, що дозволило отримати рекомендації щодо покращення якості повітря в робочих зонах. Ці рекомендації були прийняті товариством у практику своєї діяльності, що дозволило вжити заходи з охорони праці робітників.

Директор товариства «ЛУГОВСЬКЕ»



Ковальчук Л. М.

Товариство з обмеженою
відповідальністю
«ЕНЕРГОСЕРВІС-КР»

УКРАЇНА
оф. 209/2А вул. Невська, м. Кривий Ріг,
Дніпропетровська обл.,
404-40-05, 404-40-06
www.eskr.com.ua



АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Русакової Тетяни Іванівни

В дисертаційній роботі к.т.н. Русакової Т. І. розроблено математичні методи та спеціалізоване програмне забезпечення для прогнозу параметрів мікроклімату в робочих зонах. Запропоновані математичні методи дозволяють прогнозувати поля вологості, температури, швидкості повітряного потоку та концентрації хімічних забруднювачів в робочих зонах з урахуванням впливу різноманітних перешкод (екранів, бар'єрів та т. ін.), а також з урахуванням аеродинаміки повітряного потоку та дифузії. Автором роботи також побудовано математичні методи для прогнозу напруженості електричних полів в робочих зонах та оцінки аероіонного режиму.

Для прогнозу параметрів мікроклімату в робочих зонах використано двовимірні та тривимірні моделі аеродинаміки та тепломасопереносу. Для рішення моделюючих рівнянь були застосовані аналітичні та кінцево-різницеві методи розрахунку.

Розроблені математичні методи та пакети програм було використано для прогнозу рівня хімічного забруднення на території ТОВ «Енергосервіс-КР» при плануванні реінжинірингу робочих зон на відкритій місцевості. Використання розроблених математичних методів дозволило отримати прогнозні данні відносно рівня хімічного забруднення аероіонного режиму, які не можливо отримати на базі існуючих методів прогнозу.

Директор
ТОВ «Енергосервіс-КР»

20.12.18.



Ольферт О.Ю.

« Р И Н »



ЧАСТНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

Юридический адрес:
49005 ул. Универсальная, д. 13, кв.41
г. Днепропетровск, Украина
Фактический адрес:
49000 ул. Мечникова, д.10Б, оф. 801
г. Днепропетровск, Украина

тел. 8 (056) 794 32 58
факс 8 (056) 794 32 57
E-mail: office-rin@optima.com.ua

«21» січня 2019 г.
Исх. № 18/01-19

АКТ

Про впровадження наукових результатів
з теми докторської дисертації Русакової Т. І.
в практику діяльності компанії «РИН»

Надаємо інформацію про факт та позитивні підсумки впровадження в практику діяльності компанії «РИН» наукових результатів, одержаних к.т.н. Русаковою Т.І. в процесі підготовки нею дисертаційної роботи. В процесі виконання наукових досліджень за тематикою дисертації у 2014–2019 рр. к.т.н. Русакова Тетяна Іванівна наполегливо та плідно співпрацювала з компанією «РИН». Серед результатів, що були проваджені Русаковою Т.І. в нашій компанії, слід перш за все виділити комплекс математичних методів для прогнозу параметрів мікроклімату та рівня забруднення повітряного середовища.

Розроблені методи орієнтовані на вирішення декількох класів задач: прогноз хімічного забруднення повітряного середовища; прогноз рівня електромагнітного забруднення; прогноз аероіонного режиму; прогноз вітрового режиму в робочих зонах; вдосконалення відбору та нейтралізації оксиду вуглецю у вихлопних газах автотранспорту.

Русаковою Т.І. розроблені пакети прикладних програм, що реалізують розроблені математичні методи. Застосування модулів програмного комплексу дозволило оцінити параметри мікроклімату в робочих зонах при аналізі використання площадок машинно-транспортного парку та їх реконструкції.

Директор ЧП «РИН»

Соловьев М.Б.

Частное предприятие «РИН»

Идентификационный номер юридического лица: 30192663

Дата и номер записи в Едином государственном реестре юридических лиц и физических лиц-предпринимателей: 21.12.1998 №1 224 120 0000 017683



АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
«ДТЕК ДНІПРОВСЬКІ
ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ»

шосе Запорізьке, 22
м. Дніпро
49107, Україна
тел.: +38 056 373 50 59
факс: +38 056 373 50 23

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ДТЭК ДНЕПРОВСКИЕ
ЭЛЕКТРОСЕТИ»

шоссе Запорожское, 22
г. Днепр
49107, Украина
тел.: +38 056 373 50 59
факс: +38 056 373 50 23

№ 50420/1501
На № від 17.01.19

АКТ

про впровадження результатів наукових досліджень
з теми докторської дисертації
Русакової Тетяни Іванівни

Результати дисертаційного дослідження Русакової Тетяни Іванівни, а саме розроблені методи прогнозу рівня електромагнітного випромінювання та програми чисельного розрахунку використовуються в службі охорони праці АТ ДТЕК Дніпровські електромережі. Вони дозволяють шляхом обчислювального експерименту розрахувати інтенсивність напруженості електричного поля з урахуванням необхідної кількості джерел електричного поля. При обслуговуванні чергово-ремонтним персоналом силового обладнання, яке знаходиться під напругою 150 кВ, можливо спрогнозувати рівень електромагнітного поля та оцінити його величину в порівнянні з гранично допустимим значенням. Програмний комплекс характеризується швидкістю розрахунків, зрозумілим для користувача інтерфейсом, створений на високому технічному рівні з використанням сучасних засобів програмування.

Генеральний директор



В.Ю. Кухтій

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної,
економічної роботи, перспективного та
іноваційного розвитку
д.т.н., проф. Радкевич А.В.

«12» 03 2019 р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Русакової Тетяни Іванівни

Чинним актом підтверджується те, що результати дисертаційної роботи здобувача Русакової Т.І. використовуються в навчальному процесі Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна при підготовці студентів, які навчаються за спеціальністю «Будівництво та цивільна інженерія». Матеріали дисертаційної роботи, алгоритми та пакети програм використовуються при проведенні лекційних та практичних занять з дисциплін «Охорона природного середовища від забруднення промисловими підприємствами», «Прогнозування та ліквідація аварійних ситуацій», що дозволило підвищити ефективність навчального процесу та якість викладання матеріалу при вивченні вказаних дисциплін.

Начальник навчального відділу

Л.Є. Андрашко

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

М.М. Біляєв

ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ВСТАНОВЛЕННЯ ЕКРАНІВ НА ПІДПРИЄМСТВІ «ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО ОЛІЙНООЕКСТРАЦІЙНОГО ЗАВОДУ ОЛЕЙНА»

Розрахунки по рентабельності та окупності встановлення екранів висотою 1,8 м довжиною по периметру 1000 м на підприємстві «Олейна» проведені в наступній послідовності:

1. Підрахунок загальної собівартості встановлення екранів (табл. Б1).

Таблиця Б1 – Кількісні розрахунки собівартості встановлення екранів

Складові собівартості	Часткова вартість	Повна вартість
Матеріал екранів – нержавіюча сталь 1,8 м*2,5 м*4 мм – розміри листа	110 грн/м ²	1800 м ² *110 грн/м ² = 198 000 грн
Стовпи для огорожі	240 грн за 1 шт, усього 400 стовпів	400*240=96 000 грн
Кріплення	100 упаковок по 200 грн	20 000 грн
Монтажні роботи	280 000 грн	280 000 грн
Повна собівартість	-	594 000 грн

2. Кількість усіх осіб, що працює на підприємстві «Олейна» на відкритій території промислових майданчиків складає 50 осіб.

3. Ризик хронічних захворювань на протязі року без встановлення екранів складає 8 % (4 осіб), після встановлення екранів – 3 % (2 особи).

4. Повна продуктивність праці – 50 осіб;

з урахуванням тих, хто захворів – 46 осіб (без екрана), 48 осіб (після встановлення екрана).

5. Прибуток для підприємства від кожного робітника (з відрахуванням заробітної плати) на рік складає 240 000 грн.

6. Прибуток для підприємства за рік від усіх працездатних до встановлення екранів: 46*240 000=11 040 000 грн.

7. Прибуток для підприємства за рік від усіх працездатних після встановлення екранів: 48*240 000=11 520 000 грн.

8. Різниця між прибутками за рахунок зменшення хворіючих:
 $11\,520\,000 - 11\,040\,000 = 480\,000$ грн.
9. Відрахування на прибутковий податок – 22,5 % від прибутку, тобто 108 000 грн, додаткові відрахування – 3 % (14 400 грн).
10. Чистий прибуток підприємства: $480\,000 - 108\,000 - 14\,400 = 357\,600$ грн.
11. Рентабельність виробу – $(357\,600 / 594\,000) * 100\% = 60\%$.
12. Термін окупності встановлення екранів – **1,7** року.

ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ВСТАНОВЛЕННЯ ДВОРІВНЕВОГО УСМОКТУВАЧА

Розрахунки по рентабельності та окупності встановлення усмоктувача в гаражі на підприємстві «Олейна» проведені в наступній послідовності:

1. Підрахунок загальної собівартості встановлення усмоктувача (табл. Б2).

Таблиця Б2 – Кількісні розрахунки собівартості встановлення усмоктувача

Складові собівартості усмоктувача	Вартість
Електродвигун МО315S4 160 кВт 1500 об/хв	98 600 грн
Конструкція дворівневого відсмоктувача з пластикових труб, перехідників	90 120 грн
Корпус	16 000 грн
Монтажні роботи	76 260 грн
Повна собівартість	280 980 грн

2. На території гаража «Олейна», де працює 10 осіб.
3. Ризик хронічних захворювань працівників через рік без усмоктувачів складає 44 %, після встановлення усмоктувача – 20 %.
4. Повна продуктивність – 10 осіб;
 з урахуванням тих, хто захворів – 6 осіб (без усмоктувача), після встановлення усмоктувача – 8 осіб.

5. Прибуток для підприємства від кожного робітника (з відрахуванням заробітної плати) на рік складає 140 000 грн.

6. Прибуток для підприємства за рік від усіх працездатних до встановлення усмоктувача: $6 \cdot 140\,000 = 840\,000$ грн.

7. Прибуток для підприємства за рік від усіх працездатних після встановлення усмоктувача: $8 \cdot 140\,000 = 1\,120\,000$ грн.

8. Різниця між прибутками за рахунок зменшення тих, хто хворіє: $1\,120\,000 - 840\,000 = 280\,000$ грн.

9. Відрахування на прибутковий податок – 22,5 % від прибутку, тобто 63 000 грн, додаткові відрахування – 3 % (8 400 грн).

10. Чистий прибуток підприємства: $280\,000 - 63\,000 - 8\,400 = 208\,600$ грн.

11. Рентабельність виробу: $208\,600 / 280\,980 \cdot 100\% = 74\%$.

12. Термін окупності встановлення усмоктувача: $280\,980 / 208\,600 = 1,3$ року.

**ОЦІНЮВАННЯ СОЦІАЛЬНОЇ ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ
ВИКОРИСТАННЯ ДВОРІВНЕВИХ УСМОКТУВАЧІВ
ПО СТВОРЕННЮ БЕЗПЕЧНИХ УМОВ ПРАЦІ
В ТОВАРИСТВІ «ЛУГОВСЬКЕ»**

Як відомо, оцінювати економічні аспекти з охорони праці необхідно за допомогою методів оцінки соціальної та економічної ефективності заходів по створенню безпечних умов праці, що відповідають чинним нормативним актам з охорони праці. Ефективність заходів можна оцінювати за показниками соціальної ефективності. Дворівневий усмоктувач було встановлено на території сільськогосподарського товариства «Луговське», а саме в гаражі, де проводиться обслуговування та ремонт сільськогосподарської техніки впродовж року.

При оцінці *соціальної ефективності* враховувалися такі показники [142]:

1. Скорочення робочих місць, що не відповідають вимогам нормативних актів з охорони праці [142]:

$$\Delta K = \frac{K_1 - K_2}{K_3} \cdot 100\%, \quad (\text{В.1})$$

де K_1 , K_2 – кількість робочих місць, що не відповідають соціально-гігієнічним вимогам до та після встановлення усмоктувача; K_3 – загальна кількість робочих місць.

$$\Delta K = \frac{10 - 2}{20} \cdot 100\% = 40\%.$$

2. Скорочення чисельності працівників, які працюють в умовах, що не відповідають санітарним нормам [142]:

$$\Delta \mathcal{C} = \frac{\mathcal{C}_1 - \mathcal{C}_2}{\mathcal{C}_3} \cdot 100\%, \quad (\text{B.2})$$

де $\mathcal{C}_1$, $\mathcal{C}_2$ – чисельність працівників, які працюють в умовах, що не відповідають санітарним нормам до та після встановлення усмоктувача; $\mathcal{C}_3$ – річна середньооблікова чисельність працівників, осіб.

$$\Delta \mathcal{C} = \frac{15 - 4}{25} \cdot 100\% = 44\%.$$

3. Скорочення плинності кадрів через несприятливі умови праці [142]:

$$\Delta \mathcal{C}_{II} = \frac{\mathcal{C}_{II1} - \mathcal{C}_{II2}}{\mathcal{C}_3} \cdot 100\%, \quad (\text{B.3})$$

де $\mathcal{C}_{II1}$, $\mathcal{C}_{II2}$ – чисельність працівників, що звільнилися за власним бажанням через несприятливі умови праці до та після встановлення усмоктувача, осіб.

$$\Delta \mathcal{C}_{II} = \frac{6 - 2}{25} \cdot 100\% = 16\%.$$

4. Зменшення кількості машин, що не відповідають вимогам нормативних актів з охорони праці [142]:

$$\Delta M = \frac{M_1 - M_2}{M_3} \cdot 100\%, \quad (\text{B.4})$$

де M_1 , M_2 – кількість машин, що не відповідають нормативним вимогам до та після встановлення усмоктувача, шт.; M_3 – загальна кількість машин, шт.

$$\Delta M = \frac{12 - 6}{20} \cdot 100\% = 30\%.$$

5. Зменшення виробничого травматизму кількості машин, що не відповідають вимогам нормативних актів з охорони праці [142]:

$$\Delta K_{\text{чТ}} = \frac{N_1 - N_2}{\text{Ч}_3} \cdot 100\%, \quad (\text{B.5})$$

де N_1 , N_2 – кількість випадків травматизму до та після встановлення усмоктувача; Ч_3 – річна середньооблікова чисельність працівників, осіб.

$$\Delta K_{\text{чТ}} = \frac{2-1}{25} \cdot 100\% = 4\%$$

6. Зменшення профзахворювання [142]:

$$\Delta K_{\text{чЗ}} = \frac{N_{31} - N_{32}}{\text{Ч}_3} \cdot 100\%, \quad (\text{B.6})$$

де N_{31} , N_{32} – кількість випадків профзахворювання до та після встановлення усмоктувача; Ч_3 – річна середньооблікова чисельність працівників, осіб.

$$\Delta K_{\text{чЗ}} = \frac{4-1}{25} \cdot 100\% = 12\%.$$

7. Зменшення кількості випадків виходу на пенсію внаслідок профзахворювання [142]:

$$\Delta \text{Ч}_{\text{чЗ}} = \frac{\text{Ч}_{31} - \text{Ч}_{32}}{\text{Ч}_3} \cdot 100\%, \quad (\text{B.7})$$

де Ч_{31} , Ч_{32} – кількість працівників, що вийшли на пенсію внаслідок профзахворювання до та після встановлення усмоктувача; Ч_3 – річна середньооблікова чисельність працівників, осіб.

$$\Delta \text{Ч}_{\text{чЗ}} = \frac{2-1}{25} \cdot 100\% = 4\%.$$

Для проведення економічної оцінки заходів з охорони праці за результатами річної економії підприємства від поліпшення умов праці, необхідно враховувати наступні показники [142]:

$$E_P = E_{PT} + E_{PЗ} + E_{ПК} + E_{РПК}, \quad (B.8)$$

де E_{PT} – річна економія від зменшення рівня травматизму (B.9); $E_{PЗ}$ – річна економія від зменшення рівня профзахворюваності (B.9); $E_{ПК}$ – річна економія від зниження плинності кадрів (B.15); $E_{РПК}$ – річна економія від скорочення пільг та компенсацій за роботу в несприятливих умовах (B.16).

8. Річна економія від зменшення рівня травматизму E_{PT} (профзахворюваності $E_{PЗ}$) розраховується за формулою [142]:

$$E_{PT}(E_{PЗ}) = E_З + E_C + E_{CC}, \quad (B.9)$$

де $E_З$ – річна економія зарплати за рахунок зростання продуктивності праці при зменшенні рівня травматизму (профзахворюваності) (B.10); E_C – річна економія на собівартості продукції за рахунок зменшення умовно-постійних витрат (B.13); E_{CC} – річна економія за рахунок зменшення коштів на виплату допомоги по тимчасовій непрацездатності (B.14).

Річна економія зарплати за рахунок зростання продуктивності праці при зменшенні рівня травматизму (профзахворюваності) розраховується за формулою:

$$E_З = \Delta W \cdot З_p \cdot Ч_{cp} / Ч_{П1}, \quad (B.10)$$

де ΔW – зростання продуктивності праці (B.11); $З_p$ – середньорічна заробітна плата одного працівника з відрахуванням на соцстрахування; $Ч_{cp}$ – середньорічна чисельність промислово-виробничого персоналу; $Ч_{П1}$ – постійна кількість працюючих відповідно до і після встановлення усмоктувача.

Зростання продуктивності праці розраховується за формулою [142]:

$$\Delta W = \frac{\Delta D \cdot Z_{\text{в}}}{P_{\text{П}}} \cdot 100\%, \quad (\text{B.11})$$

де ΔD – скорочення витрат робочого часу за рахунок зменшення рівня травматизму (захворюваності) за певний час (B.12); $Z_{\text{в}}$ – вартість продукції, вироблену за зміну одним працівником; $P_{\text{П}}$ – вартість річної товарної продукції підприємства.

Скорочення витрат робочого часу за рахунок зменшення рівня травматизму (захворюваності) за певний час розраховується за формулою [142]:

$$\Delta D = (D_1 - D_2) \cdot \chi_3 / \chi_{\text{П1}}, \quad (\text{B.12})$$

де D_1, D_2 – кількість днів непрацездатності через травматизм (захворюваність), що припадають на $\chi_{\text{П1}}$ постійно працюючих відповідно до і після встановлення усмоктувача; χ_3 – річна середньооблікова чисельність працівників.

Згідно формул (B.10–B.12) маємо наступні значення величин: $\chi_3 = 25$ робітників; $\Delta D = (60 - 30) \cdot 25 / 20 = 37,5$ днів; $P_{\text{П}} = 18$ тис т · 5 тис грн. = 90 млн. грн.; $Z_{\text{в}} = 7 \text{ т} \cdot 5 \text{ тис грн./т} = 35$ тис грн.; $\Delta W = 37,5 \text{ днів} \cdot 35 \text{ тис грн./} 90 \text{ млн. грн.} = 1,46$; $Z_p = 15$ тис грн; $\chi_{\text{ср}} = 25$ чоловік;

$$E_3 = 1,46 \cdot 15 \text{ тис грн.} \cdot 25 \text{ чол} / 20 = 27 \, 375 \text{ грн.}$$

Річна економія на собівартості продукції за рахунок зменшення умовно-постійних витрат розраховується за формулою [142]:

$$E_C = \chi \cdot \Delta D \cdot Z_{\text{в}} / P_{\text{П}}, \quad (\text{B.13})$$

де U – умовно-постійні витрати у виробничій собівартості річного обсягу товарної продукції.

$$E_C = 405 \text{ тис грн.} \cdot 37,5 \cdot 35 \text{ тис грн.} / 90 \text{ млн. грн.} = 5\,906 \text{ грн.}$$

Річна економія за рахунок зменшення коштів на виплату допомоги по тимчасовій непрацездатності [142]:

$$E_{CC} = \Delta D \cdot \Pi_{\partial}, \quad (\text{B.14})$$

де Π_{∂} – середньоденна сума допомоги по тимчасовій непрацездатності.

$$E_{CC} = 37,5 \cdot 300 = 11\,250 \text{ грн.},$$

$$E_{PT} = 27\,375 + 5\,906 + 11\,250 = 44\,531 \text{ грн.}$$

Аналогічні розрахунки по профзахворюваності складають:

$$E_{PZ} = 89\,062 \text{ грн.}$$

9. Річна економія від зменшення плинності кадрів розраховується за формулою [142]:

$$E_{PK} = (C_{31} - C_{32}) \cdot D_{\Pi} \cdot Z_B, \quad (\text{B.15})$$

де C_{31} , C_{32} – кількість працівників, що звільнилися за власним бажанням через несприятливі умови праці відповідно до і після встановлення усмоктувача; D_{Π} – середня тривалість перерви в роботі звільненого при переході з одного підприємства на інше; Z_B – середньоденна вартість виробленої продукції на одного працівника.

$$E_{PK} = 70\,000 \text{ грн.}$$

10. Річна (загальна) економія від скорочення пільг та компенсацій за роботу в несприятливих умовах враховує багато складових, але для даного

підприємства є реально дійсним $E_{ТС}$ – економія фонду заробітної плати у зв'язку зі скороченням чисельності працівників, що мають право на підвищення тарифу за роботу в важких та шкідливих умовах праці.

$$E_{РПК} = E_{ТС} = 50 \text{ тис грн.} \quad (B.16)$$

Річна економія підприємства від поліпшення умов праці:

$$E_P = 44\,531 + 89\,062 + 70\,000 + 50\,000 = 253\,593 \text{ грн.}$$

Річний економічний ефект від здійснення заходів покращення умов та охорони праці визначається за формуло:

$$E = E_P - B, \quad (B.17)$$

де B – поточні і капітальні витрати на впровадження заходів з охорони праці, грн/рік; $E = 253\,593 - 280\,980 = -27\,387$ грн.

Загальна (абсолютна) економічна ефективність витрат на заходи з охорони праці:

$$E_B = \frac{E_P}{B} = \frac{253\,593}{280\,980} = 0,9. \quad (B.18)$$

Термін окупності витрат на охорону праці, величина обернена до коефіцієнта ефективності:

$$T = \frac{B}{E_P} = \frac{1}{0,9} = 1,1 \text{ року.} \quad (B.19)$$

Директор товариства «ЛУГОВСЬКЕ»



Ковальчук Л. М.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ***Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації****Статті в наукових фахових виданнях України*

1. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Исследование техногенного влияния на окружающую среду газовых выбросов Приднепровской ТЭС. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Механіка*. 2016. Вип. 20, т. 24, № 5. С. 53–60. ISSN 2312–2897.
2. Беляев Н. Н., Русакова Т. И., Колесник В. Е., Павличенко А. В. Прогноз уровня загрязнения атмосферного воздуха в зоне влияния городских автомагистралей. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2016. №1. С. 90–97. ISSN 2071-2227 (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).
3. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Информационная система оценки уровня загрязнения воздушной среды выбросами горно-обогатительного комбината. *Геотехнічна механіка: Міжвідомчий збірник наукових праць*. 2017. Вип. 135. С. 149–159. ISSN 1607-4556.
4. 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.
5. 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.
6. Беляев Н. Н., Русакова Т. И., Якубовська З. Н. Численное моделирование процессов массопереноса при нейтрализации сточных вод. *Науковий вісник будівництва*. 2017. Т. 87, №1. С. 159–165. ISSN 2311-7257.

7. Біляєв 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.

8. 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).

9. 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.

10. Біляєв 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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).

14. 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.

15. 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*).

16. 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.

17. 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.

18. Біляєв 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/crpnmu/57.158.

19. 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.

20. 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*).

21. 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).

22. 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).

Стаття у зарубіжному науковому періодичному виданні:

23. Biliaiev N. N., 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 1. P. 28–35.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

24. 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 : Филиал КузГТУ, 2014. С. 330–333.

25. 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 : изд-во Мордов. ун-та, 2015. С. 374–377.

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. Русакова Т. И. Математичне моделювання розсіювання в атмосфері викидів підземної виробки. *Інформаційні технології в освіті, техніці та*

промисловості: матер. II Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених і студентів, 6-9 жовтня 2015 р. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2015. С. 212–213.

28. Rusakova T., Biliaiev M. Mathematical modeling of air pollution on the streets of city. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем*: Матер. I Всеукр. наук.-техн. конф., 3-5 листопада 2015 р. Дніпропетровськ: УДХТУ, 2015. С. 17–20.

29. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Оценка уровня экологической безопасности атмосферного воздуха при чрезвычайных ситуациях. *Экология и защита окружающей среды*: Сб. тезисов докл. III Междунар. научно-практ. конф., 19 мая 2016 г. Минск: БГУ, 2016. С. 231–235.

30. 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.

31. Biliaiev M., Rusakova T. Mathematical modeling of diffusion emissions of thermal power. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем*: матер. II Всеукр. науково-техні. конф. з міжнар. участю, 1-3 листопада 2016 р. Дніпропетровськ: УДХТУ, 2016. С. 18–20.

32. 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 докладов X Междунар. научно-практ. конф., 14-15 декабря 2016 г. Днепропетровск: ДНУЖТ, 2016. С. 91–92.

33. Rusakova T. Mathematical modeling of thin profile in a flow of an inviscid fluid. *Информационные технологии в металлургии и машиностроении*: матер. Междунар. науково-техн. конф., 28-30 марта 2017 г. Дніпропетровськ: НМА, 2017. С. 73.

34. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Моделирование нейтрализации сточных вод. *Неделя эколога – 2017*: докл. Междунар. научн. симп-ма, 10-13 апреля 2017 г. Каменское: ДГТУ, 2017. С. 47–48.

35. Біляєв М. М., Русакова Т. І. Математичне моделювання процесів переносу забруднюючих речовин в промислових зонах міста. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем*: матер. III Міжнар. науково-техн. конф., 1-3 листопада 2017 р. Дніпропетровськ: УДХТУ, 2017. С. 27–29.

36. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Прогнозирование экологического состояния атмосферного воздуха в зоне промышленных предприятий. *Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств*: тези допов. VI Міждунар. наук.-практ. конф., 29-30 листопада 2017 р. Дніпро: ДНУЗТ, 2017. С. 19–20.

37. 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.

38. Біляєв М. М., Русакова Т. І. Оцінка техногенного стану атмосферного повітря в містах. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ITMM'2018*: тези допов. десятої Міжнар. наук.-практ. конф., 27-29 березня 2018 р. Дніпро: НМетАУ, 2018. С. 52.

39. 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., 15-16 травня 2018 р. Черкаси: НУЦЗУ, 2018. С. 149–150.

40. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Метод прогнозирования экологически безопасного состояния атмосферного воздуха выбросами приземных источников загрязнения. *Экология и защита окружающей среды*: тезисы докладов IV Междунар. научно-практ. конф., 16-17 мая 2018 г. Минск: БГУ, 2018. С. 140–144.

41. 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.

42. Біляєв М. М., Русакова Т. І. Математичне моделювання процесу нейтралізації оксиду вуглецю у вихлопних газах автотранспорту. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем*: матер. IV Міжнар. наук.-техн. конф., 1-2 листопада 2018 р. Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2018. С. 32–35.

43. 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: ЗНТУ, 2018. С. 193–195.

44. 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 освіті*: тези допов. XII Міжнар. наук.-практ. конф., 12-13 грудня 2018 р. Дніпро: ДНУЗТ, 2018. С. 87.

45. Берлов О. В., Калашніков І. В., Кіріченко П. С., Козачина В. А., Русакова Т. І. Прогнозування рівня забруднення атмосфери на базі чисельної моделі. *Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference «International Trends in Science and Technology»*, 30 April 2019, Warsaw, Poland, 2019. P. 41–44.

46. Русакова Т. И. Оценка показателя загрязнения промышленных площадок. *Экология и защита окружающей среды*: тезисы докл. Междунар. научно-практ. конф., 15 мая 2019 г. Минск: БГУ, 2019. С. 11–15.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

47. Русакова Т. И. Исследование структуры ветрового потока на улицах города. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2014. Вип. 44. С. 146–152.

48. Русакова Т. И., Беляев Н.Н. Оценка ветрового режима при обтекании зданий. *Архітектурний вісник Київського національного університету будівництва і архітектури*. 2014. Вып. 4. С. 177–186.

49. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Математическое моделирование процесса вентиляции тупиковой подземной выработки. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2015. Вып. 47. С. 35–41.

50. Русакова Т. И. Исследование закономерностей обтекания зданий воздушным потоком. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2015. Вип. 49. С. 224–230.

51. 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. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Google Scholar)

52. 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.