

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

В. Б. Мокін, Г. В. Горячев, Д. Ю. Дзюняк

**ІНФОРМАЦІЙНА ГІС-ІНТЕГРОВАНА ТЕХНОЛОГІЯ
ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИКИДІВ РЕЧОВИН
ЗА ДАНИМИ ОПЕРАТИВНОГО МОНІТОРИНГУ
ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2018

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/403>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

УДК 004.942+504.3.054

М74

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 5 від 19.12.2017 р.).

Рецензенти:

Є. О. Яковлєв, доктор технічних наук, професор

О. В. Бісікало, доктор технічних наук, професор

Мокін, В. Б.

М74 Інформаційна ГІС-інтегрована технологія оцінювання параметрів викидів речовин за даними оперативного моніторингу забруднення атмосферного повітря : монографія / В. Б. Мокін, Г. В. Горячев, Д. Ю. Дзюняк. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 100 с.

ISBN 978-966-641-741-4

В монографії розв'язано актуальну науково-прикладну задачу підвищення точності та ефективності оцінювання параметрів викидів забруднюючих речовин за даними оперативного моніторингу шляхом створення інформаційної ГІС-інтегрованої технології, що дозволяє підвищити ефективність системи екологічного контролю стаціонарних та пересувних джерел цих викидів.

Розрахована на наукових працівників і фахівців у сфері інформаційних технологій та охорони навколишнього повітряного середовища, а також може бути корисною студентам та аспірантам ВНЗ у цій же сфері.

УДК 004.942+504.3.054

ISBN 978-966-641-741-4

© В. Мокін, Г. Горячев, Д. Дзюняк, 2018

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/403>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ ТА МЕТОДІВ І МОДЕЛЕЙ, ПОКЛАДЕНИХ В ЇХ ОСНОВУ	9
1.1 Проблематика забруднення атмосферного повітря та огляд параметрів викидів забруднюючих речовин.....	9
1.2 Аналіз існуючих моделей розсіювання забруднюючих речовин в атмосферному повітрі	12
1.2.1 Емпірично-статистичні моделі поширення забруднюючих речовин в атмосферному повітрі	13
1.2.2 Авторегресійні моделі поширення забруднюючих речовин в атмосферному повітрі	19
1.2.3 Турбулентно-дифузійні моделі поширення забруднення в атмосферному повітрі	19
1.3 Огляд існуючих інформаційних систем і технологій для розрахунку поширення забруднюючих речовин в атмосферному повітрі	20
1.3.1 Методика ОНД-86 для розрахунку концентрацій шкідливих речовин в атмосферному повітрі.....	21
1.3.2 Модель поширення забруднюючих речовин в атмосферному повітрі «TAPM».....	22
1.3.3 Система моделювання розсіювання речовин в атмосферному повітрі «SILAM»	23
1.4 Висновки до розділу 1.....	25
Розділ 2 РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛЕЙ ДИНАМІКИ ПОШИРЕННЯ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРНОМУ ПОВІТРІ	26
2.1 Розроблення методу оцінювання параметрів стаціонарних джерел понаднормативних викидів на основі нечіткої бази знань	26
2.2 Розроблення методу оцінювання параметрів стаціонарного джерела викиду на основі математичної моделі Гаусса.....	33
2.3 Удосконалення технології оцінювання параметрів викидів речовин за рахунок використання у моделях просторових даних	39
2.4 Створення методу оцінювання середньої швидкості руху транспортних засобів на основі нечіткої бази знань	41

2.4.1 Побудова математичної моделі руху транспортних засобів за даними моніторингу їх параметрів	41
2.4.2 Створення методу оцінювання середньої швидкості руху транспортних засобів на основі нечіткої бази знань	44
2.5 Висновки до розділу 2.....	46
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО МОНІТОРИНГУ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В КОМПЛЕКСІ З ДАНИМИ ПРО ДЖЕРЕЛА ЦЬОГО ЗАБРУДНЕННЯ	48
3.1 Створення інформаційно-вимірювальної системи для оперативного моніторингу забруднення атмосферного повітря в комплексі з даними про джерела цього забруднення	48
3.2 Розроблення універсальної інформаційно-вимірювальної мобільної системи для оперативного моніторингу забруднення атмосферного повітря	52
3.2.1 Розроблення методики проектування універсальної інформаційно-вимірювальної мобільної системи для моніторингу стану забруднення атмосферного повітря	53
3.2.2 Створення методу оцінювання параметрів джерел забруднення атмосферного повітря викидами пересувних джерел за даними їх оперативного моніторингу	56
3.2.3 Приклад створення ІВС за запропонованою методикою.....	59
3.3 Висновки до розділу 3.....	63
РОЗДІЛ 4 СТВОРЕННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ НА ОСНОВІ РОЗРОБЛЕНИХ МОДЕЛЕЙ, МЕТОДІВ ТА СИСТЕМ	64
4.1 Розроблення архітектури інформаційної технології моделювання викидів стаціонарних та пересувних джерел в атмосферне повітря за даними їх оперативного моніторингу.....	64
4.2 Розроблення програмного модуля на Java для розрахунку динаміки забруднюючих речовин.....	65
4.2.1 Розроблення веб-інтерфейсу для розрахунку розсіювання забруднюючих речовин від стаціонарних джерел із використанням технології Google Web Toolkit.....	66

4.3 Розроблення веб-сервісу ранжування параметрів викидів від стаціонарних джерел з використанням нечітких експертних оцінок	69
4.4 Оцінювання параметрів викидів пересувних джерел викидів та моделювання стану забруднення атмосферного повітря м. Вінниці за допомогою розробленої інформаційно-вимірювальної системи для оперативного моніторингу	72
4.5 Застосування методу оцінювання параметрів стаціонарних джерел понаднормативних викидів на основі нечіткої бази знань на прикладі житлово-індустріального мікрорайону міста	75
4.6 Концепція створення єдиної системи моделювання поширення викидів від стаціонарних джерел у повітря України з використанням ГІС-інтегрованої системи бази даних і моделей	78
4.7 Визначення ефективності запропонованої інформаційної технології	81
4.8 Висновки до розділу 4	82
ВИСНОВКИ	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	87
Додаток А Математичний апарат методу оцінювання параметрів стаціонарного джерела викиду забруднюючої речовини на основі моделі Гаусса для різних показників ефективної висоти цього викиду	97

ВСТУП

Однією з найважливіших проблем сьогодення є забруднення приземного шару атмосфери викидами антропогенного характеру. Викиди стаціонарних та пересувних джерел призводять до накопичення шкідливих для здоров'я людини речовин у містах та промислових регіонах України. Лише у Києві викиди автомобільного транспорту становлять близько 110 тис. тон шкідливих речовин на рік. Результатом цього є погіршення стану довкілля і, як наслідок, хронічні та гострі форми респіраторних хвороб та інші види захворювань. Для вирішення цієї проблеми необхідно вживати різних заходів, але вони потребують належного наукового обґрунтування, в першу чергу, шляхом моделювання процесів розсіювання шкідливих речовин у приземному шарі атмосфери.

Моделюванням та прогнозуванням забруднення атмосферного повітря займається багато наукових шкіл у різних країнах вже десятки років. Серед найбільш поширених моделей можна виділити такі: Гаусса, SOSE, TAPM, «ОНД-86», SILAM. Оскільки найбільш дієвими є адресні заходи (введення лімітів на викиди, встановлення очисних споруд та ін.), то найбільшу цінність для вирішення цієї проблеми мають моделі, для розрахунку яких потрібні дані локального оперативного моніторингу атмосферного повітря. Найбільш поширеними серед яких в Україні є європейська модель Гаусса та модель радянської методики «ОНД-86».

Проблематика моделювання процесів забруднення атмосферного повітря відображена у роботах таких вчених як: М. М. Беляєв, М. Е. Берлянд, В. М. Боголюбов, М. П. Боцула, Н. С. Бузало, Г. В. Горячев, О. В. Громова, С. О. Довгий, Замай С. С., Ковальчук В. І., Крижановський Є. М., Лебідь О. Г., Луканин В. М., Мокін В. Б., Семчук Ю. С., Скоб Ю. А., Скопецкий В. В., Сонькин Л. Р., Стеклогоров Е. Б., Хрущ В. К., Щербань О. Н., Яковлев Є. О., Sofiev M., Chaudhryl V., Hurley P., Juan S., Papadopoulos A., Al-Dahoud A., Pelliccioni A., Peter F. Nelson та ін. [1–5, 56–81]. Проте, виникає технологічний розрив між математичними моделями, які детально описують процеси розсіювання в атмосфері та засобами для вимірювання, що часто використовують досить усереднені дані, і тим самим нівелюють досить високу адекватність моделей. Часто відсутні

достовірні дані, навіть про самі параметри викидів (концентрація та швидкість потоку забруднюючих речовин в гирлі стаціонарного джерела викиду, його геометричні параметри та ін.), особливо під час пошуку незареєстрованих джерел викидів та під час громадського екологічного контролю. Якщо ж використати сучасні мобільні пристрої та програмно-інформаційні засоби оперативного моніторингу (безпілотні літальні апарати з приладами експрес-аналізу, дані геопорталів та метеорологічних веб-сервісів та ін.) та експертні дані, тоді, за рахунок розвитку технології оброблення таких даних, можна було б підвищити точність та ефективність оцінювання параметрів викидів речовин та, в цілому, точність та ефективність моделювання процесів забруднення атмосферного повітря.

Отже, необхідність розробки нової інформаційної технології оцінювання параметрів викидів речовин за даними оперативного моніторингу забруднення атмосферного повітря з урахуванням сучасних програмно-технічних засобів є актуальною.

В книзі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу підвищення точності та ефективності оцінювання параметрів викидів забруднюючих речовин за даними оперативного моніторингу шляхом створення інформаційної технології, що дозволяє підвищити ефективність системи екологічного контролю стаціонарних та пересувних джерел цих викидів, Результати дослідження опубліковано у роботах [6–23].

Практична цінність одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Запропоновано схему універсальної інформаційно-виміральної мобільної системи для оперативного моніторингу даних про стан забруднення атмосферного повітря з використанням мобільних пристроїв, встановлених на транспортні засоби, яку можна швидко адаптувати під задані умови та показники стану довкілля і фактори його забруднення, що дозволяє підвищити точність та достовірність даних спостережень стану атмосферного повітря за заданими показниками та оцінювати параметри пересувних джерел викидів і транспортної інфраструктури на заданих ділянках доріг міста. Запропоновано та продемонстровано яким чином можна оцінювати обсяг викидів транспортних засобів заданими забруднюючими речовинами пропорційно до їх спеціальним чином приведеної кількості на заданих перегонах вулиць, розташованих між світлофорами.

2. Створено веб-сервіси (<http://source-identification.appspot.com>) для автоматизації процесу оцінювання параметрів джерел понаднормативних викидів на основі нечіткої бази знань з візуалізацією результатів у Google Maps з використанням запропонованого у роботі методу та інформаційної технології.

Книга містить чотири розділи.

У першому розділі проведено аналіз існуючих інформаційних технологій оцінювання параметрів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря та методів і моделей, покладених в їх основу.

У другому розділі розроблено методи оцінювання параметрів моделей динаміки поширення речовин в атмосферному повітрі.

У третьому розділі розроблено схему інформаційно-виміральної системи (ІВС) та методику її побудови для оперативного прямого оцінювання параметрів забруднення атмосферного повітря.

В четвертому розділі описано створення та випробування інформаційної технології на основі розроблених моделей, методів та інформаційної системи оперативного моніторингу.

Текст книги написаний, переважно, Д. Ю. Дзюняком з матеріалів його кандидатської дисертації, де використано результати наукових досліджень д. т. н., професора В. Б. Мокіна, який був його науковим керівником протягом 2016–2017 рр., та к. т. н., доцента Г. В. Горячева, який був його науковим керівником протягом 2012–2015 рр.

Відзиви, зауваження і побажання просимо надсилати за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, кафедра системного аналізу, комп'ютерного моніторингу та інженерної графіки Вінницького національного технічного університету.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ ТА МЕТОДІВ І МОДЕЛЕЙ, ПОКЛАДЕНИХ В ЇХ ОСНОВУ

1.1 Проблематика забруднення атмосферного повітря та огляд параметрів викидів забруднюючих речовин

Забруднення атмосферного повітря є актуальною проблемою сьогодення. Причому причиною цього є антропогенні джерела викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря. Їх традиційно ділять на два типи: стаціонарні джерела викидів (СДВ) та пересувні джерела.

Проблема викидів від пересувних джерел забруднення (в першу чергу від автомобільного транспорту) надзвичайно відчутна в містах з високою щільністю населення та високим рівнем розвитку. Забруднюючі речовини (ЗР), що містяться у вихлопних газах (табл. 1.1), за певних метеорологічних умов утворюють смог та значно впливають на здоров'я населення, викликаючи гострі та хронічні захворювання верхніх дихальних шляхів та ін.

Таблиця 1.1 Склад вихлопних газів двигунів внутрішнього згорання [24]

	Бензинові двигуни	Дизельні двигуни
Азот N ₂ , %	74–77	76–78
Кисень O ₂ , %	0,3–8,0	2,0–18,0
Вода H ₂ O (пара), %	3,0–5,5	0,5–4,0
Вуглекислий газ CO ₂ , %	0,0–16,0	1,0–10,0
Монооксид вуглецю CO, %	0,1–5,0	0,01–0,5
Оксиди азоту NO _x , %	0,0–0,8	0,0002–0,5
Вуглеводні C _n H _m , %	0,2–3,0	0,09–0,5
Альдегіди, %	0,0–0,2	0,001–0,009
Сажа, г/м ³	0,0–0,04	0,01–1,10
Бензопірен-3,4, г/м ³	10–20·10 ⁻⁶	10·10 ⁻⁶

Для здійснення моніторингу за викидами від автомобільного транспорту необхідно мати технологічно розвинену комп'ютеризовану

«он-лайн» систему оцінювання параметрів потоку транспортних засобів (рис. 1.1):

- типи транспортних засобів (типи двигунів та їх характеристики, габаритні розміри автомобілів);
- концентрацію забруднюючих речовин у повітрі над автомобільною дорогою;
- швидкість руху транспортного потоку.



Рисунок 1.1 – Основні параметри пересувних джерел викидів

При цьому слід постійно розвивати методи та засоби для водночас більш точного та більш ефективного моніторингу викидів автомобільного транспорту.

Стационарне джерело викиду – це підприємство, цех, фабрика або інший нерухомий об’єкт, що зберігає свої просторові координати протягом певного часу і здійснює викиди забруднюючих речовин у атмосферне повітря. В результаті цього утворюється велике різноманіття забруднюючих речовин (зокрема: CO_x , SO_x , NO_x , O_3 , Pb, пил, зола, сажа), які потрапляють та поширюються у нижніх та верхніх шарах атмосфери. Окрім природних факторів, які впливають на розсіювання викидів від СДВ (погодні умови – температура, вологість, кількість сонячної радіації, хмарність та ін.) можна виділити такі параметри стаціонарних джерел викидів:

- географічне розміщення джерела викиду;
- проектно-технічні параметри – висота (h) та діаметр (d) труби, температура (T) і швидкість газів (V_s), що виходять із гирла труби,

концентрація забруднюючих речовин у місці викиду (C), обсяг викиду ЗР (Q) (рис. 1.2).

Всі ці параметри є важливими для проведення якісного та точного моделювання забруднення атмосфери від стаціонарних джерел викидів.

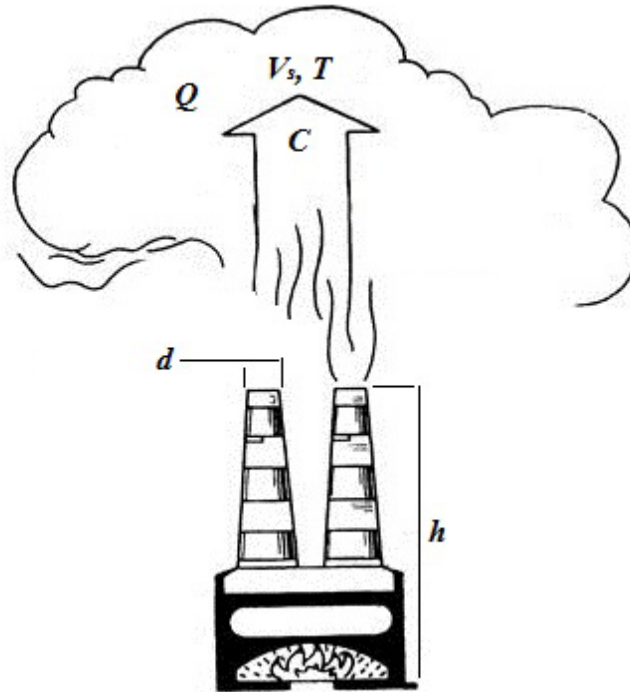


Рисунок 1.2 – Основні параметри стаціонарних джерел викидів

Норми викидів забруднюючих речовин та їх сумішей в атмосферне повітря від стаціонарного джерела викиду регулюються Законами України «Про охорону атмосферного повітря», «Про охорону навколишнього природного середовища» та іншими нормативно-правовими актами. Видачу дозволів на викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря здійснює Державна екологічна Інспекція України.

Розглянемо ситуацію, коли система державного моніторингу фіксує на посту спостереження перевищення гранично допустимих концентрацій забруднюючих речовин у повітрі. Держекоінспекція повинна виявити причини цього зафіксованого перевищення гранично допустимої концентрації (ГДК). При цьому екоінспектори можуть використовувати такі технології оцінювання параметрів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря: технологію експертної оцінки (з урахуванням досвіду екоінспектора), прилади дистанційного оціню-

вання геометричних розмірів об'єктів (безконтактні оптичні та лазерні прилади контролю) та ін. При цьому, необхідно перевірити джерела викидів, як правило на досить великій території навколо поста спостережень, а це означає перевірити до 50 потенційних підприємств та приватних домоволодінь.

Крім того, система державного моніторингу володіє відносно невеликою кількістю стаціонарних постів спостереження, нерідко із застарілим обладнанням, що знижує ефективність проведення досліджень. Методики та періодичність виконання досліджень часто не відповідають стану розвитку сучасної інфраструктури та завантаженості міст.

За цих умов актуальним є створення технології, що дозволить більш точно, швидко та ефективно оцінити параметри джерел викидів та здійснити ранжування ДВ за впливом на даний пост вимірювання. При цьому важливо оцінити вплив пересувних джерел викидів, оскільки державна система моніторингу фіксує вплив пересувних і стаціонарних ДВ разом.

Саме тому підвищення точності та ефективності оцінювання параметрів викидів речовин за даними оперативного моніторингу шляхом створення інформаційної технології є актуальним.

1.2 Аналіз існуючих моделей розсіювання забруднюючих речовин в атмосферному повітрі

Визначення видів репрезентативних параметрів джерел викидів, в першу чергу, залежить від моделей розсіювання забруднюючих речовин в атмосферному повітрі, для яких слід знати ці параметри. Проведемо аналіз таких моделей.

Для моделювання розсіювання забруднюючих речовин в атмосферному повітрі враховують параметри джерел забруднення та характеристики процесу перенесення хімічних речовин в атмосфері, динаміку хімічних реакцій різних хімічних сполук між собою, характер підстилкової поверхні та метеорологічні умови тощо. Чим точнішими є усі ці дані, тим точнішими будуть результати моделювання. Однак, як було зазначено у підрозділі 1.1, не всі ці дані можуть бути зібрані або бути достовірними.

Отже, вибір моделей для опису розсіювання забруднюючих речовин в атмосферному повітрі повинен враховувати як умови задачі, так і обсяг наявних достовірних вхідних даних для її розв'язання.

Моделі розсіювання забруднюючих речовин в атмосферному повітрі розділяють на такі [2–4, 24–47]:

1. Емпірично-статистичні (модель Гаусса та ін.).
 2. Статистичні (регресійні та ін.).
 3. Моделі турбулентної дифузії (моделі математичної фізики).
- Охарактеризуємо їх детальніше.

Найбільш поширеними на практиці класами моделей розсіювання забруднюючих речовин в атмосферному повітрі є клас емпірично-статистичних та клас статистичних моделей, для використання яких необхідні метеорологічні параметри та характеристики рельєфу місцевості. Статистичні моделі розподіляються на регресійні та авторегресійні і, зазвичай, використовуються для розрахунків середнього ступеня забруднення атмосфери.

1.2.1 Емпірично-статистичні моделі поширення забруднюючих речовин в атмосферному повітрі

Емпірично-статистичні моделі є максимально спрощеними і не можуть забезпечити необхідну точність оцінювання якості атмосферного повітря. Проте, вони можуть бути використані для аналізу середньорічного забруднення повітряного середовища міста і можуть вказати на необхідність або доцільність більш точного подальшого оцінювання екологічного ризику забруднення атмосфери даної території.

Однією із найбільш поширених у світі серед цих моделей є модель розсіювання забруднюючих речовин Гаусса [25, 27, 28, 30].

Відповідно до неї приземна концентрація на осі факела визначається за формулою [28]

$$C(x, y, z) = \frac{QKV}{2\pi \cdot u_s \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp\left(-0.5 \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right), \quad (1.1)$$

де $C(x, y, z)$ – концентрація забруднюючої речовини, що викидається в точці з координатами x, y, z , мкг/м³; Q – обсяг викиду речовини, г/с; K – коефіцієнт перерахунку – $1 \cdot 10^6$; V – вертикальні умови розсіювання; u_s – швидкість вітру на ефективній висоті джерела викидів, м/с; σ_y – стандартне відхилення розсіювання по горизонталі, м; σ_z – стан-

дартне відхилення розсіювання по вертикалі, м; y – бокове відхилення від осі факела, м.

Розміри зони токсичної небезпеки при викидах шкідливих речовин залежать як від потужності викиду, так і від характеристик атмосферного перенесення, перш за все, від швидкості вітру і від категорії (класу) стійкості (стабільності) атмосфери [48].

Швидкість вітру на ефективній висоті джерела викидів розраховується за такою формулою [28]:

$$u_s = u_{ref} \left(\frac{h_s}{z_{ref}} \right)^p, \quad (1.2)$$

де h_s – висота джерела викидів, м; u_{ref} – приземна швидкість вітру, м/с; z_{ref} – висота заміру приземної швидкості вітру (зазвичай 10 м), м; p – поправочний коефіцієнт (вибирається з таблиці).

В табл. 1.2 наведено коефіцієнт p для різних місцевостей.

Таблиця 1.2 – Коефіцієнти p для сільської і міської місцевостей [48]

Класи стабільності атмосфери	p для сільської місцевості	p для міської місцевості
A	0,07	0,15
B	0,07	0,15
C	0,10	0,20
D	0,15	0,25
E	0,35	0,30
F	0,35	0,30

Класи стабільності атмосфери розрізняються, в основному, інтенсивністю вертикального перемішування повітря. Найбільш нестійкий клас «А» спостерігається при слабкому вітрі і сильній сонячній радіації, коли повітря, нагріте теплом від земної поверхні, підіймається догори. Зазвичай, цей стан виникає пополудні або дещо раніше [48].

Клас «С» спостерігається при посиленні вітру від помірного до сильного і частіше всього увечері при ясному небі або вдень при низьких купчастих хмарах, а також літніми ясними днями. Нейтральний клас «D» відповідає умовам суцільної хмарності як вдень, так і вночі, коли вплив прямого сонячного випромінювання є незначним. Стійкі

класи «Е» і «F» фіксують звичайно вночі при чистому небі або слабкій хмарності [48].

Стабільність атмосфери підвищується зі зростанням швидкості вітру і зниженням інтенсивності сонячного випромінювання. Хмарність впливає по-різному. Вночі її зниження посилює охолодження Землі, а вдень – навпаки. В табл. 1.3 наведено класи стабільності атмосфери по Песквіллу.

Таблиця 1.3 – Класи стабільності атмосфери по Песквіллу [48]

Швидкість вітру, м/с	Денний час. Рівень сонячного опромінення			Нічний час. Хмарність	
	Сильний	Середній	Слабкий	>50 %	<50 %
<2	A	A-B	B	E	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Розрахунок σ_y проводиться за формулою [28]:

$$\sigma_y = 456,11628 \cdot x \cdot \operatorname{tg}\{0,017453293[c - d \cdot \ln(x)]\}, \quad (1.3)$$

де c, d – числові коефіцієнти з табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Значення коефіцієнтів c і d [48]

Класи стабільності атмосфери	Коефіцієнт c	Коефіцієнт d
A	24,1670	2,5334
B	18,3330	1,8096
C	12,5000	1,0857
D	8,3330	0,72383
E	6,2500	0,54287
F	4,1667	0,36191

Розрахунок σ_z проводиться за формулою [28]:

$$\sigma_z = ax^b, \quad (1.4)$$

де a, b – числові коефіцієнти із табл. 1.5.

Таблиця 1.5 – Значення коефіцієнтів a і b [48]

Класи стабільності атмосфери	x (км)	Коефіцієнт a	Коефіцієнт b
А	<0,1	122,8	0,9447
	0,1–0,15	158,08	1,0542
	0,16–0,2	170,22	1,0932
	0,2–0,25	179,52	1,1262
	0,26–0,3	217,41	1,2644
	0,31–0,4	258,89	1,4094
	0,41–0,5	346,75	1,7283
В	3,01–10	33,504	0,60486
	10,01–30	36,650	0,56589
	>32	44,053	0,51179
С	<0,1	22,26	0,8366
	0,1–0,3	23,331	0,81956
	0,31–1	21,628	0,7566
	1,01–2	21,628	0,63077
С	2,1–4	22,534	0,57154
	4,01–10	24,703	0,0527
	10,01–20	26,97	0,46713
D	<0,2	15,209	0,81558
	0,21–0,7	14,457	0,78407
	0,71–1	13,953	0,68465
	1,01–2	13,953	0,63227
	2,01–3	14,823	0,54503
	3,01–7	16,187	0,4649
	7,01–15	17,836	0,41507
	15,01–30	22,651	0,32681
	30,01–60	27,074	0,27436
	>60	34,219	0,21716

Розрахунок вертикальних умов розсіювання V здійснюється за такою формулою [28]:

$$V = \exp\left(-0,5 \frac{(z-h_e)^2}{\partial_z^2}\right) + \exp\left(-0,5 \frac{(z+h_e)^2}{\partial_z^2}\right) + \sum_{m=1}^{\infty} \left[\exp\left(-0,5 \frac{H_1^2}{\partial_z^2}\right) + \exp\left(-0,5 \frac{H_2^2}{\partial_z^2}\right) + \exp\left(-0,5 \frac{H_3^2}{\partial_z^2}\right) + \exp\left(-0,5 \frac{H_4^2}{\partial_z^2}\right) \right], \quad (1.5)$$

а за умови, що характер підстилкової поверхні представляє собою рівнинну місцевість міського або сільського типу, тоді (1.5) буде мати вигляд [28]:

$$V = \exp\left(-0,5 \frac{(z-h_e)^2}{\partial_z^2}\right) + \exp\left(-0,5 \frac{(z+h_e)^2}{\partial_z^2}\right), \quad (1.6)$$

де h_e – ефективна висота джерела викидів (висота середньої лінії факела над рівнем землі), м; $H_1 = z - (2mL - h_e)$; $H_2 = z + (2mL - h_e)$; $H_3 = z - (2mL + h_e)$; $H_4 = z + (2mL + h_e)$; m – лічильник інтерполяції (для розрахунків достатньо 3-х інтерполяцій); L – висота змішування, м.

Висоту змішування L можна визначити за формулою [28]:

$$L = 320 \cdot u_{10}, \quad (1.7)$$

де u_{10} – приземна швидкість вітру (зазвичай, на висоті 10 м).

Розрахунок ефективної висоти джерела викиду для класів стабільності атмосфери A, B, C, D при $x < x_f$ розраховується за формулою [28]:

$$h_e = h_s + 1,6 \frac{\sqrt[3]{F_b}}{u_s}. \quad (1.8)$$

Для класів стабільності атмосфери E, F коефіцієнт стабільності розраховується за такою формулою [28]:

$$s = g \frac{\partial \theta / \partial z}{T_a}, \quad (1.9)$$

де $\partial\theta/\partial z = 0,02$ К/м для класу стабільності E і для класу стабільності $F - 0,035$ К/м, якщо $1,84 u_s s^{-1/2} > x_f$, розрахунок ефективної висоти ведеться, як описано вище для класів $A-D$, в іншому випадку, якщо $1,84 u_s s^{-1/2} > x$, ефективна висота джерела викиду [28]

$$h_e = h'_s + 2,4 \cdot \frac{\sqrt[3]{F_b}}{u_s s}, \quad (1.10)$$

інакше

$$h_e = h'_s + 1,6 \frac{\sqrt[3]{F_b}}{u_s}. \quad (1.11)$$

Розрахунок відстані досягнення максимальної концентрації, якщо $F_b < 55$ [28]:

$$x_f = 49 \cdot F_b^{5/8}, \quad (1.12)$$

інакше

$$x_f = 119 \cdot F_b^{2/5}. \quad (1.13)$$

Розрахунок модифікованої висоти джерела викидів проводиться за формулою [28]

$$h'_s = h_s + 2d_s \left(\frac{v_s}{u_s} - 1,5 \right), \quad (1.14)$$

де $v_s < 1,5 u_s$, інакше $h'_s = h_s$.

Розрахунок ефективної висоти джерела викидів проводиться за такою формулою [28]:

$$F_b = g v_s d_s^2 \left(\frac{T_s - T_a}{4T_s} \right), \quad (1.15)$$

де g – прискорення вільного падіння – $9,8 \text{ м/с}^2$; v_s – швидкість виходу газів з джерела викидів, м/с ; d_s – діаметр гирла джерела викидів, м ; T_s – температура газів, що викидаються в атмосферу, $^{\circ}\text{C}$; T_a – температура навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$.

Під час досліджень мезомасштабного розсіювання та стійкій атмосферній стратифікації модель Гаусса дозволяє достатньо точно описати процес розсіювання забруднюючих речовин в атмосферному повітрі. При цьому невелика кількість вхідних параметрів спрощує розрахунок, підвищує швидкість обчислення та потребує невисокої обчислювальної потужності у випадку комп'ютерного моделювання.

1.2.2 Авторегресійні моделі поширення забруднюючих речовин в атмосферному повітрі

Авторегресійні моделі бувають нелінійними та лінійними [49]. Такі моделі використовуються для аналізу зміни у часі метеорологічних параметрів або показників забруднення атмосфери, значення яких в даний момент часу C_t залежить від значень цього параметра в попередні моменти часу.

Серед переваг статистичних методів можна назвати відносно простий математичний апарат моделей та низькі потреби в обчислювальних ресурсах. Для уточнення вихідних даних і підвищення репрезентативності результатів статистичних моделей вводять граничні умови, які є специфічними для кожної конкретної задачі прогнозування розповсюдження забруднюючих речовин в атмосферному повітрі.

Недоліком цих методів є великі значення похибок при довгострокових прогнозах унаслідок значних відхилень усередині вибірки даних та нестационарності процесу.

1.2.3 Турбулентно-дифузійні моделі поширення забруднення в атмосферному повітрі

Моделі турбулентно-дифузійного переносу застосовуються для прогнозування розповсюдження забруднюючих речовин у мезомасштабному прилеглому шарі. Такі моделі базуються з одного боку на апріорній інформації у вигляді рівнянь турбулентного переносу забруднюючих речовин і припущеннях про постійність швидкості вітру та поля коефіцієнта турбулентної дифузії у межах локального регіону, для якого здійснюється прогноз. Однак, з іншого боку, ці моделі базуються на супутньому прогнозуванні оперативних даних поля концент-

рації забруднюючих речовин у деяких опорних точках (постах екологічного контролю). У загальному вигляді задача прогнозування забруднення повітря математично може бути визначена як задача розв'язання за певних початкових і граничних умов диференціального рівняння [2]

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial q}{\partial x_i} = \sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial}{\partial x_i} K_i \frac{\partial q}{\partial x_i} - \alpha q, \quad (1.16)$$

де q – концентрація забруднюючої речовини; t – час; x_i – координати ($i = \overline{1,3}$) уздовж однієї із трьох осей; u_i , K_i – складові середньої швидкості переміщення забруднюючих речовин і коефіцієнта обміну, що відносяться до напрямку осі x_i ($i = \overline{1,3}$); α – коефіцієнт, що визначає зміну концентрації за рахунок перетворення домішок під дією різних процесів.

Рівняння (1.16) описує просторовий розподіл середніх концентрацій, а також їхні зміни у часі.

Для доповнення отриманих рівнянь використовуються такі моделі турбулентності: модель Бусінеска, k - ϵ модель, k - ω модель, модель напруги Рейнольдса, метод великих вихорів, пряме чисельне моделювання [2].

Перевагами турбулентно-дифузійних моделей є те, що вони дозволяють врахувати хімічні реакції в атмосфері та процеси випадання забруднюючих речовин.

До недоліків варто віднести те, що у цих моделях має місце деяке спрощення турбулентних рухів повітря в атмосфері, не враховується вертикальна конвекція повітря, а головне – на практиці складно ідентифікувати усі параметри рівняння (1.16).

1.3 Огляд існуючих інформаційних систем і технологій для розрахунку поширення забруднюючих речовин в атмосферному повітрі

На практиці для розрахунку поширення забруднюючих речовин в атмосферному повітрі використовуються різні інформаційні системи і технології. Охарактеризуємо основні з них.

ВИСНОВКИ

В дослідженні розв'язано актуальну науково-прикладну задачу підвищення точності та ефективності оцінювання параметрів викидів забруднюючих речовин за даними оперативного моніторингу шляхом створення інформаційної технології, що дозволяє підвищити ефективність системи екологічного контролю стаціонарних та пересувних джерел цих викидів.

1. Проведений аналіз показав, що існує технологічний розрив між математичними моделями, які досить детально описують процеси розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері та засобами для вимірювання та оцінювання вхідних для моделювання даних, який нівелює високу адекватність цих моделей. Найбільш проблемною є ситуація, коли відсутні достовірні дані про параметри самих джерел викидів, особливо в задачах пошуку незареєстрованих джерел викидів, в задачах громадського екологічного контролю та ін.

2. Для умов, коли необхідно оцінити параметри стаціонарних джерел викидів та визначити серед них ті, що мають найбільший забруднюючий вплив, запропоновано метод оцінювання параметрів викидів стаціонарних джерел, в першу чергу потенційно понаднормативних, за нечіткими експертними оцінками з урахуванням чутливості якості атмосферного повітря у певному місці спостереження від апріорної інформації про координати, метеоумови та проектно-технічні характеристики кожного можливого джерела викидів, формалізованих у нечіткій базі знань, що дозволяє підвищити точність та ефективність такого оцінювання. Задача оцінювання просторових та проектно-технічних параметрів конкретного стаціонарного джерела викиду може бути реалізована запропонованим методом за даними оперативного моніторингу зони розсіювання з допомогою БПЛА за рахунок розв'язання зворотної задачі розсіювання на основі моделі Гаусса, що дозволяє підвищити точність оцінювання параметрів цього джерела за мінімальної кількості даних спостережень.

3. Викиди забруднюючих речовин від пересувних джерел (наприклад, автотранспорт) представляють собою не меншу загрозу для довкілля. Для оцінювання викидів автотранспорту можливо використувати розроблений метод обробки даних моніторингу параметрів пересувних джерел викидів, з урахуванням їх просторово-часової неод-

норідності, параметрів транспортної мережі та метеопараметрів з використанням нечіткої бази знань кількості транспортних засобів на кожній ділянці вулиці, що дозволяє більш точно отримати залежність між параметрами транспортних засобів і станом забруднення атмосферного повітря.

4. На сьогоднішній день існує досить велика кількість інформаційно-вимірювальних систем, що відрізняються різною складністю, обчислювальною потужністю, вартістю тощо. Запропоновано методику побудови сучасної ІВС із моделлю, основою на нечіткій базі знань, яка використовується для оцінювання параметрів моделі забруднення атмосферного повітря автотранспортом, що дозволяє підвищити точність та ефективність цього оцінювання за рахунок комплексної обробки таких параметрів. Відповідно до вищевказаного також вдалось удосконалити схему та методику побудови універсальної інформаційно-вимірювальної мобільної системи для оперативного моніторингу стану забруднення атмосферного повітря з використанням мобільних пристроїв, встановлених на транспортні засоби, яку можна швидко адаптувати під задані умови та показники стану довкілля і фактори його забруднення.

5. Останніми роками веб-сервіси та технології набувають все більшої популярності та затребуваності. З урахуванням цього та відповідно до запропонованих методів оцінювання параметрів викидів речовин від стаціонарних джерел розроблено такі веб-сервіси:

- веб-сервіс на мові Java для оцінювання параметрів джерел понаднормативних викидів на основі нечіткої бази знань з візуалізацією результатів у Google Maps, який дозволяє уточнювати вхідні дані для застосування розробленої інформаційної технології (<http://source-identification.appspot.com>);

- веб-сервіс розрахунку поширення забруднюючих речовин в атмосферному повітрі від стаціонарних джерел викиду для уточнення вхідних даних і застосування розробленої інформаційної технології з візуалізацією результатів розрахунків у Google Maps.

Запропоновані веб-сервіси вільно доступні в Інтернеті, що дозволяє науковцям, викладачам, фахівцям та студентам використовувати ці засоби для наукових досліджень та в навчальних цілях.

6. Запропоновано інформаційну ГІС-інтегровану технологію оцінювання параметрів стаціонарних та пересувних джерел викидів ре-

човин за даними оперативного моніторингу забруднення атмосферного повітря, яка поєднує усі запропоновані в роботі методи, інформаційні системи та веб-сервіси і дозволяє підвищити точність та ефективність визначення параметрів викидів із різних джерел. Для реалізації цієї технології запропоновано архітектуру та принципи побудови ГІС-інтегрованої системи баз даних і моделей для моделювання та оптимізації антропогенного забруднення атмосферного повітря.

7. Для проведення дослідження стану атмосферного повітря у місті з використанням розробленої автором інформаційно-вимірювальної системи промодельовано стан забруднення атмосферного повітря м. Вінниці. Кореляційний аналіз залежності концентрації поширення СО від приведеної кількості транспортних засобів, показав значення коефіцієнта кореляції, більше 0,9, що говорить про високу адекватність розробленої системи.

8. Результати роботи, які мають цінність для екологічного контролю забруднення атмосферного повітря, впроваджені в Державній екологічній інспекції у Вінницькій області, що підтверджується відповідним актом. Результати роботи, які є цінними для екологічного контролю викидів, передані в Департамент енергетики, транспорту та зв'язку Вінницької міської ради відповідно до однієї із задач Стратегії розвитку м. Вінниці до 2020 р.: «Енергоефективність та захист навколишнього середовища».

Результати роботи використовуються у навчальному процесі кафедри системного аналізу, комп'ютерного моніторингу та інженерної графіки Вінницького національного технічного університету для спеціальностей 122 – «Комп'ютерні науки та інформаційні технології» (спеціалізація «Комп'ютерний еколого-економічний моніторинг»), 124 – «Системний аналіз» та 126 – «Інформаційні системи та технології».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Моніторинг довкілля : підручник / В. М. Боголюбов, М. О. Клименко, В. Б. Мокін [та ін.] ; за ред. В. М. Боголюбова. і Т. А. Сафранова. – Херсон : Грінь Д. С., 2011. – 530 с.
2. Громова О. В. Аналіз моделей поширення речовин в атмосфері від стаціонарних джерел / О. В. Громова // Наук. праці УкрНДГМІ. – 2004. – Вип. 253. – С. 173–181.
3. Сонькин Л. Р. Синоптико-статистический анализ и краткосрочный прогноз загрязнения атмосферы / Л. Р. Сонькин. – Л. : Гидрометеоздат, 1991. – 250 с.
4. Щербань А. Н. Комплексная оценка и оперативное прогнозирование суммарного загрязнения атмосферы / А. Н. Щербань, А. В. Примак, Е. Б. Стеклогоров // Промышленная теплотехника. – 1980. – Т. 2. – С. 108–118.
5. Sofiev M. A dispersion modelling system SILAM and its evaluation against ETEX data / M. Sofiev // Atmospheric Environment. – 2006. – № 40. – P. 674–685.
6. Горячев Г. В. Аналіз методів ідентифікації стаціонарних джерел викидів [Електронний ресурс] / Г. В. Горячев, Д. Ю. Дзюняк // ХІІІ регіональна наук.-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області : тези доповідей. – Вінниця, 2014. – Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2014/ineek/txt/Dziuniak.pdf>.
7. Горячев Г. В. Метод визначення стаціонарних джерел понаднормативних викидів на основі нечітких баз знань / Г. В. Горячев, О. М. Козачко, Д. Ю. Дзюняк // Екологічна безпека. – 2012. – № 2/2012 (14). – С. 59–61.
8. Пат. України на корисну модель № 201404006. Спосіб визначення стаціонарних джерел понаднормативних викидів на основі нечітких баз знань / Г. В. Горячев, Д. Ю. Дзюняк, заявник і власник патенту ВНТУ. – Дата реєстрації: 27.10.2014.
9. Горячев Г. В. Ідентифікація джерел понаднормативних викидів на основі нечітких баз знань за допомогою веб-сервісів / Г. В. Горячев, Д. Ю. Дзюняк // ХІІ Міжнародна конференція «Контроль і управління в складних системах» : тези доповідей. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – С. 66–67.

10. Горячев Г. В. Моделювання поширення забруднюючих речовин від викидів стаціонарних джерел найбільших ТЕС України [Електронний ресурс] / Г. В. Горячев, Д. Ю. Дзюняк // ХЛІ регіональна наук.-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області : тези доповідей. – Вінниця, 2012. – Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2012/ineek/txt/dzunya.pdf>

11. Горячев Г. В. Ідентифікація джерел понаднормативних викидів на основі нечітких баз знань за допомогою веб-сервісів / Г. В. Горячев, Д. Ю. Дзюняк // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2014. – № 2/2014. – С. 98–102.

12. Дзюняк Д. Ю. ГІС-модуль розрахунку приземних концентрацій забруднюючих речовин від викидів стаціонарних джерел за методом Гауса / Д. Ю. Дзюняк, Г. В. Горячев. // Свідोцтво про реєстрацію авторського права на твір № 39558. – К. : Державний департамент інтелектуальної власності України. – Дата реєстрації: 08.09.2011.

13. Практична реалізація сучасної мобільної системи веб-моніторингу та експрес-аналізу стану повітряного середовища [Електронний ресурс] / К. О. Бондалетов, В. Б. Мокін, Г. В. Горячев, Д. Ю. Дзюняк // XLIV регіональна науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області: тези доповідей. – Вінниця, 2015. – Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2015/ineek/txt/bondaletov.pdf>.

14. Метод та технологія моніторингу стану атмосферного повітря за допомогою універсальної інформаційно-вимірювальної системи з використанням мобільних пристроїв / В. Б. Мокін, Д. Ю. Дзюняк, К. О. Бондалетов, В. В. Олійник // Наукові праці Вінницького національного технічного університету [Електронний ресурс]. – 2015. – № 4. – Режим доступу: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/download/456/454>

15. Інформаційно-вимірювальна система оперативного екологічного моніторингу з використанням мобільних пристроїв / В. Б. Мокін, К. О. Бондалетов, Г. В. Горячев, Д. Ю. Дзюняк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 5 (122). – С. 116–122.

16. Мокін В. Б. І. Метод оцінювання параметрів стаціонарного джерела викиду на основі моделі Гауса за даними оперативного моніторингу зони розсіювання / В. Б. Мокін, Д. Ю. Дзюняк // Математичне моделювання в економіці. – 2016. – № 3–4. – С. 28–38.

17. Мокін В. Б. Інформаційно-вимірювальні системи для ідентифікації параметрів моделі забруднення атмосферного повітря автотранспортом з використанням мобільних пристроїв та фотометричних, у т. ч. лазерних, пристроїв і систем / Г. В. Горячев, Д. Ю. Дзюняк, К. О. Бондалетов // III Міжнародна конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2015)», м. Вінниця, 27–29 жовтня 2015 р. : тези доповідей. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – С. 130–132.

18. Практична реалізація мобільної аналітичної комп'ютерної системи моніторингу стану атмосферного повітря з підсистемою веб-аналізу та виведення даних на геопортал / В. Б. Мокін, Г. В. Горячев, Д. Ю. Дзюняк, К. О. Бондалетов // V Всеукраїнський з'їзд екологів із міжнародною участю : тези доповідей.. – Вінниця, 2015. – С. 46–51.

19. Мокін В. Б. Мобільна аналітична комп'ютерна система для оперативного моніторингу стану атмосферного повітря міста / В. Б. Мокін, Д. Ю. Дзюняк, К. О. Бондалетов // Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи : матеріали Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції. – Вінниця, 2015. – С. 23–26.

20. Підвищення точності моделювання забруднення атмосферного повітря міста з використанням мобільних інформаційно-вимірювальних систем [Електронний ресурс] / К. О. Бондалетов, В. Б. Мокін, Г. В. Горячев, Д. Ю. Дзюняк // XLV регіональна науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науководослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області : тези доповідей.. – Вінниця, 2016. – Режим доступу: <http://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-ebmd/all-ebmd-2016/paper/view/465/>.

21. Mokin V. Vitalii. Information measuring systems with mobile devices for identification air pollution parameters caused by transport / Georgii V. Goriachev, Dmytro Y. Dziuniak, Konstantin O. Bondaletov, Serhii O. Zhukov, Mariusz Duk, Saltanat Sailarbek // Proc. SPIE 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and

High-Energy Physics Experiments – 2016. – 1003128 (September 28, 2016). – doi:10.1117/12.2249202.

22. Мокін В. Б. Технологія оперативного екологічного моніторингу стану повітряного середовища та пересувних джерел його забруднення / В. Б. Мокін, Д. Ю. Дзюняк, К. О. Бондалетов // XIV Міжнародна науково-практична конференція: «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях», 5–9 жовтня 2015 р. : тези доповідей. – К., 2015. – С. 126–130.

23. Метод оцінювання параметрів стаціонарного джерела викиду на основі моделі Гауса за даними оперативного моніторингу зони розсіювання / В. Б. Мокін, Г. В. Горячев, Д. Ю. Дзюняк, К. О. Бондалетов // III Міжнародна науково-практична конференція Winter InfoCom Advanced Solutions 2016 : тези доповідей. – К., 2016. – С. 66–677.

24. Джигирей В. С. Основи екології та охорона навколишнього природного середовища / В. С. Джигирей, В. М. Сторожук, Р. А. Яцюк // Екологія та охорона природи. – Львів : Афіша, 2000. – 272 с.

25. Meghea I. Gauss dispersion model applied to multiple punctual sources from an industrial platform / I. Meghea, M. Mihai, T. Demeter // International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & Mining Ecology Management. – 2013. – V. 1. – P. 497.

26. Chaudhry V. Arduair: Air Quality Monitoring / V. A. Chaudhry // International Journal of Environmental Engineering and Management. – 2013. – P. 639–646.

27. An Industriad air pollution dispersion system based on Gauss dispersion model / Juan S. [et al.] // Environmental Pollution & Control. – 2005. – V. 7. – P. 11.

28. Zannetti P. Air pollution modeling: theories, computational methods and available software / P. Zannetti // Springer Science & Business Media, 2013. – P. 425.

29. Turner D. B. Workbook of atmospheric dispersion estimates: an introduction to dispersion modeling / Turner D. B. // CRC press. – 1994. – P. 192.

30. Jorgensen B. The theory of dispersion models / B. Jorgensen // CRC Press. – 1997. – P. 237.

31. A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere / Nickovic S., Kallos G., Papadopoulos A., Kakaliagou O. // J Geoph Res, 2001. – № 106 – P. 18113–18129.

32. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.
33. Громова О. В. Аналіз моделей поширення речовин в атмосфері від стаціонарних джерел / О. В. Громова // Наук. праці УкрНДГМІ. – 2004. – № 253. – С. 173–181.
34. Рогожин О. Г. Інформаційний інструментарій оцінки екологічних ресурсів в Україні / О. Г. Рогожин, Є. В. Хлобистов, Є. О. Яковлев // Математичне моделювання в економіці – 2015. – № 3. – С. 13–26.
35. Замай С. С. Модели оценки и прогноза загрязнения атмосферы промышленными выбросами в информационно-аналитической системе природоохранных служб крупного города : учеб. пособие / С. С. Замай, О. Э. Якубайлик. – Красноярск : Красноярский государственный университет, 1998. – 109 с.
36. Владимиров А. М. Охрана окружающей среды. – СПб. : Гидрометеиздат, 1991. – 480 с.
37. Автотранспортные потоки и окружающая среда : учеб. пос. для вузов / В. Н. Луканин, А. П. Буслаев, Ю. В. Трофименко, М. В. Яшина. – М. : ИНФРА-М., 1998. – 408 с.
38. Chaudhry, V. 2014, ARDUEMISSION: Vehicular Emissions Monitoring // International Journal of Advanced Research in Engineering and Applied Sciences, Volume 3, Number 7, pp.35-44
39. Pelliccioni A. Air pollution model and neural network: an integrated modelling system / A. Pelliccioni, T. Tirabassi // IL NUOVO CIMENTO. – May, 2008. – P. 22–23.
40. Peter F. Nelson. Using computer modelling to simulate atmospheric movement and potential risk of pollutants from post-combustion carbon capture projects / Peter F. Nelson, Ye Wo // Energy procedia. – November, 2014. – P. 11–14.
41. Клименко М. О. Моніторинг довкілля : підручник / М. Клименко, А. Прищеп, Н. Вознюк. – К. : Академвидав, 2006. – 359 с.
42. Никифоров А. Н. Математическая модель переноса примеси в неизотермической влажной воздушной среде / А. Н. Никифоров, Н. С. Бузало // XV Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» : сборник трудов. – Тамбов, 2002. – Т. 4. – С. 31.
43. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. М. Беляев. – К. : Наук. думка, 1997. – 365 с.

44. Белов И. В. Сравнительный анализ некоторых математических моделей для процессов распространения загрязнений в атмосфере / И. В. Белов, М. С. Беспалов, Л. В. Ключкова [и др.] // Математическое моделирование. – 1999. – Т. 11. – № 8. – С. 52–64.

45. Скоб Ю. А. Математическое моделирование выброса и рассеяния в атмосфере газообразных примесей / Ю. А. Скоб // Вестник Харк. нац. ун-та. Сер. «Математическое моделирование. Информационные технологии. Автоматизированные системы управления». – 2007. – № 775. – Вып. 7. – С. 236–245.

46. Попов О. О. Стохастична модель забруднення приземної атмосфери від підприємств паливної енергетики (на прикладі ТЕЦ) / О. О. Попов // Зб. наук. праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. – К. : ІПМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України. – 2009. – № 53. – С. 10–17.

47. Hurley P. J. TAPM: a practical approach to prognostic meteorological and air pollution modelling / P. J. Hurley, W. L. Physick, A. K. Luhar // Environmental Modelling & Software. – 2005. – Т. 20. – № 6. – С. 737–752.

48. Pasquill F. Atmospheric dispersion parameters in gaussian plume modeling: [part II. Possible Requirements for Change in the Turner Workbook Values] / F. Pasquill // EPA-600/4-76-030b, U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina 27711. – 1976. – P. 237.

49. Мокін Б. І. Математичні методи ідентифікації динамічних систем : навчальний посібник / Б. І. Мокін, В. Б. Мокін, О. Б. Мокін. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 263 с.

50. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий ОНД-86. – Ленинград, Гидрометеиздат, 1997. – 68 с.

51. КНД 211.2.3.06398. Метрологічне забезпечення. Відбір проб промислових викидів.

52. Al-Dahoud A. Monitoring. Metropolitan City Air-quality Using Wireless Sensor Nodes based on ARDUINO and XBEE [Електронний ресурс] / A. Al-Dahoud, M. Fezari, I. Jannoud, T. AL-Rawashdeh. – Режим доступу: <http://www.inase.org/library/2015/vienna/bypaper/CSSCC/CSSCC-17.pdf>.

53. Нотон П. Полный справочник по Java / П. Нотон, Г. Шилдт. – К. : Диалектика, 1997. – 268 с.

54. Оцінювання параметрів стаціонарних джерел потенційних понаднормативних викидів в атмосферне повітря за нечіткими експертними оцінками / Б. Ю. Собко, В. Б. Мокін, Г. В. Горячев, [та ін.] // XLVI регіональна науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області, електронне наукове видання матеріалів конференції, м. Вінниця, 22–23 березня 2017. – Режим доступу: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/18193>.

55. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – М. : Высшая шк., 2003. – 479 с.

56. Yearlong, high-resolution, urban airshed modeling: verification of TAPM predictions of smog and particles in Melbourne, Australia / Hurley P. Yearlong, Manins P, Lee S., Boyle R., Ng Y. L., Dewundege P. // Atmos Environ, 2003. № 37:1899 – P. 910–916.

57. Hefeng Zhanga. Air pollution and control action in Beijing / Hefeng Zhanga, Shuxiao Wangb, Jiming Haob [a. o.] // Journal of Cleaner Production. – 2016. – V. 112, Part 2. – P. 1519–1527. Doi:10.1016/j.jclepro.2015.04.092.

58. Álvaro Gomez-Losadaa. Characterization of background air pollution exposure in urban environments using a metric based on Hidden Markov Models / Álvaro Gomez-Losadaa, Jose Carlos M. Piresb, Rafael Pino-Mejasa // Atmospheric Environment. – V. 127. – P. 255–261. – Doi:10.1016/j.atmosenv.2015.12.046.

59. Douglas W. Dockery. Air pollution and daily mortality: Associations with particulates and acid aerosols / Douglas W. Dockery, Joel Schwartz, John D. Spengler – Doi:10.1016/S0013-9351(05)80042-8.

60. An operational evaluation of the Eta-CMAQ air quality forecast model / B.Eder, D. W. Kang, R. Mathur [a. o.] // Atmos Environ. – 2006. – 40(26). – P. 4894–4905.

61. Гладкий А. В. Методи числового моніторингу екологічних процесів : навч. посіб. / А. В. Гладкий, В. В. Скопецький. – К. : Видавництво «Політехніка», 2005. – 152 с.

62. Боцян В. В. Моніторинг стану забруднення атмосферного повітря міста оксидом вуглецю з використанням мобільної аналітичної інформаційно-вимірювальної системи / В. В. Боцян, В. Б. Мокін //

Міжнародна науково-практична Інтернет-конференція «Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи» : матеріали доповідей. – Вінниця, 2015. – С. 31–33.

63. Інформаційні технології автоматизації обробки параметрів геоінформаційних систем з геометричними мережами : монографія / В. Б. Мокін, В. Г. Сторчак, Є. М. Крижановський [та ін.]. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 196 с.

64. P-Sense: A participatory sensing system for air pollution monitoring and control / D. Mendez, A. J. Perez, M. A. Labrador, J. J. Marron // *Pervasive Computing and Communications Workshops*. 2011. – P. 344–347.

65. On detection of emerging anomalous traffic patterns using GPS data / Pang L. X., Chawla S., Liu W., Zheng Y // *Data and Knowledge Engineering*. – Volume 87, September 2013, Pages 357–373. – DOI: 10.1016/j.datak.2013.05.002.

66. Remote sensing detection of atmospheric pollutants using Lidar, Sodar and correlation with air quality data in an industrial area / Juliana Steffens; Renata F. // *Proc. SPIE 8182, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing VII, 81820Z* (September 30, 2011). – DOI: 10.1117/12.897915.

67. Мокін В. Б. Розробка геоінформаційної системи державного моніторингу довкілля Вінницької області / В. Б. Мокін, М. П. Боцула // *Національне картографування: стан, проблеми та перспективи розвитку* : зб. наукових праць. – К. : Картографія, 2003. – С. 140–143.

68. МВВ № 081/12-0161-05. Викиди газопилові промислові. Методика виконання вимірювань масової концентрації речовини у вигляді суспендованих твердих частинок в організованих викидах стаціонарних джерел гравіметричним методом (1-10000 мг/м³). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=76450

69. Розробка та впровадження єдиної автоматизованої системи Державної екологічної інспекції та підрозділів аналітичного контролю територіальних органів Мінприроди України із отриманням результатів вимірювань стану забруднення довкілля, викидів, скидів і відходів, їх накопичення, оброблення та аналізування: Звіт про НДР / В. Б. Мокін, М. П. Боцула, Г. В. Горячев та ін. ; Вінниц. нац. техн. унт. – 2807 (№ ДР 0105U008854). Інв. № 0206U005422. – К., 2006. – 195 с.

70. Розробка підсистеми «ВИКИДИ» автоматизованої системи контролю Держекоінспекції Мінприроди України / Ю. Л. Зіскінд,

В. Б. Мокін, М. П. Боцула, Г. В. Горячев // Вісник Вінницького політехнічного інституту. Спеціальний випуск за матеріалами I-го Всеукраїнського з'їзду екологів. – 2006. – № 5. – С. 132–134.

71. Розробка підсистеми реєстрації та попередньої обробки даних контролю шкідливих викидів / В. Б. Мокін, Г. В. Горячев, Д. І. Кательніков [та ін.] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. Спеціальний випуск за матеріалами I-го Всеукраїнського з'їзду екологів. – 2006. – № 5 – С. 124–128.

72. Пакет комп'ютерних програм для розрахунку параметрів викидів при формуванні протоколів вимірювань параметрів газопилового потоку / В. Б. Мокін, Г. В. Горячев, Д. І. Кательніков, С. О. Жуков // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 17722. – К. : Державний департамент інтелектуальної власності України. – Дата реєстрації: 28.08.2006.

73. Мокін В. Б. Розробка комп'ютерних засобів автоматизації процесів вимірювання, накопичення та оброблення параметрів стану забруднення довкілля, викидів, скидів і відходів аналітпідрозділами Держекоінспекції Мінприроди України / В. Б. Мокін, Ю. Л. Зіскінд, М. П. Боцула // XIII Міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика 2006» : матеріали конференції. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – С. 357–363.

74. Горячев Г. В. Пакет програм для розрахунку приземних концентрацій забруднюючих речовин від викидів стаціонарних джерел за методикою ОНД-86 / Г. В. Горячев, М. А. Гаврилюк // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 26017. – К. : Державний департамент інтелектуальної власності України. – Дата реєстрації: 10.10.2008.

75. Горячев Г. В. Використання у ГІС методик моделювання поширення забруднюючих речовин у атмосферному повітрі / Г. В. Горячев, М. А. Гаврилюк // IV Міжнародна конференція «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення» : збірник наукових статей. – Київ, 2008. – С. 165–168.

76. Горячев Г. В. Моделювання поширення забруднюючих речовин в атмосферному повітрі з використанням ГІС-технологій за методикою ОНД-86 / Г. В. Горячев, М. А. Гаврилюк / Наукові праці Вінницького національного технічного університету [Електронний ресурс]. – 2009. – № 3. – Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/157/156>

77. Кожевникова М. Ф. Идентификация источников загрязнения: вычислительные методы. / В. Ф. Кожевникова, В. В. Левенец, И. Л. Ролик. – Харьков : Харьковский физико-технический институт, 2011. – С. 149–156.

78. Ідентифікація та оптимізація інформаційних моделей динамічних багатозв'язних просторово-розподілених систем для задач моніторингу, збереження даних та автоматизованого управління: звіт про НДР: № 28-Д-350 / Вінницький національний технічний університет; кер. В. Б. Мокін; виконав.: Є. М. Крижановський [та ін.]. – Київ, 2015. – 273 с. – № ДР 0113U003135. – Інв. № 0215U006147.

79. Мокін В. Б. Інформаційні технології автоматизації обробки параметрів геоінформаційних систем з геометричними мережами : монографія / В. Б. Мокін, В. Г. Сторчак, Є. М. Крижановський, О. В. Гавенко, В. Ю. Балачук. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 196 с.

80. Мокін В. Б. Метод визначення спостережуваності динамічних багатозв'язних просторово-розподілених систем з використанням геоінформаційного простору параметрів / В. Б. Мокін, І. В. Варчук // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2015. – № 5. – С. 105–111.

81. Каменева І.П. Методи визначення екологічного ризику за атмосферним фактором / І. П. Каменева, О. О. Попов, А. В. Яцишин, В. О. Артемчук // Моделювання та інформаційні технології. – Київ : ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. – 2009. – № 53. – С. 15–22.

Для класів стабільності атмосфери E, F (за Песквіллом), при яких: $1.84 \cdot u_s \cdot \sqrt{s} > 3110$ м, де: $s = g \frac{\partial \theta / \partial z}{T_a}$,

коли $\partial \theta / \partial z$ для класу стабільності E складає 0,02, а для класу F – 0,035.

$$\sum_i \left[C_i - \frac{a}{\sigma_y(x_i) \cdot \sigma_z(x_1)} \cdot e^{-0.5 \cdot \frac{(y_i)^2}{(\sigma_y(x_i))^2}} \cdot \left[\frac{z - h_s + 2.4 \cdot \sqrt{\frac{F_s}{u \cdot s}}}{(\sigma_z(x_i))^2} \right] + e^{-0.5 \cdot \frac{\left[\frac{z + h_s + 2.4 \cdot \sqrt{\frac{F_s}{u \cdot s}}}{(\sigma_z(x_i))^2} \right]^2}{(\sigma_z(x_i))^2}} \cdot \left[\frac{0.5 \cdot \frac{(y_i)^2}{(\sigma_y(x_i))^2}}{\sigma_y(x_i)^2} - \frac{0.5 \cdot \left(h_s + z + \frac{2.4 \cdot \sqrt{F_s}}{u \cdot s} \right)^2}{\sigma_z(x_i)^2} \right] + e^{-\frac{\sigma_y(x_i) \cdot \sigma_z(x_1)}{\sigma_y(x_i) \cdot \sigma_z(x_1)}} \right] = 0$$

$$\sum_i \left[C_i + \frac{a}{\sigma_y(x_i) \cdot \sigma_z(x_1)} \cdot e^{-0.5 \cdot \frac{(y_i)^2}{(\sigma_y(x_i))^2}} \cdot \left[\frac{z - h_s + 2.4 \cdot \sqrt{\frac{F_s}{u \cdot s}}}{(\sigma_z(x_i))^2} \right] + e^{-0.5 \cdot \frac{\left[\frac{z + h_s + 2.4 \cdot \sqrt{\frac{F_s}{u \cdot s}}}{(\sigma_z(x_i))^2} \right]^2}{(\sigma_z(x_i))^2}} \right] = 0$$

$$\sum_i \left[\frac{0.5 \cdot (y_i)^2}{\sigma_y(x_i)^2} - \frac{0.5 \cdot \left(h_s - z + \frac{2.4 \cdot \sqrt{F_s}}{u \cdot s} \right)^2}{\sigma_z(x_i)^2} \cdot \sqrt[3]{F_s \cdot x_i} \cdot \left(h_s - z + \frac{2.4 \cdot \sqrt{F_s}}{u \cdot s} \right) + \frac{0.5 \cdot \left(h_s + z + \frac{2.4 \cdot \sqrt{F_s}}{u \cdot s} \right)^2}{\sigma_z(x_i)^2} \cdot \sqrt[3]{F_s \cdot x_i} \cdot \left(h_s + z + \frac{2.4 \cdot \sqrt{F_s}}{u \cdot s} \right) + \frac{F_s \cdot u \cdot \sigma_z(x_i)^2}{\sigma_y(x_i) \cdot \sigma_z(x_1)} \right] = 0$$

$$\sum_i \left[C_i - \frac{a}{\sigma_y(x_i) \cdot \sigma_z(x_i)} \cdot e^{-0.5 \frac{(y_i)^2}{(\sigma_y(x_i))^2}} \cdot \left[\left[\frac{z - h_s + 1.6 \cdot \sqrt{\frac{F_s \cdot x_i}{u}}}{(\sigma_z(x_i))^2} \right]^2 + e^{-0.5 \frac{\left[\frac{z + h_s + 1.6 \cdot \sqrt{\frac{F_s \cdot x_i}{u}}}{(\sigma_z(x_i))^2} \right]^2}{\sigma_y(x_i)^2}} \cdot \left[\frac{0.5 \cdot (y_i)^2}{\sigma_y(x_i)^2} - \frac{0.5 \cdot \left(h_s - z + \frac{1.6 \cdot \sqrt{F_s \cdot x_i}}{u} \right)^2}{\sigma_z(x_i)^2} + e^{\frac{\sigma_y(x_i) \cdot \sigma_z(x_i)}{\sigma_y(x_i) \cdot \sigma_z(x_i)}} \right] \right] = 0$$

Для класів стабільності атмосфери А, В, С, D (за Песквіллом), при яких відстань до джерела викиду: $500 < x < 3110$ (м):

$$\sum_i \left[C_i + \frac{a}{\sigma_y(x_i) \cdot \sigma_z(x_i)} \cdot e^{-0.5 \frac{(y_i)^2}{(\sigma_y(x_i))^2}} \cdot \left[\left[\frac{z - h_s + 1 \cdot \sqrt{\frac{F_s \cdot x_i}{u}}}{(\sigma_z(x_i))^2} \right]^2 + e^{-0.5 \frac{\left[\frac{z + h_s + 1 \cdot \sqrt{\frac{F_s \cdot x_i}{u}}}{(\sigma_z(x_i))^2} \right]^2}{\sigma_y(x_i)^2}} \cdot \left[\frac{0.5 \cdot (y_i)^2}{\sigma_y(x_i)^2} - \frac{0.5 \cdot \left(h_s - z + \frac{1 \cdot \sqrt{F_s \cdot x_i}}{u} \right)^2}{\sigma_z(x_i)^2} + e^{\frac{\sigma_y(x_i) \cdot \sigma_z(x_i)}{\sigma_y(x_i) \cdot \sigma_z(x_i)}} \right] \right] = 0$$

Наукове видання

**Мокін Віталій Борисович
Горячев Георгій Володимирович
Дзюняк Дмитро Юрійович**

**ІНФОРМАЦІЙНА ГІС-ІНТЕГРОВАНА ТЕХНОЛОГІЯ
ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИКИДІВ РЕЧОВИН
ЗА ДАНИМИ ОПЕРАТИВНОГО МОНІТОРИНГУ
ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено Д. Дзюняком

Підписано до друку 12.10.2018 р. Зам № В2018-014
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 5,77.
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр.

Вінницький національний технічний університет,
ІРВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.

press.vntu.edu.ua; *email*: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.
21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/403>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>