

УДК 519.87

В.Б. МОКІН, Д.Ю. ДЗЮНЯК

**МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СТАЦІОНАРНОГО ДЖЕРЕЛА
ВИКИДУ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ ГАУСА ЗА ДАНИМИ
ОПЕРАТИВНОГО МОНІТОРИНГУ ЗОНИ РОЗСПОВАННЯ**

***Анотація.** Запропоновано метод оцінювання параметрів стаціонарного джерела викидів на основі моделі Гауса за даними оперативного моніторингу зони розсіювання з використанням безпілотних літальних апаратів.*

***Ключові слова:** математичне моделювання, якість атмосферного повітря, модель Гауса, екологічний контроль підприємств, безпілотні літальні апарати.*

Вступ

Забруднення атмосферного повітря міст від викидів стаціонарних та пересувних джерел є серйозною проблемою сьогодення. Особливо актуальною задачею представляється сьогодні, коли діють мораторії на перевірку викидів промислових підприємств, а система моніторингу атмосферного повітря розвинена недостатньо, подекуди досі контроль здійснюється біля вже непрацюючих підприємств, а біля нових – не здійснюється. В той же час, у нашій країні досить активно починає діяти громадський екологічний контроль силами активістів. Наприклад, популярним є використання наземних та дистанційних (у т. ч. на основі квадрокоптерів) засобів з мобільними інформаційно-вимірювальними системами (ІВС) метеопараметрів та стану забруднення повітря різними газами (оксидами вуглецю, вуглеводнями типу CH_4 , C_2H_4 , оксидами сірки та азоту тощо). Особливий інтерес викликає оцінювання фактичних викидів стаціонарних джерел за даними спостережень у зоні розсіювання за різних метеоумов. У подальшому такі дані можна було б використовувати для оцінювання групового впливу таких джерел на забруднення повітря [1, 2] для розроблення заходів, спрямованих на зниження цього впливу.

Існує величезна кількість наукових розробок та досліджень, присвячених математичному моделюванню різних процесів у атмосфері, у тому числі поширенню від викидів стаціонарних джерел, наприклад, це – роботи таких відомих вчених, як: Берлянд М.Е., Боголюбов В.М., Довгий С.О., Лебідь О.Г., Громова О.В., Замай С.С., Горячев Г.В., Мокін В.Б., Peter F. Nelson, Chaudhryl V., Juan S. та багато інших (див., наприклад, [3–5]). Однак, було проведено зовсім мало досліджень для вирішення зворотної задачі моделювання поширення забруднюючих речовин у повітрі: яким чином за результатами вимірювань вмісту забруднюючої речовини в атмосферному повітрі у зоні розсіювання оцінити фактичне значення цього вмісту безпосередньо на виході стаціонарного джерела викиду.

Передусім, це пов'язано із тим, що до недавніх пір були відсутні достатньо дешеві та надійні пристрої для проведення швидкого оперативного моніторингу повітря в багатьох різних точках на заданих висотах. У даний час така задача може бути досить легко вирішена за допомогою різних типів безпілотних літальних апаратів (БПЛА) (квадрокоптер, моноплан та ін.), на яких встановлені мобільні інформаційно-вимірювальні системи [6, 7].

Однак при цьому виникає інша проблема – відсутній метод оцінювання вмісту газів у викиді стаціонарного джерела на основі метеопараметрів та даних спостережень вмісту забруднюючих домішок в атмосферному повітрі з БПЛА у зоні розсіювання цього джерела. Також потрібні рекомендації щодо визначення оптимальної траєкторії БПЛА для проведення таких спостережень для підвищення достовірності та точності оцінок за цим методом.

Одна з найбільш поширених математичних моделей розсіювання викидів від стаціонарного джерела – це модель Гауса [8–10]. Емпірично-статистичний метод, який в ній застосовується, при використанні достатньо простих параметрів, що враховують розсіювання домішок в атмосфері, дозволяє із досить високою точністю розрахувати зону розсіювання від викидів стаціонарного джерела.

Мета цієї статті – розроблення методу оцінювання параметрів стаціонарних джерел викидів на основі моделі Гауса за даними оперативного моніторингу зони розсіювання з використанням БПЛА, що дозволить достатньо точно розв'язати зворотну задачу моделювання розсіювання домішок в атмосфері за мінімальної кількості даних спостережень.

1. Загальна постановка задачі

Класична задача забруднення атмосферного повітря стаціонарними джерелами викиду, в загальному випадку, є нестационарною. Але, у першому наближенні, можна вважати, що параметри (напрямок і сила вітру, параметри викиду тощо), що впливають на зону розсіювання забруднення, за час, необхідний для БПЛА, щоб облетіти усі точки вимірювань, не зазнають істотних змін і тому процес, за цих умов, можна вважати стаціонарним. У той же час, для виконання такої умови кількість точок вимірювань повинна бути достатньо малою. А отже, необхідна методика з їх вибору таким чином, щоб забезпечити максимум корисної інформації з мінімальної кількості точок, тобто щоб отримати достатньо точну оцінку вмісту заданої домішки Q на виході заданого стаціонарного джерела викидів.

Запишемо рівняння моделі Гауса для поширення домішок (забруднюючих речовин) в атмосферному повітрі у декартовій системі координат [8]:

$$C(x, y, z) = \frac{Q \cdot K \cdot V(x, h_e)}{2\pi \cdot u_s \sigma_y(x) \sigma_z(x)} \cdot \exp\left(-0.5 \frac{y^2}{(\sigma_y(x))^2}\right), \quad (1)$$

де $C(x, y, z)$ – концентрація заданої речовини в атмосферному повітрі в точці з координатами x, y, z , мкг/м^3 , де точка відліку $(0, 0, 0)$ збігається з місцем виходу стаціонарного джерела викиду, осі x та y спрямовані в горизонтальній площині від цього джерела (вісь x – у напрямку вітру, а вісь y –

перпендикулярно до осі x), вісь z – вгору від точки виходу джерела; Q – викид речовини (концентрація у повітрі забруднюючої речовини-домішки), г/с; K – коефіцієнт перерахунку = $1 \cdot 10^6$; $\sigma_y(x)$, $\sigma_z(x)$ – стандартні відхилення розсіювання по горизонталі і вертикалі, відповідно, значення яких залежать від відстані x від джерела викиду, м; u_s – швидкість вітру на ефективній висоті джерела викидів, м/с; $V(x, h_e)$ – вертикальні умови розсіювання:

$$V(x, h_e) = e^{-\left(-0,5 \frac{(z - h_e(x, F_b))^2}{(\sigma_z(x))^2}\right)} + e^{-\left(-0,5 \frac{(z - h_e(x, F_b))^2}{(\sigma_z(x))^2}\right)} \quad (2)$$

де h_e – ефективна висота джерела викиду (висота середньої лінії факела над рівнем землі), м, яка визначається за різними формулами, в залежності від метеоумов та відстані від джерела; найбільш складним для аналізу є випадок, коли вимірювання проводяться на відстані від 500 до 3110 метрів від стаціонарного джерела викиду, а атмосфера за критерієм Песквілла відповідає класу «А» [8, 11], тоді висота h_e визначається за такою формулою:

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

де F_b – інтегральний параметр джерела, який визначається за такою формулою:

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

де g – швидкість вільного падіння = $9,8$ м/с²; v_s – швидкість виходу газів з джерела викидів, м/с; d_s – діаметр устя джерела викидів, м; T_s – температура газів, що викидаються в атмосферу, °С; T_a – температура навколишнього середовища, °С.

Розрахунок $\sigma_z(x)$ та $\sigma_y(x)$ проводиться за формулами:

$$\sigma_z(x) = ax^b \quad (5)$$

$$\sigma_y(x) = 456,11628 \cdot x \cdot \operatorname{tg}\{0,017453293[c - d \cdot \ln(x)]\} \quad (6)$$

де a , b , c , d – табличні значення.

У деяких випадках формула (2) має більш складний вигляд, але зупинимось саме на такому варіанті.

За реальних умов в оперативному режимі можна виміряти: метеопараметри T_a , u_s (у т. ч. їх усереднені значення), напрям вітру, значення $C(x, y, z)$ у довільних точках (хоча часто існує обмеження у вигляді границь території підприємства-власника цього джерела); оцінити геометричні розміри джерела (як правило, труби): діаметр d_s і висоту h_s . Невідомими

залишаються лише три параметри: Q , v_s та T_s . Однак, оскільки головним параметром, який слід оцінити, є параметр Q , то не так важливо знати значення параметрів v_s та T_s – достатньо знати значення інтегрального параметра F_b , що значно спрощує задачу.

Отже, слід розв'язати таку задачу: оцінити параметр Q за рядом вимірювань значень $C(x, y, z)$ у певних точках, значеннями метеопараметрів T_a , u_s і напрямку вітру та геометричними розмірами джерела (труби): діаметром d_s і висотою h_s . Додатковою задачею є розробка методики вибору точок для вимірювань $C(x, y, z)$, які дозволили б підвищити точність та достовірність оцінок Q .

2. Ідея методу

Ідея методу, який пропонується, полягає у тому, що за допомогою БПЛА спочатку проводиться аналіз метеоумов та інших параметрів. Умови задачі уточнюються і, з ними, уточнюється аналітичний вираз рівняння моделі та розрахункових співвідношень для усіх його параметрів, які розраховуються за різними методиками. Для цього виразу моделі за методом найменших квадратів здійснюється апроксимація моделі Гауса – будується система двох рівнянь з двома невідомими Q та F_b . Далі БПЛА здійснює вимірювання значень $C(x, y, z)$, і підстановка цих значень в систему рівнянь та її розв'язання дає значення Q . Усі ці розрахунки можна проводити оперативно. Для прискорення розрахунків варто наперед побудувати усі можливі варіанти систем рівнянь (для різних метеоумов та ін.) та запрограмувати алгоритми їх розв'язання.

Розробимо математичний апарат методу для одного з найбільш складних і, у той же час найбільш поширених, варіантів аналітичних виразів моделі Гауса для площинної задачі (за незмінної висоти z).

3. Розроблення математичного апарату методу

Розглянемо випадок, коли вимірювання проводяться на відстані від 500 до 3110 метрів від стаціонарного джерела викиду, висота z моделювання розсіювання незмінна, а атмосфера за критерієм Песквілла відповідає класу «А» [8, 11]. Тоді рівняння (1)–(6) матимуть вигляд [8]:

$$C(x, y) = \frac{a}{\sigma_y(x_i) \cdot \sigma_z(x_i)} \cdot e^{\left(-0.5 \frac{y_j^2}{(\sigma_y(x_i))^2} \right)} \cdot V(x_i, F_b) \quad (7)$$

де:

$$a = \frac{Q \cdot K}{2\pi \cdot u_s} \quad (8)$$

Для того щоб знайти невідомі нам значення Q та F_b за методом найменших квадратів, запишемо класичний критерій за цим методом,

знайдемо від нього відповідні частинні похідні (використаємо для цього модуль символічної математики пакету програм Mathcad) та прирівняємо до нуля, що дасть нам таку систему із двох рівнянь з двома невідомими:

$$\sum_i \sum_j \left[\left[C_{i,j} \cdot \frac{a}{\sigma_y(x_i) \cdot \sigma_z(x_i)} \cdot e^{\left(-0.5 \frac{y_j^2}{(\sigma_y(x_i))^2} \right)} \cdot V(x_i, F_b) \right] \cdot \frac{-0.5 \frac{y_j^2}{(\sigma_y(x_i))^2} \cdot V(x_i, F_b)}{\sigma_y(x_i) \cdot \sigma_z(x_i)} \right] = 0 \quad (9)$$

$$\sum_i \sum_j \left[\left[C_{i,j} \cdot \frac{a}{\sigma_y(x_i) \cdot \sigma_z(x_i)} \cdot e^{\left(-0.5 \frac{y_j^2}{(\sigma_y(x_i))^2} \right)} \cdot V(x_i, F_b) \right] \cdot a \cdot e^{-0.5 \frac{y_j^2}{(\sigma_y(x_i))^2}} \cdot \left[\frac{0.5 \cdot (z - h_e(x, F_b))}{(\sigma_z(x_i))^2} \cdot \sqrt[3]{F_b \cdot x_i} \cdot (z - h_e(x, F_b)) - \frac{0.5 \cdot (h_e(x, F_b))}{(\sigma_z(x_i))^2} \cdot \sqrt[3]{F_b \cdot x_i} \cdot (z + h_e(x, F_b))} \right] \right] = 0 \quad (10)$$

Інші варіанти моделі Гауса є простішими, наприклад, параметр h_e може не залежати від координати x та ін. Але алгоритм побудови системи рівнянь виду (9)–(10) для них такий самий. У разі коли координата z висоти є змінною, вираз рівнянь (9)–(10) ускладнюється незначно: додається ще одна сума (по, наприклад, індексу k), z замінюється на z_i , а C_{ij} – на $C_{i,j,k}$.

На практиці вимірювання проводиться часто не у регулярній сітці точок (коли результатом спостережень є квадратна матриця), а у вигляді одновимірного масиву значень (вектора) C у певних точках, тоді треба на початку рівнянь (9)–(10) записувати не дві суми, а одну, а значення x_i та y_i тоді слід не розраховувати з певним кроком, а задаватись векторами фіксованих значень, які відповідатимуть координатам місць вимірювання значень C .

4. Розроблення методики виконання спостережень для підвищення точності оцінювання параметрів

Аналіз співвідношень моделі (1)–(6) та характеру класичної функції Гауса показав, що для підвищення точності оцінювання параметрів стаціонарного джерела викидів доцільно спочатку визначити напрям, куди дме вітер, далі уздовж осі x , яка спрямована від місця виходу стаціонарного джерела, тобто точки з координатами $(0, 0, 0)$ у напрямі вітру, методом прямих послідовних вимірювань з БПЛА у цьому напрямку виміряти значення показника $C(x, y, z)$, знайшовши максимальне значення вмісту $C^*(x^*, y^*, z^*)$, а також декілька значень у напрямку, перпендикулярному осі x , тобто в напрямку осі y , рахуючи від точки з координатами (x^*, y^*, z^*) .

Були проведені дослідження того, яким чином кількість значень спостережень підвищує точність оцінювання параметра Q . Залежність відносної похибки ΔQ (%) від кількості значень i , відібраних уздовж осі x симетрично в обидва боки від точки з координатами (x^*, y^*, z^*) , показана на рис. 1.

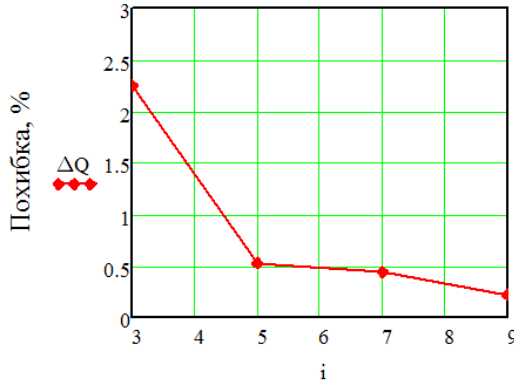


Рисунок 1 – Залежність відносної похибки ΔQ (%) від кількості значень $C(x,y,z)$ уздовж осі x за відсутності вимірювань уздовж інших осей

Варіант з $i = 5$ вимірюваннями уздовж осі x і різною кількістю вимірювань уздовж осі y , починаючи від точки з координатами (x^*, y^*, z^*) , показаний на рис. 2.

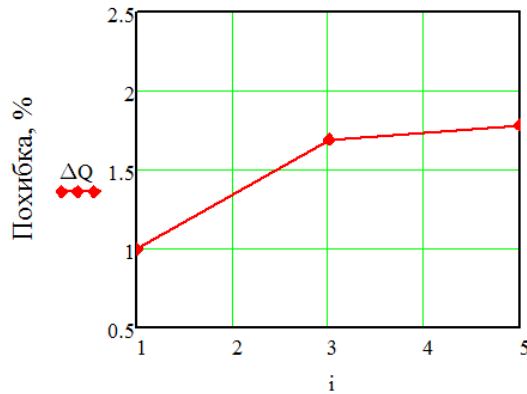


Рисунок 2 – Залежність відносної похибки ΔQ (%) від кількості значень $C(x,y,z)$ уздовж осі y , рахуючи від точки з координатами (x^*, y^*, z^*) , за умови, що уздовж осі x було здійснено 5 вимірювань

Однак дослідження показують, що якщо значення спостережень не досить точні (тільки до десятих чи сотих), тоді похибка за даними вимірювань уздовж осі y може зростати зі зростанням кількості врахованих вимірювань, оскільки виміряні значення не досить точно відтворюють характер зміни експоненціальних функцій.

Проведений аналіз показав, що для оцінювання параметра Q варто здійснювати спостереження тільки уздовж осі x і достатнім є 5 вимірювань, за

умов їх високої точності. У разі, якщо вимірювання проводяться не досить точно, тоді рекомендується зібрати та обробити 7-9 даних спостережень.

Отже, обґрунтовано, що оптимальною траєкторією спостережень для БПЛА буде траєкторія, подана на рис. 3.

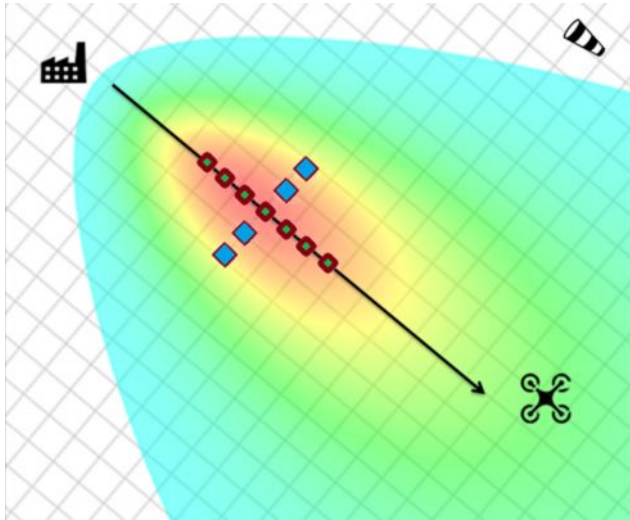


Рисунок 3 – Схематичне зображення траєкторії руху БПЛА через зону розсіювання біля стаціонарного джерела викидів (напрямок стрілки співпадає з напрямком вітру від цього джерела викидів)

Теоретично, БПЛА може пролетіти дану траєкторію двічі: спочатку знайти місце розташування точки з максимальною концентрацією, а потім виміряти відносно неї по 2 точки у різні боки уздовж осі x . Однак, сучасні вимірювальні засоби дозволяють досить швидко проводити вимірювання, тоді достатньо одного прольоту за траєкторією з рис. 3, а потім на основі аналізу отриманого вектора значень визначається максимальне та ті значення, що розташовані у цьому векторі до та після нього через певний крок у метрах.

Алгоритм застосування розробленого методу пропонуємо такий:

1. На висоті джерела забруднення h_s з використанням БПЛА провести вимірювання метеопараметрів T_a та u_s та напряму вітру. У разі, якщо у різних точках зони основного розсіювання вони будуть відрізнятися більше ніж на 15%, тоді – усереднити їх за усіма вимірюваннями.

2. Уточнити аналітичний вираз математичної моделі (1)–(6) та усіх її параметрів за поточних умов, у т. ч. метеорологічних.

3. Спорядити БПЛА мобільною ІВС із відповідним датчиком аналізу стану атмосферного повітря на задану домішку (оксиди вуглецю, вуглеводні типу CH_4 , C_2H_4 , оксиди сірки та азоту тощо).

4. Запустити БПЛА по лінії від джерела за напрямком вітру (рис. 3) для визначення місця найбільшої концентрації забруднюючих речовин та провести необхідні спостереження.

5. За допомогою методу найменших квадратів визначити невідомі параметри джерела викиду для заданої речовини.

6. За необхідності повторити пп. 3–5 для іншої речовини (домішки).

5. Приклад застосування методу

Розглянемо числовий приклад. Нехай висота труби джерела стаціонарного джерела викиду $h_s = 100$ м, швидкість вітру $u_{ref} = 5$ м/с, вимірювання проводились у точках з координатами (300, 0, 30), (400, 0, 30), (500, 0, 30), (600, 0, 30), (700, 0, 30) (в метрах), виміряна концентрація забруднюючої речовини $C = [2,07, 9,32, 10,54, 8,57, 6,28]$ мкг/м³ відповідно.

Для оцінки похибки дослідження потрібно вирішити пряму задачу (рис. 2) поширення домішок та порівняти її з отриманими результатами.

Проведена ідентифікація параметрів стаціонарного джерела викиду за запропонованим методом з використанням співвідношень (8)–(10) для 5 точок спостережень якості повітря та їх порівняння з розрахунковими значеннями показали, що похибка для Q склала 0,11%, що є дуже гарним результатом, а для F_b – 15%, що є результатом досить прийнятним, враховуючи невисоку точність вимірювального приладу на БПЛА (задані значення концентрації C виміряні тільки до сотих).

Приклад продемонстровано на рис. 4.

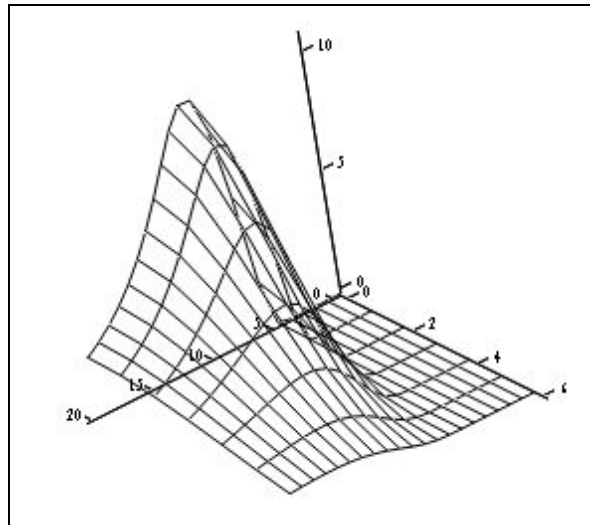


Рисунок 4 – Тривимірне зображення залежності концентрації забруднюючої речовини від відстані до джерела викиду

На рис. 4 наведена чверть (сектор в 90 градусів) поля концентрацій домішки навколо стаціонарного джерела викиду, розрахованого у пакеті програм Mathcad за моделлю Гауса (1)–(6) з ідентифікованими параметрами Q та F_b . Уздовж горизонтальних осей відкладено не відстань в метрах, а кількість кроків до місць, в яких визначались концентрації, а по вертикальній осі – концентрація забруднюючої речовини C , мкг/м³.

Висновки

1. Розроблено метод оцінювання параметрів стаціонарних джерел викидів на основі моделі Гауса за даними оперативного моніторингу зони розсіювання з

використанням БПЛА, що дозволяє достатньо точно розв'язати зворотну задачу моделювання розсіювання домішок в атмосфері за мінімальної кількості даних спостережень для використання в екологічному контролі викидів підприємств за даними оперативного моніторингу. Наведено математичний апарат методу для найбільш складного двовимірного варіанта рівняння за відповідних умов, у т. ч. метеорологічних.

2. Запропоновано алгоритм методу та оптимальну траєкторію спостережень з БПЛА. Проведений аналіз показав, що для застосування методу варто зробити не менше 7 спостережень на висоті джерела забруднення уздовж осі, спрямованої уздовж напрямку вітру від місця виходу стаціонарного джерела викиду, у місцях, розташованих симетрично відносно місця з найбільшим вмістом у повітрі забруднюючої речовини. Наведено числовий приклад, який довів ефективність та достатню точність методу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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. – С. 59–61.
2. Meghea I., Mihai M., Demeter T. Gauss dispersion model applied to multiple punctual sources from an industrial platform // International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & mining Ecology Management. – 2013. – Vol. 1. – P. 497.
3. Громова О.В. Аналіз моделей поширення домішок в атмосфері від стаціонарних джерел // О.В. Громова – Наук. праці УкрНДГМІ, 2004. – Вип. 253. – С. 173.
4. Chaudhry V. Arduair: Air Quality Monitoring // International Journal of Environmental Engineering and Management. – 2013. – P. 639–646.
5. Juan S. et al. An Industriad air pollution dispersion system based on Gauss dispersion model [J] // Environmental Pollution & Control. – 2005. – Vol. 7. – P. 11.
6. Мокін В.Б. 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. – Вінниця. – 2015. – № 5. – P. 116–122.
7. Mokin V.B. Method and technology for monitoring and forecasting the atmospheric air condition by means of universal information-measuring system with the application of mobile devices / V.B. Mokin, D.Y. Dziuniak, K.O. Bondaletov, V.V. Oleynik // Scientific Works of Vinnytsia National Technical University. – 2015. – № 4. – Режим доступу: <http://works.vntu.edu.ua/index.php/works/article/download/455/457>
8. Zannetti P. Air pollution modeling: theories, computational methods and available software. – Springer Science & Business Media, 2013. – P. 425.
9. Turner D.B. Workbook of atmospheric dispersion estimates: an introduction to dispersion modeling. – CRC press, 1994. – P. 192.
10. Jorgensen B. The theory of dispersion models. – CRC Press, 1997. – P. 237.
11. 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.

Стаття надійшла до редакції 18.11.16.