

УДК 539.04

ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ ПРОМИСЛОВИМИ ПІДПРИЄМСТВАМИ

І. О. Камаєва, Л. Я. Савчук, Я. М. Семчук, О. М. Лев, Л. І. Камаєва

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422)42098,
e-mail: bzhd@nung.edu.ua*

Наведено класифікацію промислових викидів за ступенем дисперсності. Розглянуто методи досліджень турбулентної дифузії домішок у повітряному середовищі. Рекомендовано рівняння для визначення турбулентної седиментації. Побудовано математичну модель, що описує рух частинок у повітрі в залежності від їх густини та розміру з урахуванням числа Рейнольдса.

Ключові слова: атмосферний пил, аерозоль, турбулентна дифузія, математична модель, число Рейнольдса.

Приведена классификация промышленных выбросов по степени дисперсности. Рассмотрены методы исследований турбулентной диффузии примесей в воздушной среде. Рекомендованы уравнение для определения турбулентной седиментации. Построена математическая модель, описывающая движение частиц в воздухе в зависимости от их плотности и размера с учетом числа Рейнольдса.

Ключевые слова: атмосферная пыль, аэрозоль, турбулентная диффузия, математическая модель, число Рейнольдса.

A classification of industrial pollution on the degree of dispersion is present. Methods for the study of turbulent diffusion in the air is consider. Recommended equation for the turbulent sedimentation. Constructed a mathematical model describing the motion of particles in the air, depending on their density and size with the Reynolds number.

Keywords: atmospheric dust, spray, turbulent diffusion, the mathematical model, the Reynolds number.

Зростаючий вплив на навколишнє середовище антропогенної діяльності пов'язаний, в першу чергу, з різким збільшенням потрапляння забруднюючих речовин у атмосферу, поверхневі і підземні води, ґрунт. Найбільш масштабним й значним є попадання в навколишнє середовище великої кількості хімічних сполук, раніше не властивих йому, зокрема газоподібних та аерозольних забруднювачів. Прогресує і накопичення вуглекислого газу в атмосфері. Подальший розвиток цього процесу буде посилювати небажану тенденцію в сторону підвищення середньорічної температури на планеті.

Атмосферний пил і аерозолі можуть мати як природне, так і антропогенне походження. Атмосферний пил і дим антропогенного походження утворюються в результаті промислових викидів. Промислові викиди класифікують за ступенем дисперсності: крупний пил (розмір частинок > 10 мкм), дрібний пил (розмір частинок від 1 до 10 мкм) і дим (розмір частинок < 1 мкм); за станом: зважені частинки у повітрі носять назву аерозоль, а ті, що осіли на поверхню землі – аерогель. При спалюванні палива утворюються пил, сірчистий ангідрид, двоокис вуглецю, водяна пара, окисли різних елементів (від літію до урану), які навіть після газоочисних споруд потрапляють в атмосферу. Одночасно з'являються тверді відходи у вигляді золи і шлаків, які складують, як правило, на поверхні землі.

На більшій частині земної поверхні активність аеротехногенного забруднення обмежується першими двома кілометрами атмосфери. Рівень забруднення повітря залежить не лише від обсягу викидів промислових підприємств і автотранспорту, а й від метеорологічних умов. Жаркі, безвітряні літні дні або безвітряна погода восени та взимку, коли майже немає циркуляції повітря, сприяє утворенню застійних явищ біля поверхні землі й різкому зростанню концентрацій шкідливих домішок, утворенню смогу на вулицях з напруженим автомобільним рухом. Більша частина забруднювачів міститься у відхідних газах, що утворюються в результаті спалювання палива, які,

маючи набагато більшу температуру та меншу густину за оточуюче повітря, піднімаються угору. Відтак ці викиди перемішуються з оточуючим повітрям, внаслідок чого їх температура значно зменшується, а підймання сповільнюється. Час перебування частинок в атмосфері, а отже і їх розповсюдження по земній поверхні, залежить не лише від їх розмірів і густини, а й від швидкості руху вітрів, а також від того, на яку висоту частинки були підняті. Крупні частинки, зазвичай, осідають впродовж годин або діб, проте навіть вони можуть переноситись на сотні кілометрів, якщо спочатку були підняті на достатній висоті.

Ті частинки, які за своєю поведінкою схожі до частинок газів (діаметр 1 мкм і менше), значно меншою мірою підпадають дії атмосферних опадів. Час їх перебування в нижніх шарах атмосфери складає 10-20 днів.

Пил і аерозолі, досягнувши верхніх шарів тропосфери, можуть проникнути і у стратосферу під дією горизонтальних повітряних потоків між тропосферою і стратосферою.

Атмосферний пил і аерозолі, накопичуючись над містами і промисловими зонами, мають лише регіональне значення. Вони утворюють згущення над первинними джерелами, проте за сильного руху повітряних мас ці забруднення можуть розноситись у підвітряну сторону.

Ніяка очистка не взмозі видалити всі забруднювачі із промислових повітряних викидів. Проте навіть невелика частка матеріалу, забруднюючого викид (10%, 1% або навіть 0,1%), залишаючись у відхідних газах, може складати суттєво велику кількість.

В ідеальному випадку контамінанти повинні випускатися в атмосферу з концентраціями, які можуть розглядатися як зовсім нешкідливі. Часто це здійснюється шляхом розсіювання з допомогою високих труб, які виводять контамінанти в атмосферу на висоті, що забезпечує їх розбавлення до контакту з поверхнею землі [1].

Основною причиною розсіювання шкідливих речовин в атмосфері є турбулентна дифузія та гравітаційна седиментація.

Дослідження проблем атмосферної дифузії має тривалу історію, однак його результати застосовуються до питань забруднення атмосфери порівняно недавно.

В 20-30 роках ХХ століття створилось уявлення про те, що у багатьох випадках перенесення тепла і вологи в приземному шарі атмосфери можна наближено розглядати як розповсюдження пасивної домішки та досліджувати ці процеси на основі одних і тих же диференціальних рівнянь.

Зв'язок між результатами досліджень атмосферної дифузії домішок та закономірностями тепло- і вологообміну в приземному шарі повітря безпосередньо проявляється і під час розв'язування відповідних задач. Так, отримані у ході розв'язування диференціальних рівнянь тепло- і вологообміну функції Гріна являють собою функції розподілу домішок, які розповсюджуються в атмосфері від джерела за певних крайових умов.

Важливе значення мало встановлення виду рівнянь, які описують атмосферну дифузію. Для опису процесу атмосферної дифузії використовувались рівняння параболічного виду, що є узагальненням відомого рівняння Фіка.

Вже у перших працях, присвячених проблемам атмосферної дифузії, намітилися два підходи до дослідження розповсюдження домішок в приземному шарі атмосфери. Один підхід, що спирається на роботу А.Роберса, базується на розв'язуванні рівняння турбулентної дифузії з постійними коефіцієнтами. Інший підхід був розвинутий О.Сеттеном і полягав у використанні формул для визначення концентрації домішок від джерела, отриманих статичним шляхом.

У вітчизняних роботах, як правило, розглядаються рівняння турбулентної дифузії зі змінними коефіцієнтами. Такий шлях дослідження є універсальним, оскільки дає змогу розв'язувати задачі для різних джерел, характеристик середовища, крайових умов. До робіт, присвячених питанню турбулентної дифузії у даному напрямку, можна віднести праці Л.І. Сєдова [2], А.Н. Колмогорова [3], А.М. Обухова [4], Л.Г. Лойцяньського [5], В.М. Ельтермана [6], В.В. Буяцького [7].

З часом з'явилися нові вимоги до методів дослідження турбулентної дифузії. Виникла необхідність у вивченні турбулентних потоків на великих висотах, дослідження питань розсіювання домішок від джерел на великих відстанях, врахування великого числа параметрів. Етапи еволюції методів дослідження відображені в роботах А.М. Самарського [8,9], Н.Л. Бизової [10], М.Є. Берлянда [11].

Турбулентна дифузія, як зауважив І.О. Хінце [12], – це невпорядкований рух, що виникає в газоподібних або крапельних рідинах, коли вони обтікають непроникні поверхні, або коли сусідні потоки однієї і тієї ж рідини знаходяться поруч або проникають один в інший. Наголошується, що

у верхній частині приземного шару спостерігається крупномасштабна турбулентність, що викликана взаємним впливом різного напрямку руху повітря, а в нижній частині – турбулентність порівняно дрібномасштабна, що генерується, в основному, обтіканням вітром будівель та нерівностями поверхні землі.

Отже, щоб зрозуміти хід процесів перенесення та дифузії забруднень в атмосфері, створюються математичні моделі, мета використання яких полягає в наступному:

- а) передбачити рівень концентрацій в оточуючому повітрі, який обумовлений існуючими джерелами;
- б) встановити максимально допустиму інтенсивність джерела, яка дає змогу підтримувати безпечний рівень вмісту забруднень в оточуючому повітрі;
- в) оцінити вплив на концентрацію джерел забруднень, які вважатимуться новими, або зміненими джерел забруднень.

Наприклад, математичною моделлю для прогнозування перенесення та розсіювання забруднень в атмосфері є модель ящика [13]. При створенні цієї моделі вважається, що досліджувану площу можна апроксимувати прямокутником. Атмосфера над цією площею розміщується в гіпотетичний ящик, висота якого над рівнем землі відповідає висоті шару змішування. Сторони ящика або визначаються суттєвими рисами геологічної будови місцевості, такими, як гірські ланцюги, або розташовуються так, щоб дві його сторони були перпендикулярними до переважаючого напрямку вітрів. У більш досконалих моделях ящик ділиться на велике число менших ящиків, квадратні основи яких розміщують на поверхні землі і висота яких співпадає з висотою шару змішування або з деякою частиною висоти, так що атмосфера представляється у вигляді поставлених одна на одну комірок над кожною квадратною основою, а великий ящик з досліджуваною площею в якості основи ділиться на велике число маленьких комірок як в вертикальному, так і в горизонтальному напрямках.

У найпростішому застосуванні багатоящикової моделі дотримуються такого порядку:

1. Виконують точний підрахунок джерел забруднень з врахуванням їх інтенсивності та місцезнаходження.
2. Інтенсивності джерел у кожній малій комірці підсумовуються для визначення наближеного середнього значення концентрації в малій комірці.
3. Для знаходження траєкторії руху та розсіювання забруднень з кожної комірки використовують дані про вітер та оцінки стабільної атмосфери.
4. Результируюча середня концентрація забруднень в будь-якій малій комірці як функція часу оцінюється як сума усередненої інтенсивності її власних джерел і викидів, що переносяться вітром від інших малих комірок.

Врахування хімічних реакцій та інших процесів перетворення під час перенесення, які діють або як джерела, або як стоки забруднень, являють собою приклад деяких удосконалених математичних моделей, які застосовуються останнім часом [13-15].

Під дією турбулентної дифузії забруднювачі осідають на поверхню землі. Цей процес можна назвати турбулентною седиментацією і математично її можна описати у вигляді:

$$D = K \left(\frac{dC}{dh} \right), \quad (1)$$

де K – коефіцієнт турбулентної дифузії; $\frac{dC}{dh}$ – градієнт концентрації (зменшення концентрації речовини у вертикальному напрямку до поверхні землі).

Осіданню частинок в атмосфері (у випадку штилю) протирічить броунівський рух, що прагне рівномірно розподілити частинки у певному об'ємі. Зауважимо, що чим менші частинки, тим сильніше проявляється броунівський рух і дифузія. Внаслідок броунівського руху, з одного боку, діє сила тяжіння, а з іншого – встановлюється седиментаційно-дифузійна рівновага, яка характеризується повним рівноважним розподілом частинок за висотою. Цей розподіл описується рівнянням Лапласа-Перрене [16]:

$$\ln \frac{C_1}{C_2} = \frac{mg(h_2 - h_1)(\rho - \rho_0)}{K \cdot T\rho}, \quad (2)$$

де C_1 і C_2 – концентрації частинок на висоті h_1 і h_2 ; m – маса частинки; T – температура; ρ і ρ_0 – густина частинок і середовища відповідно; K – константа Больцмана; g – прискорення сили тяжіння.

Зауважимо, що зменшення концентрації проявляється у тому випадку, якщо речовина має суттєву швидкість осідання, тобто швидко поглинається ґрунтами. Тоді в результаті седиментації концентрація речовин біля поверхні землі зменшується порівняно з верхніми шарами повітря. Це явище зазвичай можна спостерігати до висоти декількох метрів. Якщо припустити, що збільшення концентрації шкідливих речовин відбувається рівномірно (лінійно), то тоді градієнт концентрації має такий вигляд:

$$\frac{dC}{dh} = \frac{(C_1 - C_2)}{(h_1 - h_2)}. \quad (3)$$

За даними [16], при малих розмірах шкідливих частинок механізм седиментації підпорядковується турбулентній дифузії, а при більших розмірах частинок переважає гравітаційна седиментація, і якщо діаметр частинок переважає 10 мкм, то гравітація починає відігравати значну роль.

На сферичну пиловидну частинку з радіусом r і густиною ρ , що вільно осідає у дисперсійному повітряному середовищі, густина якого ρ_0 , діє сила тяжіння f , яка дорівнює власній вазі частинки:

$$f = \frac{4}{3}\rho r^3(c - c_0)g, \quad (4)$$

де g – прискорення сили тяжіння; r – радіус частинки.

Під впливом сили тяжіння пиловидна частинка у повітряному середовищі рухається рівноприскорено. Водночас із силою тяжіння на частинку діє сила опору середовища F , яка за законом Стокса дорівнює:

$$F = 6 \pi r \eta v, \quad (5)$$

де v – швидкість седиментації; η – динамічна в'язкість повітряного середовища.

Зауважимо, що спочатку частинка рухається прискорено, бо за малих швидкостей сила тяжіння перевищує силу тертя. При збільшенні швидкості руху сила тертя зростає і у певний момент урівноважує силу тяжіння, внаслідок чого частинка починає рухатися із сталою швидкістю:

$$\frac{4}{3}\rho r^3(c - c_0)g = 6 \pi r \eta v. \quad (6)$$

З рівняння (6) знаходимо швидкість гравітаційної седиментації:

$$v = \frac{2g(\rho - \rho_0)r^2}{9\eta}. \quad (7)$$

Отже, швидкість сферичної частинки, яка вільно рухається під впливом сили тяжіння, прямо пропорційна квадрату її радіуса і обернено пропорційна в'язкості дисперсійного середовища.

Відмітимо, що перехід аерозолів у пилоподібні частинки лежить у межах 0,01-0,1 мм (10-100мкм).

Найбільшу цікавість викликає область розміру частинок у межах від 0,01 до 10 мкм, оскільки до неї відноситься велика частина аерозолів. Чим менший розмір частинок аерозолі, тим час перебування її у повітрі буде більшим і тим більшою буде відстань, на яку ці частинки можуть бути перенесені.

На швидкість розповсюдження пилового забруднення впливає число Рейнольдса, яке враховано нами при розв'язуванні практичної задачі.

На суміш, яка знаходиться в трубі висотою h діє імпульс S , під дією якого частинки суміші вилітають вертикально угору з початковою швидкістю V_0 (рис. 1). Треба визначити дальність польоту L частинки суміші під дією горизонтального вітру зі швидкістю V_6 .

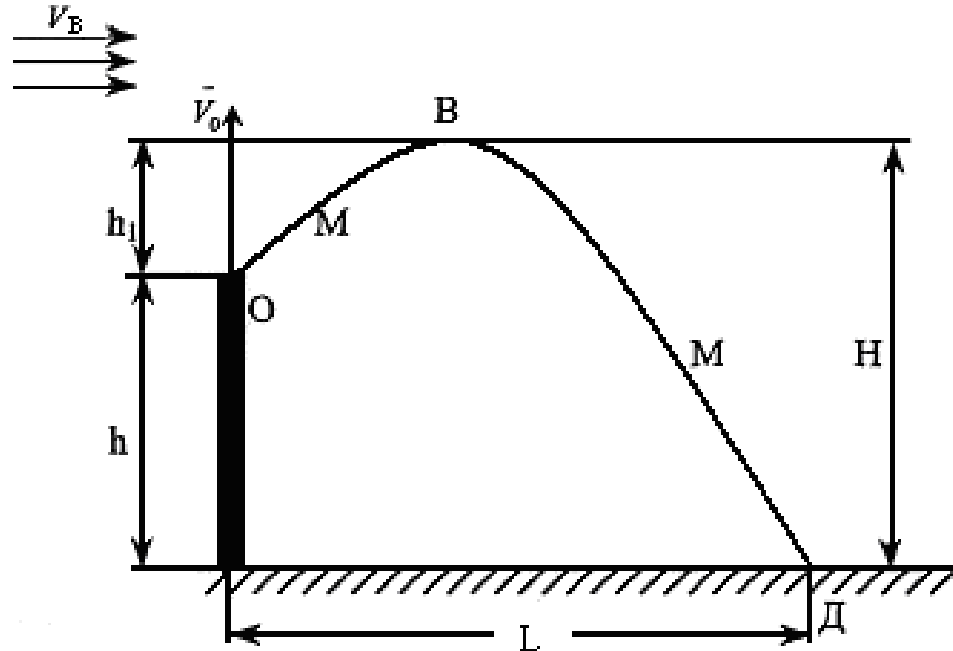


Рисунок 1 – Траєкторія польоту частинок

Результати розрахунку приведені в [17]. Так час підйому t_1 частинки до точки B і висота h_1 дорівнюють

$$t_1 = \frac{ca}{g}; \quad h_1 = -\frac{c^2}{g} \ln \cos a, \quad (8)$$

де c – швидкість рівномірного падіння частинки у повітрі (швидкість вилітання [18]):

$$c = \sqrt{\frac{4\rho g d}{3\rho_n C_m}}. \quad (9)$$

Тут приймається, що тверда частинка має форму кулі з діаметром d , ρ – густина частинки, ρ_n – густина повітря, g – прискорення вільного падіння, C_m – безрозмірний коефіцієнт опору тиску, який залежить від форми частинки і числа Рейнольдса.

Час падіння t_2 з висоти $H = h + h_1$ дорівнює

$$t_2 = \frac{H}{c} + \frac{c}{g} \ln 2. \quad (10)$$

Припустивши, що в горизонтальному напрямку частинка рухається рівномірно зі швидкістю вітру V_6 маємо

$$L = V_6 (t_1 + t_2). \quad (11)$$

Відмітимо, що на основі дослідних даних Л.І.Седова для куль, які приводяться в [18] при великих числах Рейнольдса $Re \geq 10000$ значення C_m не залежить від Re і є величина стала. Таке припущення відносно St було зроблено в [17]. Ціллю даної роботи є уточнити одержані результати в [17]. Для цього розглянемо конкретний приклад. Поставимо таку задачу.

Визначити дальність польоту частинки діаметром $d=2 \cdot 10^{-3}$ м, якщо густина частинки $\rho=3.36 \cdot 10^3$ кг/м³, висота труби $h=120$ м, швидкість вітру $V_B=5$ м/с, початкова швидкість частинки $V_0=24.3$ м/с, температура повітря $t=20^\circ$, густина повітря $\rho_n=1.2$ кг/м³, кінематична в'язкість повітря $\nu=0.151 \cdot 10^{-4}$ м²/с.

1 етап. Рух частинки угору від точки 0 до В. Так як рух угору є короткочасний, то приймаємо, що середня швидкість руху угору $V_{cp}=0.5V_0=0.5 \cdot 24.3=12.15$ м/с.

Визначаємо число Рейнольдса Re [18]

$$R_e = \frac{V_{cp} \cdot d}{\nu} = \frac{12.15 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{0.151 \cdot 10^{-4}} = 1609.3 \text{ м/с.}$$

За графіком наведеним [18], цьому значенню відповідає $C_T=0.46$. Тоді згідно з (8), (9)

$$c = \sqrt{\frac{4\rho g d}{3\rho_n C_m}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3.36 \cdot 10^3 \cdot 9.81 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 1.2 \cdot 0.46}} = 12.6 \text{ м/с,}$$

$$a = \arctg \frac{V_0}{c} = \arctg \frac{24.3}{12.6} = \arctg 1.92 = 1.08,$$

$$t_1 = \frac{ca}{g} = \frac{12.6 \cdot 1.08}{9.81} = 1.4 \text{ с,}$$

$$h_1 = -\frac{c^2}{g} \ln \cos a = -\frac{12.6^2}{9.81} \cdot (-0.756) = 12.2 \text{ м,}$$

$$H = h + h_1 = 132.2 \text{ м.}$$

2 етап. Рух вниз від точки В до Д. у першому наближенні приймаємо $C_m=0.47$, що відповідає числу Рейнольдса для кулі $Re=1000$,

$$c = \sqrt{\frac{4c g d}{3\rho_n C_T}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3.36 \cdot 10^3 \cdot 9.81 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 1.2 \cdot 0.47}} = 12.48 \text{ м/с.}$$

$$\text{Уточнюємо число Рейнольдса } R_e = \frac{C \cdot d}{\nu} = \frac{12.48 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{0.151 \cdot 10^{-4}} = 1652.9.$$

За графіком наведеним [18] $C_m \cong 0.46$, тоді $C=12.6$ м/с.

Так як в другому наближенні зміна швидкості витання незначна, то процес наближень припиняємо і остаточно приймаємо $c=12.6$ м/с. Згідно з (10) та (11):

$$t_2 = \frac{H}{C} + \frac{C}{g} \ln 2 = \frac{132.2}{12.6} + \frac{12.6}{9.81} \cdot 0.693 = 11.38 \text{ с,}$$

$$L = V_e (t_1 + t_2) = 5(1.4 + 11.38) = 63.9 \text{ м.}$$

Відмітимо, що в механіці коефіцієнт опору тиску, а значить і коефіцієнт Ейфеля $K=0.5 \cdot C_m \cdot \rho_n$ вважається величиною сталою. Так для кулі, яка рухається в повітрі $K=0.24$ кг/м³. Слід зауважити, що це правильно для кулі з числом Рейнольдса $Re > 1000$. Дійсно, коли Re збільшується від 1000 до ∞ , коефіцієнт C_m дуже повільно зменшується від 0.47 до 0.22. Це видно з графіка, приведену в [18] і тому можна вважати, що $C_T = \text{const}$. Так для частинки з діаметром $d=2 \cdot 10^{-3}$ м, густиною $\rho=3.36 \cdot 10^3$ кг/м³ $C_m=0.46$, а $K=0.276$ кг/м³. При збільшенні діаметру частинки зменшується коефіцієнт Ейфеля наближаючись до величини $K=0.24$ кг/м³.

Отже можна зробити висновок:

1) Для частинок з діаметром $d \geq 2 \cdot 10^{-3}$ м, можна вважати, що $C_T = \text{const}$ і $K=0.24$ кг/м³ і розрахункові формули за формулами (8-11).

2) Для частинок з діаметром $d < 2 \cdot 10^{-3}$ м розрахункові формули за формулами (8-11), але коефіцієнт C_T визначається в залежності від числа Рейнольдса.

Література

1. Белов С.В. Охрана окружающей среды [Текст] / С.В. Белов. – М.: Высш. шк., 1991. – 320 с.
2. Седов Л.М. Методы подобия и размерность в механике [Текст] / Л.М. Седов. – М.: Физматгиз, 1972. – 440 с.
3. Колгоморов А. Н. К вырождению изотропной турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости / А. Н. Колгоморов. – ДАН СССР, 1941. – Т.31. - №6. – С. 538-541.
4. Обухов А.Н. О распределении энергии в спектре турбулентного потока / А.Н. Обухов. // Изв. АН СССР, 1941. – Т.5. – №4. – С. 453–4662. Сер. геогр. и геофиз.
5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкостей газов [Текст] / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1973. – 906 с.
6. Эльтерман В.М. Охрана воздушной среды на химических и нефтехимических предприятиях [Текст] / В.М. Эльтерман. – М.: Химия, 1985. – 160 с.
7. Бруацкий В.В. Турбулентные стратифицированные струнные течения [Текст] / В.В. Бруацкий. – К.: Наукова думка, 1986. – 170 с.
8. Самарський А.А. Численные методы решения задач конвекции – диффузии [Текст] / А.А. Самарський, П.Н. Вабищевич. – М.: Эдитория УРСС, 1999. – 248 с.
9. Самарський А.А. Методы решения сеточных уравнений [Текст] / А.А. Самарський, Е.С. Николаев. – М.: Наука, 1987. – 588 с.
10. Бызова Н.Л. Экспериментальное исследования атмосферной диффузии и расчёты рассеивания примеси [Текст] / Н.Л. Бызова, Е.К. Гаргер, В.И. Иванов. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 280 с.
11. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы [Текст] / М.Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.
12. Хинце И.О. Турбулентность, её механизм и теория [Текст] / И.О. Хинце. – М.: Физматизд., 1963. – 680 с.
13. Хинкли Э.Д. Лазерный контроль атмосферы [Текст] / Э.Д. Хинкли. – М.: Мир, 1979. – 416 с.
14. Браун Дж.В. Методы Монте-Карло. Современная математика для инженеров / Дж.В. Браун; ред. Э.Р. Беккенбаха. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1958. – С. 275-304.
15. Гельфонд А.О. Исчисление конечных разностей [Текст] / А.О. Гельфонд. – М.: Наука, 1967. – 340 с.
16. Хорват Л. Кислотный дождь / Л. Хорват; ред. Ю.Н. Михайловского. – М.: Стройиздат, 1990. – 80 с.
17. Камаєва І.О. Математична модель розсіювання викидів промислових підприємств / І. О. Камаєва, Я. М. Семчук, Л. І. Камаєва, О. М. Лев // Вест. Херсон. нац. техн. ун-та. – 2005. – Вып. 2(22). – С. 143-147.
18. Константінов Ю. М. Технічна механіка рідини і газу: підручник / Ю.М. Константінов, О.О. Гіжа. – К.: Вища шк., 2002. – 277 с.
4. Николаи Е.Л. Теоретическая механика / Е.Л. Николаи. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. л-ры, 1958. – 484 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
10.06.12*

*Рекомендована до друку оргкомітетом
міжнародної науково-технічної конференції
“Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу”,
яка відбулася 15-18 травня 2012 р.*