

УДК 355.424

В. М. Бацамут, Ю. П. Бабков, С. Д. Черкашин

ВИБІР МОДЕЛІ РОЗСПИВАННЯ ГАЗОПОДІБНИХ РЕЧОВИН ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗМІРІВ ЗОН УРАЖЕННЯ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ СПЕЦІАЛЬНИХ ЗАСОБІВ СЛЬОЗОТОЧИВОЇ ДІЇ

У статті на основі аналізу відомих робіт здійснено вибір та обґрунтування моделі розсіювання газоподібних речовин, яка найбільш адекватно відображає поширення аерозольної хмари, утвореної спеціальним засобом “Терен-6”. Наведено детальний опис моделі “важкого газу”, що застосовувалась під час імітаційного моделювання досліджуваних процесів.

Постановка проблеми. Під час виконання службово-бойових завдань внутрішні війська МВС України і підрозділи органів внутрішніх справ мають право застосовувати спеціальні засоби сльозоточивої дії. Порядок їх застосування регламентований Законом України “Про міліцію” та діючою Постановою Ради Міністрів УРСР від 27.02.1991 р. № 49 зі змінами, внесеними відповідними постановами Кабінету Міністрів України.

Одним із спеціальних засобів, що відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України від 4 серпня 1997 р. № 829 “Про внесення змін до Правил застосування спецзасобів під час охорони громадського порядку в Україні”, знаходиться на озброєнні внутрішніх військ МВС України, є ручна газова граната “Терен-6” виробництва НПО “Еколог” м. Київ. Даний спецзасіб є пристроєм миттєвого розпилення аерозолі. Активною речовиною у ньому, що саме і впливає на людину, є комплексна речовина БМ-2 (морфолід пералгонової кислоти, поєднаний з речовиною CS).

Саме ці особливості даного спецзасобу і відсутність практичних рекомендацій щодо його комплексного застосування за різних класів стійкості атмосфери обумовлюють необхідність вибору і обґрунтування типу моделі розсіювання газоподібних речовин з метою оперативного розрахунку розмірів зон ураження для наявних у момент проведення спеціальної операції метеорологічних умов.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вибір і аналіз моделей, що адекватно описують процеси розсіювання і поширення різних речовин в атмосфері, розглянуто вітчизняними та зарубіжними авторами в роботах [1...7]. Метою вибору моделей, в основному, була необхідність детального опису процесів забруднення навколишнього середовища та оцінювання впливу на біологічне середовище. Використання таких моделей у військовій справі потребує, з одного боку, забезпечення прийнятної точності опису процесів, а з іншого – простоти та оперативності їх застосування. У відомих публікаціях не відображені моделі, які б описували процеси поширення аерозольної хмари, створеної внаслідок застосування спеціального засобу сльозоточивої дії, що має невелику масу активної речовини.

Мета статті – обґрунтувати модель розсіювання газоподібних речовин, що адекватно відображає поширення аерозольної хмари, утвореної спеціальним засобом “Терен-6”, яка дозволяє здійснювати оперативні розрахунки зон ураження, створюваних під час застосування однієї одиниці такого спеціального засобу.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо три основні підходи до кількісного опису процесів розсіювання викиду газоподібних речовин в атмосферу [8]:

- 1) класичні гаусові моделі розсіювання (дисперсійні моделі);
- 2) моделі розсіювання, що базуються на інтегральних законах збереження або в хмарі в цілому (залповий викид), або в поперечному зрізі хмари (тривалий викид) – моделі розсіювання важкого газу;
- 3) моделі, побудовані на чисельному рішенні системи рівнянь збереження в їхньому оригінальному вигляді – моделі прямого чисельного моделювання.

Гаусові моделі свою назву одержали від відомого розподілу Гауса, що лежить в основі математичного опису просторово-часової зміни концентрації газу [2...7]. Для замикання гаусових моделей використовують емпіричні коефіцієнти, що описують атмосферну турбулентність. Такі моделі враховують тільки два процеси, що відбуваються з тривалим викидом в атмосфері: переміщення в полі вітру й розсіювання за рахунок атмосферної турбулентності. Природно, що і прийнятну точність вони дають у тих зонах, де домінують зазначені процеси: або на великому віддаленні від місця викиду, або у всьому діапазоні відстаней, але при слабкому викиді.

Однак поведінка реального викиду набагато складніше, ніж це передбачається в гаусових моделях. На початковій стадії істотну роль відіграють наведені струмені різної конфігурації хмари,

що розширюються з часом і значна густина речовини в момент викиду. Останнє особливо важливо, у зв'язку із чим був уведений спеціальний термін – “важкий газ”, для опису якого були розроблені спеціальні моделі розсіювання важкого газу. Таким чином, дані моделі розсіювання враховують процеси дифузії всередині ядра хмари і за його межами. Використовувати такі моделі можливо як для миттєвих викидів, так і для тривалих.

Найбільш відомими реалізаціями моделей розсіювання важкого газу є методика Всесвітнього банку [9], звід методик HGSYSTEM [10], методики, створені за підтримкою провідних закордонних організацій TNO (Голландія) [11], DNV Technica (Норвегія) [12]. У Російській Федерації така модель прописана у державному стандарті Р 12.3.047-98.

Необхідність виділення в спеціальний клас моделей розрахунку процесів розсіювання важкого газу обумовлена тим, що більшість викидів у початковий момент часу мають густину більшу, ніж густина повітря [4]. Її можуть обумовлювати різні причини (або їх сполучення):

- значна молекулярна вага речовини, наприклад, вуглеводневі сполуки з молярною вагою більше 29,5 г/моль (молярна вага повітря): пропан, пари бензину, хлор, сірководень і т. ін., за нормальних умов є важкими газами;

- низька температура, наприклад, метан за нормальних умов, має густину меншу, ніж густина повітря, однак при температурі кипіння його густина стає більше густини повітря, і розсіювання випару метану варто розраховувати за моделлю важкого газу;

- наявність аерозолів, наприклад аміак, і за нормальних умов, і при температурі кипіння є легким газом, тому його суміші з повітрям мають густину меншу ніж у повітря, однак наявність у суміші краплинних включень може призвести до того, що не тільки без повітря, але й при підмішуванні повітря в процесі розсіювання, суміші, що утворюються при цьому, будуть важкими газами;

- протікання у викиді хімічних реакцій, які призводять до утворення важкого газу.

Викиди важкого газу під дією сили тяжіння швидко осідають на землю, у результаті чого утворюються невисокі, але протяжні хмари (висота яких становить до декількох метрів, а поперечний розмір – до декількох десятків і навіть сотень метрів). У результаті площа поверхні, що вкривається хмарою, виявляється на порядок вище площі, яка б була вкрита, якби хмара не мала густину більше густини повітря. Більше того, при викидах важкого газу має місце поширення хмари проти вітру, що було б відсутнє, якби газ був нейтральним.

Створювані під дією сили тяжіння хмари важкого газу мають більшу поверхню обміну з атмосферою. У результаті, незважаючи на те, що питома швидкість підсмоктування зменшується зі збільшенням густини хмари, загальна маса повітря, що втягується в хмару, істотно зростає порівняно з хмарами нейтрального поширювання. Тобто, дія сили ваги в остаточному підсумку призводить до більш швидкого розсіювання важкого газу ніж нейтральних викидів.

Саме необхідність урахування таких ефектів з метою істотного поліпшення прогностичних можливостей є головною причиною масового переходу в інших країнах від моделей гаусового типу до моделей розсіювання важкого газу.

Як і всі моделі, модель розсіювання важкого газу також має низку обмежень. Насамперед, це стосується урахування рельєфу місцевості й будівель у містах. Урахувати ці фактори дозволяють моделі, засновані на чисельному рішенні повної системи рівнянь газодинаміки.

Перевагами таких моделей є [2]:

- детальний розрахунок атмосферної радіації, яка визначає добові зміни температури, разом з детальними розрахунками турбулентності та вітру, що істотно впливає на поширення домішок;

- розрахунок мікроструктури хмар і туманів, що дозволяє враховувати поширення домішок, які істотно впливають на перебудову стратифікації, утворення токсичних речовин при взаємодії газів і аерозолів із краплями;

- розподіл домішок за різних стратифікацій, зокрема конвекційній нестійкості (літо, день).

Проте ці моделі потребують достатньо великої кількості початкових параметрів (більше 20) [3], які є швидкозмінними та складнопрогнозованими, що ускладнює оперативне використання таких моделей у військовій справі.

Таким чином, якщо розглядати задачу вибору в інтересах внутрішніх військ конкретної моделі за критерієм “точність/трудомісткість під час використання” для розрахунку зон ураження тією чи іншою активною речовиною, то виявляється доцільним обрати модель розсіювання важкого газу.

Моделі розсіювання важкого газу є моделями, що базуються на інтегральних законах збереження. Суть підходу полягає у такому. Вибирають деякий просторовий об'єм (або поверхню), параметри якого становлять інтерес. При цьому відмовляються від детального опису картини протікання процесів

усередині об'єму та від можливості одержати детальний розподіл параметрів течії. Замість цього відслідковують зміну інтегральних характеристик цього об'єму – маси, імпульсу, енергії й т. ін., тобто не відомо, як змінилася, наприклад, густина у тій або іншій точці, але відома зміна маси всього розглянутого об'єму; не відомо, як змінилася енергія в тій або іншій точці, але відомо як змінилася вся енергія розглянутого об'єму і т. д. Зрозуміло, що відслідковувати зміну інтегральних величин набагато простіше – для цього не треба розв'язувати складні системи рівнянь у частинних похідних, варто записати лише потоки для відповідних величин через межі розглянутого об'єму. За відомими інтегральними характеристиками об'єму (масою, імпульсом, енергією) можна одержати деяку інформацію про те, як параметри розподілені усередині об'єму. Для цього задають закон розподілу того або іншого параметра усередині об'єму. Наприклад, можна припустити, що всередині об'єму всі параметри розподілені рівномірно. Більш складним варіантом є неоднорідний розподіл параметрів усередині об'єму. Зазвичай, за такий розподіл вибирають гаусовські профілі, степеневі залежності й т. ін.

У моделі важкого газу для визначення розподілу концентрації активної речовини у просторі (за окремими точками простору з координатами x, y, z) використовуються такі розподілення:

$$c(x, y, z, t) = c_c(t) \cdot \exp\left[-\frac{z^2}{2\sigma_z(t)^2}\right], \quad (1)$$

за умови

$$(x - x_c)^2 + y^2 < r(t)^2 \quad (2)$$

та

$$c(x, y, z, t) = c_c(t) \cdot \exp\left[-\frac{z^2}{2\sigma_z(t)^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{(x - x_c)^2 + y^2 - r(t)^2}{2\sigma_y(t)^2}\right] \quad (3)$$

за умови

$$(x - x_c)^2 + y^2 \geq r(t)^2. \quad (4)$$

Значення концентрації активної речовини $c_c(t)$ всередині ядра хмари визначається за виразом:

$$c_c(t) = \frac{M}{V(t)}, \quad (5)$$

де M – маса речовини, що викидається під час спрацювання спеціального засобу (вибуху), гр.; $V(t)$ – об'єм хмари, що утворюється на деякий час t після викидання активної речовини, м³.

Об'єм хмари (приймається у вигляді кулі), визначається з виразу:

$$V(t) = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r(t)^3, \quad (6)$$

де $r(t)$ – радіус хмари на деякий час t після викидання активної речовини, м. Його визначають за формулою [6]:

$$r(t) = r + 0,5 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \sigma_y(t), \quad (7)$$

де r – початковий радіус хмари (відразу після вибуху), м; $\sigma_y(t)$ – горизонтальна (в поперечному до напрямку вітру) дисперсія на відстані X_c від місця викиду активної речовини (вибуху), м.

Відстань центра хмари від місця викиду активної речовини на деякий час t визначається за виразом:

$$x_c = u \cdot t, \quad (8)$$

де u – швидкість вітру, м/с; t – час, с.

Характерною особливістю розподілень (1)...(4) та їх принциповою відмінністю від розподілень, що використовуються в гаусовських моделях, є наявність так званого ядра хмари. Всередині ядра у випадку залпового (миттєвого) викиду в будь-якій горизонтальній площині концентрація постійна. Наявність ядра з постійною концентрацією на горизонтальних рівнях відображає той факт, що розсіювання хмари на її границях відбувається поступово і потрібен деякий час, щоб дифузія від бокової поверхні досягла центра хмари. Особливістю ядра є той факт, що його розмір r збільшується з часом. Це збільшення відбувається під впливом сили тяжіння, що викликає гравітаційне розосередження хмари, густина якого більша, ніж густина повітря. В іншому розподілення (1)...(4) відображають ті самі процеси, що і гаусове розподілення: розсіювання в горизонтальному напрямі

(експоненціальні співмножники з просторовими параметрами x та y) і розсіювання у вертикальному напрямі (експоненціальні співмножники з просторовою змінною z).

Зазвичай коефіцієнти дисперсії в горизонтальному і вертикальному напрямках σ_y і σ_z розраховують за емпіричними співвідношеннями. Найбільш відомі номограми Гіффорда–Паскуїлла, складені на основі спостережень концентрації на рівнинній місцевості і тому названі “сільськими”. Криві, представлені номограмами Гіффорда–Паскуїлла, можуть бути апроксимовані виразом:

$$\sigma_i = \exp[a_i + b_i \cdot \ln x + c_i \cdot (\ln x)^2], \quad (9)$$

де x – відстань по осі x , для якої визначаються значення, відповідні σ_y і σ_z ; $i = y$ або $i = z$.

Коефіцієнти апроксимації a_i , b_i , c_i надані в таблиці 1.

Т а б л и ц я 1

Константи формул, що апроксимують криві Гіффорда-Паскуїлла (за Тернером)

Константи	Категорія стійкості атмосфери					
	A	B	C	D	E	F
a_y	-1,104	-1,634	-2,054	-2,555	-2,754	-3,143
b_y	0,9878	1,035	1,0231	1,0423	1,0106	1,0148
c_y	-0,0076	-0,0096	-0,0076	-0,0087	-0,0064	-0,007
a_z	4,679	-1,999	-2,341	-3,186	-3,783	-4,49
b_z	-1,7172	0,8752	0,9477	1,1737	1,3010	1,4024
c_z	0,2770	0,0136	-0,002	-0,03116	-0,045	-0,054

Згідно з [13], для випадку міської забудови використовують співвідношення, наведені у таблиці 2.

Т а б л и ц я 2

Значення горизонтальної і вертикальної дисперсії σ_y і σ_z

Клас стійкості	Величина дисперсії, м	
	горизонтальної σ_y	вертикальної σ_z
A–B	$0,32 \cdot x / \sqrt{1 + 0,0004 \cdot x}$	$0,24 \cdot x / \sqrt{1 + 0,0001 \cdot x}$
C	$0,22 \cdot x / \sqrt{1 + 0,0004 \cdot x}$	$0,2 \cdot x$
D	$0,16 \cdot x / \sqrt{1 + 0,0004 \cdot x}$	$0,14 \cdot x / \sqrt{1 + 0,0003 \cdot x}$
E–F	$0,11 \cdot x / \sqrt{1 + 0,0004 \cdot x}$	$0,08 \cdot x / \sqrt{1 + 0,00015 \cdot x}$

Класи стійкості атмосфери визначатимемо з таблиці 3 [14].

Т а б л и ц я 3

Класи стійкості атмосфери за Паскуїллом

Клас стійкості атмосфери	Типова швидкість вітру, м/с	Погодні умови
A	1	безхмарно
B	2	сонячно і тепло
C	5	змінна хмарність протягом доби
D	5	хмарний день або хмарна ніч
E	3	змінна хмарність протягом ночі
F	2	ясна ніч

Дана модель може застосовуватися для розрахунку просторово-часового розподілу концентрації аерозолі, що миттєво розпилений спеціальним засобом “Терен-6”.

У середовищі Maple 6.0 за обраною моделлю важкого газу нами було проведено імітаційне моделювання процесу розсіювання аерозольної хмари, створеної спецзасобом “Терен-6” за напрямком вітру. Результати моделювання представлені на рисунках 1 та 2.

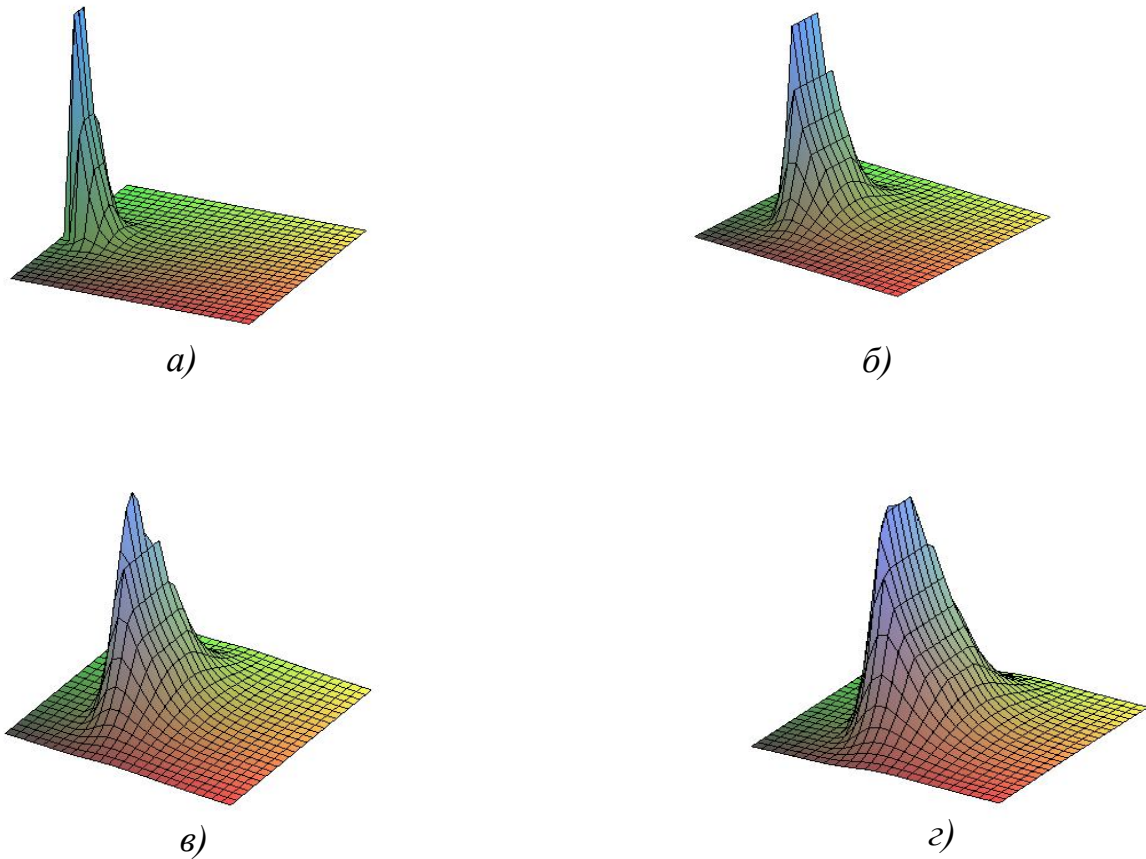


Рис. 1. Розподілення концентрації речовини для класу стійкості атмосфери А на різні моменти часу:
а) $t = 1$ с; б) $t = 3$ с; в) $t = 5$ с; г) $t = 10$ с

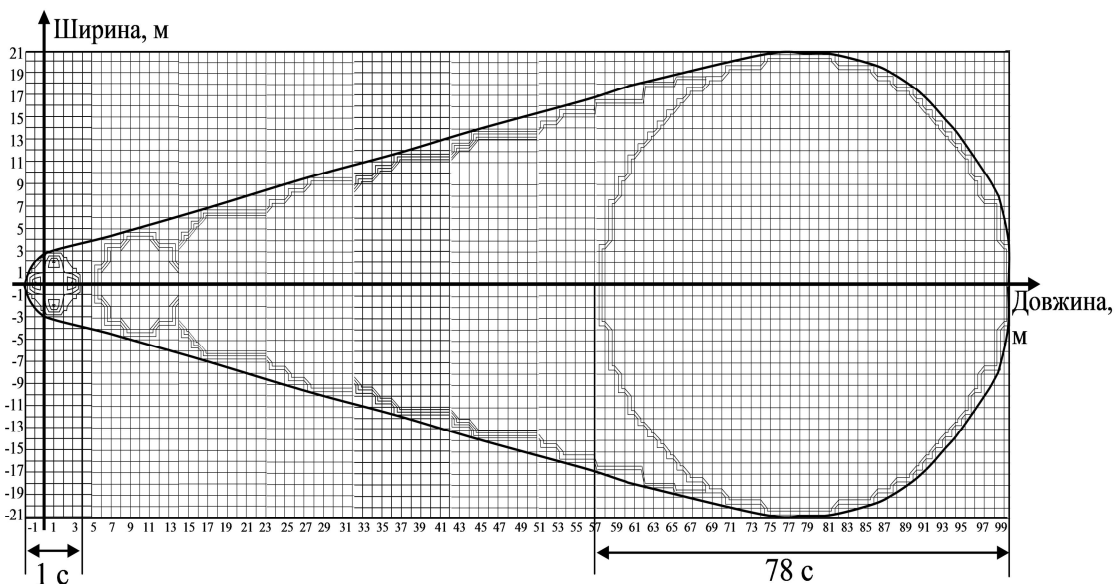


Рис. 2. Результати моделювання зони ураження

У червні 2010 р. на полігоні навчального центру внутрішніх військ МВС України (в/ч 3027, с-ще Нові Петрівці) були проведені натурні випробування спецзасобу “Терен-6” з метою визначення дійсних розмірів зон ураження. Під час випробування було використано 30 одиниць спеціального засобу “Терен-6”,

задіяно 5 осіб з позаштатних груп застосування спецзасобів, 5 одиниць військового приладу хімічної розвідки (ВПХР), 5 протигазів, один метеокомплект МК-3, 1 бронезилет “Модуль-ВВ”. Для виявлення початкових концентрацій використані індикаторні трубки CS – 11 касет. За рівень нестерпної концентрації обрано 5 мг/м³. Концентрації вимірювали в середньому на висоті 1,5 м. Дослідження були проведені для класів стійкості атмосфери А та С.

Натурні випробування показали, що обрана модель важкого газу з достатньою точністю описує дійсні розміри зони ураження, що створюється під час застосування одного спеціального засобу “Терен-6”.

Висновки

Таким чином, модель важкого газу найбільш прийнятна у правоохоронній справі для оперативного опису процесів розсіювання (поширення) в атмосфері газоподібних речовин (аерозолів), утворених у випадку миттєвого (залпового) їх викиду, і може бути застосована у розрахунках зон ураження для різних класів стійкості атмосфери у вигляді спеціального програмного забезпечення з метою використання групами застосування спеціальних засобів. Результатами таких розрахунків повинні бути оптимальні тактичні схеми застосування спеціальних засобів сльозоточивої дії для різних метеорологічних умов і умов тактичної обстановки.

Список використаних джерел

1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Л. : Гидрометеоиздат, 1975. – 440 с.
2. Абрамов Ю. О. Мониторинг надзвичайних ситуацій: підруч. / Ю. О. Абрамов, С. М. Грінченко. – Х. : АЦЗУ, 2005. – С. 124 – 129.
3. Захаренко О. В. Определение зон заражения при разрушении резервуара с метанолом на открытом складе химического предприятия / О. В. Захаренко, А. П. Созник // Проблемы надзвичайних ситуацій: зб. наук. пр. УЦЗ України. – Вип. 4. – Х., 2006. – С. 106 – 114.
4. Горський В. Г. и др. Научно-методические аспекты анализа аварийного риска / В. Г. Горський и др.; под общ. ред. Г. Ф. Терещенко и А. А. Шаталова. – М. : Экономика и информатика, 2000. – 260 с.
5. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий (ОНД-86) Госкомгидромет. – Л. : Гидрометеоиздат, 1987. – 87 с.
6. Бызова Н. Л. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси / Н. Л. Бызова, Е. К. Гаргер, В. Н. Иванов. – Л. : Гидрометеоиздат, 1991. – 278 с.
7. Швыряев А. А. Оценка риска воздействия загрязнения атмосферы в исследуемом регионе: учеб. пособие для вузов / А. А. Швыряев, В. В. Меньшиков. – М. : Изд-во МГУ, 2004. – 124 с.
8. Методика расчета рассеяния аварийных выбросов, основанная на модели “тяжелого газа” / А. А. Шаталов, М. В. Лисанов, А. С. Печеркин и др. // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 9. – С. 46 – 52.
9. Руководство по оценке промышленных опасностей (Techniques for Assessing Industrial Hazards: a Manual. World bank Tech. Paper No. 55), The World Bank Group, 1988.
10. The HGSYSTEM technical reference manual и свод компьютерных кодов HGSYSTEM v.3 (HEGADAS-T v.3.2), Copyright Shell Internationale Research Maatschappij BV, The Hague, 1988–1994; HEGABOX v. 3.01, Copyright Shell Internationale Research Maatschappij BV, The Hague, 1991–1994.
11. Methods for the calculation of physical effects CPR 14E (part 1) “TNO Yellow book”, 3 edition, TNO, The Netherlands, 1997.
12. Unified dispersion model (UDM) Theory Manual by H.W.M. Witlox Consequence modelling Documentation (UDM v. 6.0, January 2000), Det Norske Veritas.
13. Методика расчета приземных концентраций загрязняющих веществ разных периодов осреднения применительно к крупным точечным источникам: приказ М-ва природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь от 30 дек. 1999 г. № 390. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.bank.zakonov.com/d/2008/time57/lav57655/
14. ГОСТ Р 12.3.047-98. Пожарная безопасность технологических процессов. Методы контроля: Метод расчета размеров зон распространения облака горючих газов и паров при аварии. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.best-story.ru/gost/r94/1671/

Стаття надійшла до редакції 23.11.2010 р.