

Беляев Н.Н*Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна**(ул. Лазаряна, 2, Днипро, 49010, Украина, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com;
orcid.org/0000-0002-1531-7882)***Берлов А.В***ДВНЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры»**(ул. Чернышевского, 24а, Днипро, 49600, e-mail: berlov@mail.pgasa.dp.ua;**orcid.org/0000-0002-7442-0548)***Калашников И.В***Государственное предприятие «Проектно-изыскательский институт железнодорожного транспорта Украины «Укрзалізничпроект»**(ул. Е. Котляра, 7, Харьков, 61052, Украина, e-mail: u_z_p@ukr.net; orcid.org/0000-0002-2814-380X)***Козачина В.А***Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна**(ул. Лазаряна, 2, Днипро, 49010, Украина, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com;
orcid.org/0000-0002-6894-5532)*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ РИСКА ПРИ ЭМИССИИ ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ

Разработка математической модели для оценки территориального риска на открытой местности и внутри зданий в случае выброса химически опасного вещества. Для расчета переноса химически опасного вещества, в случае выброса его в условиях застройки, используется двухмерное уравнение массопереноса химически опасного вещества в атмосфере. Данное уравнение учитывает параметры метеоситуации, интенсивность эмиссии химически опасного вещества, наличие зданий возле места выброса режим эмиссии опасного вещества. Для численного интегрирования моделирующего уравнения используется неявная попеременно-треугольная разностная схема. Для расчета поля скорости ветрового потока при наличии застройки используется модель потенциального течения. Для решения уравнения Лапласа для потенциала скорости применяется метод Ричардсона. Построенная математическая модель позволяет выполнять оценку территориального риска, в случае выброса опасного вещества, при различных метеоусловиях и при наличии зданий. На базе построенной математической модели разработан комплекс прикладных программ, который может быть использован для оценки территориального риска в случае выброса опасных веществ, как в селитебной зоне, так и на промышленных площадках. Математическая модель может быть реализована на компьютерах малой и средней мощности, что позволяет его широко использовать для решения задач рассматриваемого класса. Представлены результаты проведенного вычислительного эксперимента, позволяющие оценить возможности разработанной математической модели для оценки территориального риска в случае выброса химически опасного вещества в условиях застройки. Разработана математическая модель для оценки территориального риска в случае выброса опасного вещества на территории с застройкой. Модель может быть использована для оценки территориального риска, как на открытой местности, так и внутри зданий. Модель позволяет получить информацию о возможных зонах поражения. Модель основана на численном интегрировании уравнения массопереноса и уравнения Лапласа для потенциала скорости. Предложенная модель оценки территориального риска в случае выброса опасного вещества в условиях застройки может быть использована при разработке ПЛАСа.

Ключевые слова: территориальный риск; химическое загрязнение; численное моделирование; загрязнение воздушной среды.

Вступление. Повышенный интерес привлекают задачи оценки рисков на химически опасных объектах. В круг этих задач входит задача по оценке территориального

риска, который представляет собой интегральный показатель опасности [1-3, 7, 9]. Однако следует отметить, что, несмотря на

важность задач данного класса инструментов, позволяющих их решать – крайне мало. Здесь также нужно отметить, что по современным требованиям, оценка риска должна быть максимально детализирована, представлять собой матрицу рисков, которая накрывает объект интереса. Т.е. территориальный риск не должен быть выражен одним числом.

Анализ литературных источников.

Основой оценки территориального риска является информация о распределении концентрации опасного вещества (примеси) в районе интереса. Эта информация может быть получена с использованием той или иной математической модели. Применение физического эксперимента для решения задач данного класса – практически невозможно (необходимость дорогостоящего оборудования, большие затраты времени на постановку проведения экспериментов и т.д.). Поэтому особую важность приобретают теоретические методы оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха при возможном выбросе опасных веществ на химически опасных объектах. В Украине – это две методики. Первая – методика ОНД-86, вторая – нормативная методика прогноза последствий аварий на химически опасных объектах и транспорте. Эти методики основаны на применении эмпирических формул, которые позволяют рассчитать площадь зоны заражения и т.д. Ограничением этих методик является то, что они не позволяют выяснить влияние зданий на формирование зон загрязнения. Иной подход – оценка уровня загрязнения, при аварийной эмиссии химически опасных веществ на базе модели Гаусса или аналитического решения уравнения массопереноса. Такой подход реализован в нескольких компьютерных программах. Наиболее известными из них являются «SLAB», «Токси», «Аммиак». Это достаточно мощные компьютерные программы способные решать широкий класс практических задач. Однако ограничением перечисленных компьютерных программ является невозможность расчета зон химического заражения при наличии зданий. Поэтому прогнозная

информация, полученная с помощью указанных компьютерных программ, может дать неадекватную оценку территориального риска. Необходимо также выделить еще одно направление – применение численных моделей для расчета зон химического заражения в условиях застройки. Как правило, такие модели основываются на решении аэродинамической задачи по определению поля скорости ветрового потока в условиях застройки. Для такого расчета используют модель вязкого течения жидкости. Однако известно, что применение такой модели требует очень больших затрат компьютерного времени. Для практического использования численного моделирования в рамках решения комплекса задач, например, при разработке ПЛАСа – такой подход явно не является рациональным. В этой связи необходимо отметить, что крайне важным для практики является создание эффективных быстро считающих методов оценки территориального риска при эмиссии опасных веществ в атмосферу.

Целью данной работы является разработка метода для оценки территориального риска на открытой местности и внутри помещений при эмиссии химически опасных веществ при наличии зданий.

Постановка задачи. Рассматривается эмиссия опасного вещества на промышленной площадке. Ставится задача по оценке территориального риска на открытой местности и внутри помещений.

Моделирование ветрового потока вблизи зданий. Одной из важных задач в рамках рассматриваемого класса задач является задача по расчету поля скорости ветрового потока при наличии зданий. Для решения этой задачи используется модель безвихревых течений идеальной жидкости (модель потенциального течения):

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

где P – потенциал скорости.

Краевые условия для уравнения (1) рассматриваются в [9]: Компоненты вектора скорости ветрового потока определяются соотношениями:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, v = \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (2)$$

Для численного интегрирования уравнения для потенциала скорости применяется метод Ричардсона.

Для расчета рассеивания загрязнителя в атмосфере используется уравнение массопереноса, осредненное по высоте переноса примеси [2, 3, 5-7]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \sigma C = \text{div}(\mu \text{grad} C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (3)$$

где C – концентрация опасного вещества в атмосферном воздухе; σ – коэффициент, учитывающий распад химически опасного вещества и оседание на поверхность земли; u, v – компоненты вектора скорости воздушного потока; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коэффициенты атмосферной турбулентной диффузии; Q – интенсивность выброса опасного вещества; $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$ – дельта-функция Дирака; x_i, y_i – координаты источника эмиссии опасного вещества; t – время.

Для численного решения уравнения массопереноса опасного вещества используется неявная попеременно-треугольная разностная схема расщепления [2, 5].

Оценка территориального риска.

Вероятность попадания человека под действие шлейфа химического агента рассчитывается с помощью зависимости:

$$P(W)_{\Sigma} = \sum_{i=0}^n P(W_i), \quad (4)$$

где $P(W)_{\Sigma}$ – суммарная вероятность всех рассматриваемых метеоситуаций, при которых человек попадает в зону поражения.

Для оценки территориального риска необходимо, для конкретной точки расчетной области, выполнить расчеты по формуле (4).

Расчет загрязнения воздушной среды в помещении. Крайне важной задачей является оценка риска поражения людей внутри помещений при затекании в него загрязненного атмосферного воздуха. Этот расчет выполняется на базе следующего балансового уравнения:

$$V \frac{dC}{dt} = QC_{np} - QC, \quad (5)$$

где $C_{np} = f(t)$ – концентрация химически опасного вещества примеси в приточном воздухе, который поступает в помещение; C – концентрация химически опасного ве-

щества в выходящем из помещения воздухе; V – объем помещения; Q – интенсивность воздухообмена; t – время.

Для расчета риска поражения людей внутри помещения использовалась зависимость

$$R = \sum P(i)g(i), \quad (6)$$

где $P(i)$ – вероятность метеоситуации, при которой в заданной точке возможно токсичное поражение (т.е. концентрация примеси превышает некоторый пороговый уровень); $g(i)$ – доля людей из общего персонала, которое попадает в зону поражения при известной метеоситуации.

Результаты. Построенная численная модель была использована для решения конкретной задачи. Рассматривался выброс аммиака на площадке, где расположены три здания. Выброс происходил в течение 12 мин. Рассматривались следующие вероятностные метеоситуации: скорость ветра 3 м/с – вероятность 35%; скорость ветра 6 м/с – 65%.

Целью расчета являлось: определение формы зон загрязнения, которые формируются при нестационарном выбросе химически опасного вещества; расчет территориального риска на открытой местности; расчет риска поражения людей в помещении.

На рис. 1-3 представлена динамика загрязнения воздушной среды возле зданий для различных моментов времени (скорость ветра 6 м/с). Направление ветра показано стрелкой на каждом рисунке.

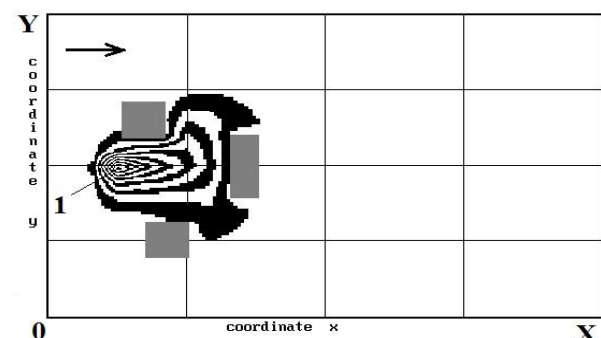


Рис. 1. Зона химического заражения ($t = 6$ сек): 1 – место эмиссии

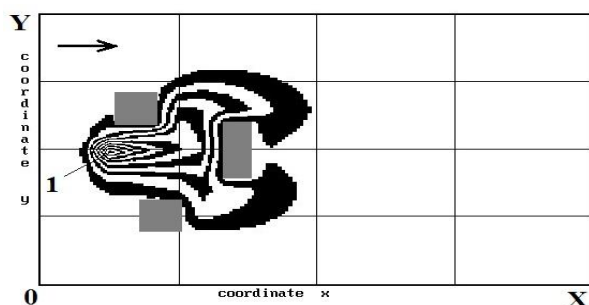


Рис. 2. Зона химического заражения ($t = 9$ сек): 1 – место эмиссии

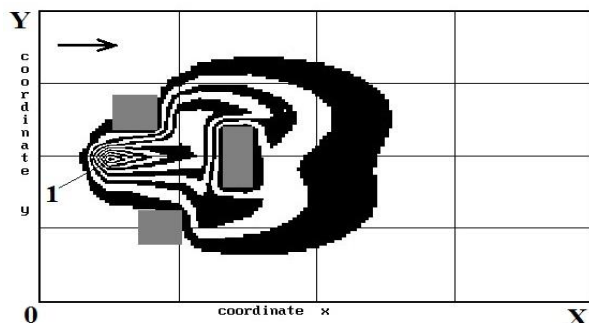


Рис. 3. Зона химического заражения ($t = 14$ сек): 1 – место эмиссии

Как видно из рис.1-3 на площадке достаточно быстро формируется интенсивная зона химического заражения. Отчетливо видно формирование зон загрязнения на подветренной стороне зданий. Представленные результаты показывают, что на открытой местности высокий риск токсичного поражения людей. На рис. 4 показана матрица территориального риска для открытой местности. За пороговое значение принималась величина максимально разовой ПДК для аммиака. Каждое число на рис. 4 представляет величину риска в процентах. Таким образом, если в расчетной точке концентрация аммиака превышала это пороговое значение, то считалось, что может иметь место токсичное поражение людей.

Из рис. 4 видно, что большая часть открытой местности находится в зоне явного поражения людей.

Как уже отмечалось выше, загрязненный атмосферный воздух поступает внутрь помещений за счет вентиляции, инфильтрации через неплотности. Будем считать, что поступление загрязненного воздуха происходит на наветренной стороне третьего здания. Это место показано условно на

рис. 4 кружком. Будем считать, что в случае первой метеоситуации вероятность пребывания людей в помещении составляет 10%, а в случае второй метеоситуации – 90%. В табл. 1 представлены прогнозные данные относительно величины риска поражения людей в помещении при затекании в него загрязненного атмосферного воздуха для рассматриваемых вероятностных сценариев.

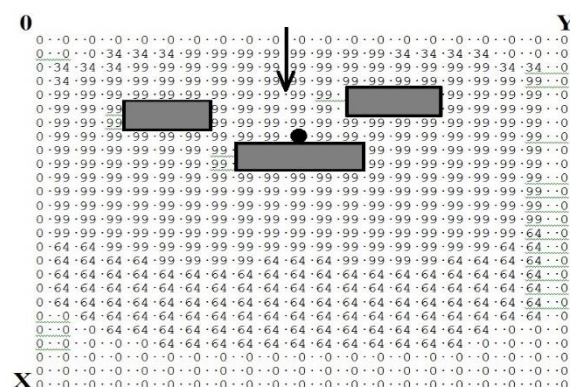


Рис. 4. Матрица территориального риска ($t = 18$ сек)

Таблица 1 - Риск поражения людей внутри помещения

время	риск
$t = 3$ сек	0
$t = 4,6$ сек	$R = 58\%$
$t = 7,1$ сек	$R = 62\%$

Из табл. 1 видно, что риск поражения людей достаточно высок для выбранных сценариев. Он превышает 50%. Если сравнить с риском на открытом пространстве (рис. 4), то видно, что помещения выполнили свою защитную функцию, т.к. на открытой местности риск поражения составляет на большей части рассматриваемой зоны – 100%.

Выводы. Предложена математическая модель для решения задач по оценке территориального риска и риска поражения людей внутри помещений при эмиссии химически опасных веществ. Решение задачи основывается на численном интегрировании уравнения массопереноса химически опасного вещества в атмосфере. Расчет поля ветрового потока в условиях застройки осуществляется на базе модели потенциального течения. Дальнейшее совер-

шенствование данного направления следует проводить в направлении создания 3-D численной модели, позволяющей решать сопряженные задачи в случае эмиссии опасного вещества в условиях застройки.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Алымов, В.Т. Техногенный риск: Анализ и оценка : учеб. пособие для вузов / В.Т. Алымов, Н.П. Тарасова. – Москва: Академкнига, 2004. – 118 с.
2. Беляев, Н.Н. Защита зданий от проникновения в них опасных веществ : монография / Н.Н. Беляев, Е.Ю. Гунько, Н.В. Росточило. – Днепропетровск: Акцент ПП, 2014. – 136 с.
3. Біляєв, М.М. Математичне моделювання в задачах промислової безпеки та охорони праці : монографія / М.М. Біляєв, О.В. Берлов, П.С. Кіріченко ; Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна МОН України. – Кривий Ріг : Вид. Р.А. Козлов, 2017. – 130 с.
4. Беляев, Н.Н. Экспресс оценка территориального риска при выбросе химического агента в случае теракта / Н.Н. Беляев, В.А. Козачина, И.В. Калашников // Научный вестник строительства. – 2017. – Т.89, № 3. – С. 128 – 132.
5. Беляев, Н.Н. Моделирование аварийного загрязнения атмосферы при чрезвычайной ситуации в хранилище твердого ракетного топлива / Н.Н. Беляев, А.В. Берлов, А.В. Шевченко // Наука та прогрес транспорту. Екологія на транспорті. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. академіка В. Лазаряна. – 2014. – Вип. 5 (53). – С. 29 – 38.
6. Беляев, Н.Н. Защита атмосферы от загрязнения при чрезвычайных ситуациях на железнодорожном транспорте / Н.Н. Беляев, А.В. Берлов, П.С. Кириченко // Сборник научных работ «Научный вестник строительства» – Х.: Харківський національний університет будівництва та архітектури, 2016 – №1(83). – С.203 – 207.
7. Марчук, Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г.И. Марчук. – М.: Наука. Главное издательство физико-математической литературы, 1982. – 320 с.
8. Стоецкий, В.Ф. Оценка риска при авариях техногенного характера / В.Ф. Стоецкий, В.И. Голинько, Л.В. Дранишников // Наук. вісн. НГУ. – 2014. – № 3. – С. 117 – 124.
9. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М.З. Згуровский, В.В. Скопецкий, В.К. Хрущ, Н.Н. Беляев. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.
10. Barret, A.M. Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness : Degree of Doctor of Philosophy / Anthony Michael Barret. – Carnegie Mellon University. – Pittsburg, Pennsylvania, 2009. – 123 p.
11. Biliaiev, M.M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography / M.M. Biliaiev // NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. – 2011. – P. 87 – 91.
12. Biliaiev, M.M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography / M.M. Biliaiev, M.M. Kharytonov // NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security. – Dordrecht, 2012. – P. 87–91.
13. Chan W.R., Nazaroff W.W., Price P.N., Gadgil A.J. Effectiveness of Urban Shelter-in-Place. II: Residential Districts, 2008. 31 p. Available at: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/928232> (Accessed 29 March 2014). doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.04.059.
14. Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling / Zahra Naserzadeh, Farideh Atabi, Faramarz Moattar and Naser Moharram Nejad // Biosci. Biotech. Res. Comm. – Vol. 10(1). – 2017. – P. 192 – 204.

Біляєв М.М., Берлов О.В., Калашніков І.В., Козачина В.А. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ ОЦІНКИ РИЗИКУ ПРИ ЕМІСІЇ НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРУ. Розробка математичної моделі для оцінки територіального ризику на відкритій місцевості і всередині будівель в разі викиду хімічно небезпечної речовини. Для розрахунку переносу хімічно небезпечної речовини, в разі викиду його в умовах забудови, використовується двомірне рівняння масопереносу хімічно небезпечної речовини в атмосфері. Дане рівняння враховує параметри метеоситуації, інтенсивність емісії хімічно небезпечної речовини, наявність будівель біля місця викиду ре-

жим емісії небезпечної речовини. Для чисельного інтегрування моделюючого рівняння використовується неявна поперемінно-трикутна різницева схема. Для розрахунку поля швидкості вітрового потоку при наявності забудови використовується модель потенційного течії. Для вирішення рівняння Лапласа для потенціалу швидкості застосовується метод Річардсона. Побудована математична модель дозволяє виконувати оцінку територіального ризику, в разі викиду небезпечної речовини, при різних метеоумовах і при наявності будівель. На базі побудованої математичної моделі розроблений комплекс програм, який може бути використаний для оцінки територіальної небезпеки у разі викиду небезпечних речовин як в селищній зоні, так і на промислових майданчиках. Математична модель може бути реалізована на комп'ютерах малої й середньої потужності, що дозволяє широко використовувати його для вирішення задач розглянутого класу. Представлені результати проведеного обчислювального експерименту, що дозволяє оцінити можливості розробленої математичної моделі для оцінки територіальної небезпеки у разі викиду хімічно небезпечної речовини в умовах забудови. Розроблено математичну модель для оцінки територіального ризику у разі викидання небезпечних речовин на територію із забудови. Модель може бути використана для оцінки територіального ризику як на відкритій місцевості так і всередині будівель. Модель дозволяє отримати інформацію про можливі зони ураження. Модель основана на численному інтегруванні рівнянь масопереносу та рівнянь Лапласу для потенціалу швидкості. Запропонована модель оцінки територіальної небезпеки у разі викиду небезпечної речовини в забудову може бути використана при розробці ПЛАСа.

Ключові слова: територіальний ризик; хімічне забруднення; чисельне моделювання; забруднення повітряного середовища.

Biliaiev M.M., Berlov O.V., Kalashnikov I.V., Kozachyna V.A. NUMERICAL MODELING IN THE TASKS OF RISK ASSESSMENT DURING EMISSION OF HAZARDOUS SUBSTANCES IN THE ATMOSPHERE. Development of a mathematical model for assessing the territorial risk in open areas and inside buildings in the event of the release of a chemically hazardous

substance. To calculate the transfer of a chemically hazardous substance, in the event of its release under development conditions, the two-dimensional mass transfer equation for a chemically hazardous substance in the atmosphere is used. This equation takes into account the parameters of the meteorological situation, the intensity of emission of a chemically hazardous substance, the presence of buildings near the place of emission, the mode of emission of a dangerous substance. For the numerical integration of the modeling equation, an implicit alternating triangular difference scheme is used. To calculate the velocity field of the wind flow in the presence of buildings, a potential flow model is used. The Richardson method is used to solve the Laplace equation for the velocity potential. The constructed mathematical model makes it possible to carry out an assessment of the territorial risk, in the event of a release of a hazardous substance, under various weather conditions and in the presence of buildings. On the basis of the constructed mathematical model, a set of application programs has been developed, which can be used to assess the territorial risk in the event of the release of hazardous substances both in the residential area and at industrial sites. The mathematical model can be implemented on computers of low and medium power, which allows it to be widely used to solve problems of the class in question. The results of the conducted computational experiment are presented, allowing to evaluate the possibilities of the developed mathematical model for assessing the territorial risk in the event of a release of a chemically hazardous substance in a building environment. A mathematical model has been developed for assessing the territorial risk in the event of a release of a hazardous substance in a territory with buildings. The model can be used to assess the territorial risk both in open areas and inside buildings. The model allows you to get information about possible areas of destruction. The model is based on the numerical integration of the mass transfer equation and the Laplace equation for the velocity potential. The proposed model for the assessment of the territorial risk in the case of release of hazardous substance in the conditions of development can be used in developing a plan for the elimination of the emergency situation.

Keywords: territorial risk; chemical pollution; numerical simulation; air pollution.