

УДК 519.6

DOI: 10.30838/P.СММ.2415.250918.182.149

ОЦЕНКА ТЕХНОГЕННОГО РИСКА ПРИ ВЫБРОСЕ В АТМОСФЕРУ ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ

БЕЛЯЕВ Н. Н.^{1*}, *д.т.н., проф.*,КАЛАШНИКОВ И. В.², *к.т.н.*,КОЗАЧИНА В. А.³, *к.т.н.*,БЕРЛОВ А. В.⁴, *к.т.н., доц.*ЧЕРЕДНИЧЕНКО Л. А.⁵, *к.т.н., доц.*

^{1*} Кафедра «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, г. Днипро, Украина, 49010, тел. +38(056) 273-15-09, e-mail: gidravlika2013@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

² Государственное предприятие «Проектно-изыскательный институт железнодорожного транспорта «Укрзалізничпроект», ул. Красноармейская, 7, г. Харьков, Украина, 61052, тел. +38 (057) 724-41-25, e-mail: uzp38@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2814-380X

³ Кафедра «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, г. Днипро, Украина, 49010, тел. +38(056) 273-15-09, e-mail: gidravlika2013@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

⁴ Кафедра безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24а, г. Днипро, Украина, 49600, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: berlov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

⁵ Кафедра безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24а, г. Днипро, Украина, 49600, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: cherednichenko@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1457-9282

Цель. Разработка численного метода оценки территориального риска на открытой местности и внутри зданий в случае выброса химически опасного вещества. **Методы.** Для описания процесса рассеивания химического агента, в случае выброса химически опасного вещества, используется двухмерное уравнение конвективно-диффузионного рассеивания загрязняющего вещества в атмосферном воздухе. Уравнение учитывает параметры метеоситуации, интенсивность эмиссии химического агента, наличие зданий возле места выброса химически опасного вещества. Для численного интегрирования моделирующего уравнения используется неявная попеременно-треугольная разностная схема. Для моделирования ветрового потока при наличии застройки используется модель потенциального течения. Для решения уравнения Лапласа для потенциала скорости применяется метод суммарной аппроксимации. Особенностью разработанной численной модели является возможность оценки территориального риска, в случае выброса химически опасного вещества, при различных метеоусловиях и наличии зданий. **Результаты.** Разработан специализированный комплекс программ, который может быть использован для оценки территориального риска в случае выброса химически опасного вещества на промышленных площадках. Метод может быть реализован на компьютерах малой и средней мощности, что позволяет его широко использовать для решения задач рассматриваемого класса. Представлены результаты вычислительного эксперимента, позволяющие оценить возможности предложенного метода оценки территориального риска в случае выброса химически опасного вещества. **Научная новизна.** Предложен эффективный метод оценки территориального риска в случае выброса химически опасного вещества на территории промплощадки. Метод может быть использован для оценки территориального риска в условиях городской застройки, что позволяет получать адекватные данные о возможных зонах поражения, как на открытой местности, так и внутри помещений. Метод основан на численном интегрировании уравнения массопереноса и уравнения Лапласа для потенциала скорости. **Практическая значимость.** Предложенный метод оценки территориального риска в случае выброса химически опасного вещества с применением химического агента на промплощадках. Метод может быть использован для расчета зон поражения возле административных зданий, центров и других социально значимых объектов.

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

ОЦІНКА ТЕХНОГЕННОГО РИЗИКУ ПРИ ВИКИДІ В АТМОСФЕРУ НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН

БІЛЯЄВ М. М.^{1*}, *д.т.н., проф.*,КАЛАШНИКОВ І. В.², *к.т.н.*,КОЗАЧИНА В. А.³, *к.т.н.*,БЕРЛОВ О. В.⁴, *к.т.н., доц.*,ЧЕРЕДНИЧЕНКО Л. А.⁵, *к.т.н., доц.*

^{1*} Кафедра «Гідравліки та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38(056) 273-15-09, e-mail: gidravlika2013@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

² Державне підприємство «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту України «Укрзалізничпроект», вул. Червоноармійська, 7, м. Харків, Україна, 61052, тел. +38 (057) 724-41-25, e-mail: uzp38@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2814-380X

³ Кафедра «Гідравліки та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38(056) 273-15-09, e-mail: gidravlika2013@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

⁴ Кафедра безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24а, м. Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: berlov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

⁵ Кафедра безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24а, м. Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: cherednichenko@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1457-9282

Мета. Розробка чисельного методу оцінки територіального ризику на відкритій місцевості і всередині будівель в разі викиду хімічно небезпечної речовини. **Методи.** Для опису процесу розсіювання хімічного агента, в разі викиду хімічно небезпечної речовини, використовується двомірне рівняння конвективно-дифузійного розсіювання забруднюючої речовини в атмосферному повітрі. Рівняння враховує параметри метеоситуації, інтенсивність емісії хімічного агента, наявність будівель біля місця викиду хімічно небезпечної речовини. Для чисельного інтегрування моделюючого рівняння використовується неявна поперемінно-трикутна різницєва схема. Для моделювання вітрового потоку при наявності забудови використовується модель потенційного течії. Для вирішення рівняння Лапласа для потенціалу швидкості застосовується метод сумарної апроксимації. Особливістю розробленої чисельної моделі є можливість оцінки територіального ризику в разі викиду хімічно небезпечної речовини при різних метеоумовах і наявності будівель. **Результати.** Розроблено спеціалізований комплекс програм, який може бути використаний для оцінки територіального ризику в разі викиду хімічно небезпечної речовини на промислових майданчиках. Метод може бути реалізований на комп'ютерах малої і середньої потужності, що дозволяє його широко використовувати для вирішення задач даного класу. Представлені результати обчислювального експерименту, що дозволяють оцінити можливість запропонованого методу оцінки територіального ризику в разі викиду хімічно небезпечної речовини. **Наукова новизна.** Запропоновано ефективний метод оцінки територіального ризику в разі викиду хімічно небезпечної речовини на території проммайданчика. Метод може бути використаний для оцінки територіального ризику в умовах міської забудови, що дозволяє отримувати адекватні дані про можливі зони ураження, як на відкритій місцевості, так і всередині приміщень. Метод заснований на чисельному інтегруванні рівняння масопереносу і рівняння Лапласа для потенціалу швидкості. **Практична значимість.** Запропонований метод оцінки територіального ризику в разі викиду хімічно небезпечної речовини із застосуванням хімічного агента на проммайданчиках. Метод може бути використаний для розрахунку зон ураження біля адміністративних будівель, центрів та інших соціально значущих об'єктів.

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

ASSESSMENT OF TECHNOLOGICAL RISK WHEN EMISSING HAZARDOUS SUBSTANCES TO THE ATMOSPHERE

BILIAIEV M. M.^{1*}, D. Sc. (Tech.), Prof.,

KALASHNIKOV I. V.², Ph.D. (Tech.),

KOZACHYNA V. A.³, Ph.D. (Tech.),

BERLOV O. V.⁴, Ph.D. (Tech.), Assoc. Prof.,

CHEREDNICHENKO L. A.⁵, Ph.D. (Tech.), Assoc. Prof.

^{1*} Department of «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273-15-09, e-mail gidravlika2013@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

² State Enterprise «Design and Exploration Institute of Railway Transport of Ukraine «Ukrzaliznichproekt», 24-A, Str. Red Army, 7, Kharkov, 61052, тел. +38 (057) 724-41-25, e-mail: uzp38@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2814-380X

³ Department of «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273-15-09, e-mail gidravlika2013@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

⁴ Department of Workplace Safety and Health, State Higher Education Establishment «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernishevskogo st., Dnipro, 49600, Ukraine, phone +38 (056) 756-34-57, berlov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

⁵ Department of Workplace Safety and Health, State Higher Education Establishment «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernishevskogo st., Dnipro, 49600, Ukraine, phone +38 (056) 756-34-57, cherednichenko@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1457-9282

Purpose. Development of a numerical method for assessing territorial risk in open areas and inside buildings in the event of a release of a chemically hazardous substance. **Methodology.** To describe the process of dispersion of a chemical agent, in case of release of a chemically hazardous substance, the two-dimensional equation of convective-diffusive dispersion of the pollutant in the atmospheric air is used. The equation takes into account the parameters of the meteorological situation, the intensity of the emission of a chemical agent, the presence of buildings near the place of emission of a chemically dangerous substance. For the numerical integration of the modeling equation, an implicit alternating triangular difference scheme is used. To model the wind flow in the presence of buildings, a potential flow model is used. To solve the Laplace equation for the velocity potential, the total approximation method is used. A feature of the developed numerical model is the possibility of assessing the territorial risk, in the event of a release of a chemically hazardous substance, under various weather conditions and the presence of buildings. **Findings.** A specialized set of programs has been developed that can be used to assess the territorial risk in the event of the release of a chemically hazardous substance at industrial sites. The method can be implemented on computers of low and medium power, which allows it to be widely used to solve problems of this class. The results of a computational experiment are presented, allowing to evaluate the possibilities of the proposed method of assessing the territorial risk in the event of a release of a chemically dangerous substance. **Originality.** An effective method for assessing the territorial risk in the event of a release of a chemically hazardous substance on the industrial site is proposed. The method can be used to assess territorial risk in urban areas, which allows to obtain adequate data on the possible affected areas, both in open areas and indoors. The method is based on the numerical integration of the mass transfer equation and the Laplace equation for the velocity potential. **Practical value.** The proposed method of assessing the territorial risk in the event of a release of a chemically hazardous substance with the use of a chemical agent at industrial sites. The method can be used to calculate the affected areas near administrative buildings, centers and other socially significant objects.

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

Постановка проблемы

В настоящее время, большое внимание уделяется вопросам оценки рисков при аварийных ситуациях на химически опасных объектах, транспорте, а также в случае террористических актов с применением химических агентов [1, 2, 3, 7, 9]. Это связано с комплексом причин: возросший уровень террористической угрозы, износ технологического оборудования на многих промышленных объектах, износ локомотивов, цистерн, ошибки, вызванные человеческим фактором. Особенно опасны выбросы возле селитебной зоны, на промышленных площадках, где находятся люди. С точки зрения промышленной безопасности задачу оценки риска на промышленных объектах необходимо рассматривать комплексно: оценивать риск не только на открытой местности, но и выполнять оценку риска для людей находящихся внутри помещений. Совершенно очевидно, что помещения выполняют защитную функцию для людей. Однако уровень такой защиты должен иметь научно обоснованную оценку. Следует подчеркнуть, что выполнить такую оценку достаточно трудно, поскольку интенсивность загрязнения воздушной среды в помещениях будет связана с интенсивностью загрязнения воздушной среды снаружи и влиянием еще дополнительных факторов. Для практики крайне важно иметь методы прогноза, которые позволяли бы оценивать риски, как для открытой местности, так и для помещений в случае эмиссии химически опасных веществ.

Анализ последних исследований и публикаций

На практике, для оценки опасности химического заражения территории в случае аварийной эмиссии химически опасных веществ на промышленных объектах и транспорте, в Украине, используется нормативная методика. Основой этой методики является комплекс эмпирических формул, которые

позволяют рассчитать площадь зоны заражения и т.д. Однако нормативная методика не учитывает влияния зданий на формирование зон загрязнения. За рубежом используются два подхода. Первый подход – оценка уровня загрязнения, при авариях на производствах на базе специализированных программных комплексов типа «Токси» [4], «Аммиак», «SLAB» [6], реализующие модель Гаусса, или аналитическое решение уравнения массопереноса. Эти комплексы также не позволяют учесть влияние зданий на формирование зон загрязнения, но учитывают скорость ветра, атмосферную диффузию, высоту выброса. Второй подход – применение CFD моделей для расчета поля скорости воздушного потока с учетом влияния зданий или рельефа и последующим расчетом зон загрязнения. Однако применение этого подхода требует использования очень мощных компьютеров и больших затрат компьютерного времени. Поэтому актуальной задачей является разработка методов оценки рисков на базе физически обоснованных моделей, требующих небольших затрат компьютерного времени на практическую реализацию.

Формулировка целей статьи

Разработка численного метода для оценки территориального риска на открытой местности и внутри помещений при эмиссии химически опасных веществ в условиях застройки.

Модель аэродинамики

При эмиссии химически опасных веществ в условиях застройки необходимо учитывать влияние зданий на формирование зон загрязнения. Это является очень сложной задачей, поскольку необходимо рассчитать неравномерное поле скорости ветрового потока в условиях застройки. Решение этой аэродинамической задачи возможно получить различными путями. Например, путем численного интегрирования системы уравнений Навье-Стокса.

При этом необходимо дополнить данные уравнения определенной моделью турбулентности. Применение уравнений Навье-Стокса позволяет получить детальную картину о поле ветрового потока, но расчет может занимать несколько суток. Такой подход является не рациональным при решении прогнозных задач, например при разработке ПЛА-Са. Поэтому для практики важно иметь быстро считающую модель аэродинамики. Такой моделью является 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.

Компоненты вектора скорости ветрового потока определяются соотношениями:

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

Для математического моделирования процесса распространения химически опасного вещества в атмосфере применяется уравнение Марчука Г.И., 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 химического 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 химически опасного вещества; $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$ – дельта-функция Дирака; x_i, y_i – координаты источника эмиссии химически опасного вещества; t – время.

Поле скорости ветрового потока в условиях застройки, для моделирующего уравнения (3), определяется на основе решения аэродинамической задачи, т.е. путем решения уравнения (1). Постановка краевых условий для моделирующих уравнений (1), (2) рассмотрена в [2, 3, 5].

Для численного решения уравнения (1) используется метод условной аппроксимации. Для численного решения уравнения массопереноса химически опасного вещества используется неявная попеременно-треугольная разностная схема расщепления [2, 5].

Оценка территориального риска

Рассмотрим алгоритм оценки территориального риска при эмиссии химически опасного вещества. Примем во внимание, что каждой скорости ветра (погодное состояние $P(W_i)$) отвечает конкретная зона загрязнения. Эта зона характеризуется соответствующими размерами и концентрацией опасного вещества. Вероятность реализации конкретной скорости ветра определяется по зависимости [1]:

$$P(W_i) = N_{\Pi} / T, \quad (4)$$

где N_{Π} – число часов, соответствующих определенной скорости ветра; T – период наблюдений.

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

$$P(W)_{\Sigma} = \sum_{i=0}^n P(W_i), \quad (5)$$

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

Таким образом, для оценки территориального риска необходимо, для конкретной точки расчетной области, выполнить расчеты по формуле (5). Для выполнения таких расчетов, предварительно необходимо рассчитать значение концентрации химического опасного вещества во всех расчетных точках расчетной области. После этого провести сравнение прогнозного значения концентрации (для определенного момента времени) и сравнить это значение с заданным пороговым уровнем. Пороговый уровень выбирается исходя из специфики задачи.

Модель прогноза динамики загрязнения воздушной среды в помещении

Загрязненный атмосферный воздух поступает в помещение. Такое проникновение может происходить за счет работы вентиляции или за счет инфильтрации воздуха через неплотности. Для моделирования процесса загрязнения воздушной среды в помещениях при инфильтрации в них загрязненного атмосферного воздуха используется следующее уравнение:

$$V \frac{dC}{dt} = Q C_{np} - Q C, \quad (6)$$

где $C_{np} = f(t)$ – концентрация химически опасного вещества в приточном воздухе, который поступает в помещение; C – концентрация химически опасного вещества в выходящем из помещения воздухе; V – объем помещения; Q – интенсивность воздухообмена; t – время. При применении

модели (6) считалось, что концентрация загрязнителя в помещении равна $C = 0$ для момента времени $t = 0$.

Отметим важный момент разработанной модели: концентрация C_{np} в приточном воздухе определяется расчетным путем, на основе решения уравнений (1), (3). Эта величина изменяется с течением времени, т.к. происходит формирование шлейфа от источника загрязнения. Поэтому, концентрация химически опасного вещества в помещении также будет зависеть от времени, а значит, от времени будет зависеть и риск поражения людей в помещении.

Интенсивность воздухообмена рассчитывается с помощью следующего уравнения [8]:

$$Q = ELA \cdot \sqrt{f_s^2 |\Delta T| + f_w^2 U^2}, \quad (7)$$

где f_s – параметр, учитывающий процесс инфильтрации через потолок и пол; f_w – параметр, учитывающий наличие у здания других объектов; ELA – площадь инфильтрации; ΔT – перепад температур между температурой внутри помещения и снаружи; U – скорость ветра.

Для расчета риска поражения людей внутри помещения использовалась зависимость

$$R = \sum P(i)g(i), \quad (8)$$

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

Метод решения аэродинамической задачи

Для численного интегрирования уравнения для потенциала скорости применяется метод суммарной аппроксимации. Уравнение для потенциала скорости предварительно записывается в эволюционном виде:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (9)$$

где t – фиктивное время.

Известно, что при $t \rightarrow \infty$ решение данного уравнения будет стремиться к решению уравнения Лапласа для потенциала скорости. При численном решении уравнения (9) необходимо задать поле потенциала при $t = 0$. Например, перед началом расчета, можно принять $P = 0$ во всей расчетной области для $t = 0$.

Решение уравнения (9) проводится на прямоугольной сетке, функция P – определяется в центре разностных ячеек. Решение данного уравнения

расщепляется на два шага. Разностные уравнения на каждом шаге расщепления записываются так:

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right],$$

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{P_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right].$$

На каждом шаге расщепления неизвестное значение потенциала скорости определяется по явной формуле бегущего счета. Расчет прекращается при выполнении условия:

$$\left| P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n \right| \leq \varepsilon, \quad (10)$$

где ε – малое число (например, $\varepsilon = 0,001$); n – номер итерации.

После определения поля потенциала скорости рассчитываются компоненты вектора скорости воздушной среды по зависимостям:

$$u_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x},$$

$$v_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Компоненты вектора скорости воздушной среды рассчитываются на гранях разностных ячеек (контрольных объемов), что позволяет построить консервативную разностную схему для уравнения переноса химически опасного вещества.

Порядок решения задачи

Оценка риска токсичного поражения людей внутри помещений осуществляется в следующей последовательности:

- 1) формируется блок данных относительно вероятных метеоситуаций PW_i , характерных для области, где находятся здания;
- 2) рассчитывается уровень химического загрязнения для вероятных метеоситуаций (на этом этапе проводится численное интегрирование уравнений (1) и (3) для конкретной метеоситуации);
- 3) определяются зоны, где концентрация превышает пороговое значение при конкретной метеоситуации (как для открытой местности, так и для помещений);
- 4) осуществляется построение матрицы риска для конкретного временного слоя.

Данный алгоритм оценки риска реализован в разработанном пакете программ.

Результаты

Разработанный пакет программ был использован для решения модельной задачи. Рассматривалась площадка где расположены три

здания. Возле первого здания, в двух местах происходит выброс аммиака. Эмиссия аммиака осуществляется в течение 8 мин. Ставится задача оценить риск токсичного поражения людей на открытой местности и внутри помещений. Рассматривались следующие вероятностные метеоситуации: скорость ветра 4 м/с – вероятность 45%; скорость ветра 7 м/с – 55%.

На первом этапе расчета определялась динамика формирования зоны химического заражения на открытой местности.

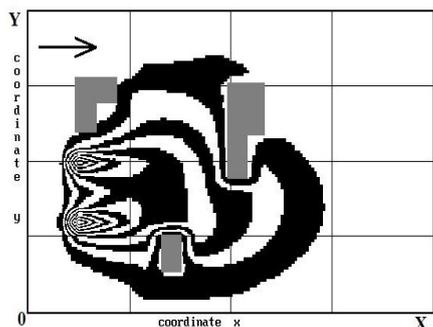


Рис. 1. Зона химического заражения (t = 9 сек)

Zone of chemical contamination (t = 9 sek)

Рис.1,2 иллюстрирует этапность формирования этой зоны (скорость ветра 7 м/с). Направление ветра показано стрелкой на каждом рисунке.

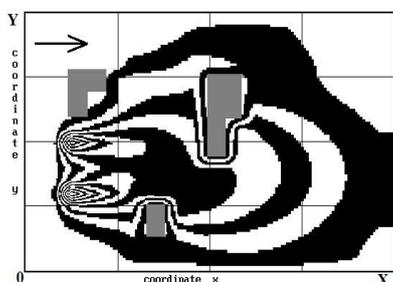


Рис. 2. Зона химического заражения (t = 15 сек) /

Zone of chemical contamination (t = 15 sek)

Из рис.1,2 видно, что достаточно быстро происходит формирование обширной зоны химического заражения на открытой местности. Отчетливо видно, как токсичный газ заходит за здания, т.е. за зданиями может произойти токсичное поражение людей на открытой местности. Для того чтобы оценить риск такого поражения людей на открытой местности необходимо рассчитать территориальный риск для рассматриваемых метеоситуаций. На рис. 3 показана матрица территориального риска для открытой местности. За пороговое значение принималась величина максимально разовой ПДК для аммиака. Каждое число на рис. 3 показывает величину риска в процентах. Таким образом, если в

расчетной точке концентрация аммиака превышала это пороговое значение, то считалось, что может иметь место поражение людей.

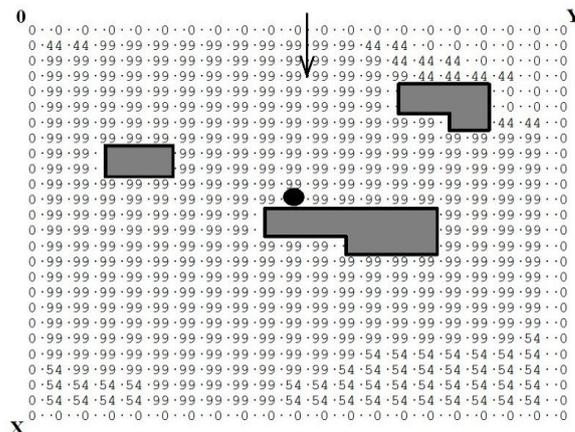


Рис. 3. Матрица территориального риска (t=16 сек)

Matrix of territorial risk (t=16 sek)

Как видно из представленного рисунка большая часть зоны подвергается риску токсичного поражения людей на открытой местности при рассмотренных метеоситуациях.

Загрязненный атмосферный воздух инфильтруется внутрь помещений. Будем считать, что поступление загрязненного воздуха происходит на наветренной стороне третьего здания. Это место показано условно на рис. 3 черным кружком. При расчете полагалось, что в случае первой метеоситуации вероятность пребывания людей в помещении составляет 30%, а в случае второй метеоситуации – 70%. В табл. 1 представлены прогнозные данные относительно величины риска поражения людей в помещении при затекании в нее загрязненного атмосферного воздуха.

Таблица 1

Риск поражения людей внутри помещения / The risk of hitting people indoors

время	риск
t = 4 сек	0
t = 8,4 сек	R = 38%
t = 12,6 сек	R = 52%

Как видно из табл. 1, для рассматриваемых ситуаций риск поражения людей внутри помещения составляет порядка 50%. Если сравнить с риском на открытом пространстве, то он составляет – 100%. Таким образом, помещение выполнило защитную функцию, т.е. разработанная модель позволяет выполнить оценку защитной функции помещений.

Выводы

В статье рассмотрен метод оценки территориального риска на открытой местности (урбанизиро-

ванная территория) в случае эмиссии химически опасного вещества. Оценка риска осуществляется на базе расчета зон загрязнения для различных (вероятностных) метеоусловий. Метод позволяет выполнить оценку риска токсичного поражения людей внутри зданий при затекании в них загрязнен-

ного воздуха. Дальнейшее совершенствование выбранного научного направления следует проводить в области создания 3D модели для расчета территориального риска на урбанизированной территории.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алымов, В. Т. Техногенный риск: Анализ и оценка: Учебное пособие для вузов / В. Т. Алымов, Н. П. Тарасова. – М. : ИКЦ «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. – Д. : «Акцент ПП», 2014. – 136 с.
3. Оценка техногенного риска при эмиссии опасных веществ на железнодорожном транспорте [Текст] / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, П. С. Кириченко, Л. Я. Мунтян. – Кривой Рог : Изд. Р. А. Козлов, 2017. – 127 с.
4. Стоецкий В.Ф., Голинько В.И., Дранишников Л.В. Оценка риска при авариях техногенного характера //Научовий вісник НГУ, 2014, №3, с.117-124.
5. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст] / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К. : Наук. думка, 1997. – 368 с.
6. Anthony Michael Barret (2009), “Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness. Dissertation” (*Pittsburg, Pennsylvania, USA*), 123p.
7. Biliaiev, M. (2012), “Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography”, *Air Pollution Modeling and its Application XXI (Springer)*. – P. 87-91.
8. 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.
9. John S. Nasstrom, Gayle Sugiyama, Ronald L. Baskett, Shawn C. Larsen and Michael M. Bradley (2007), “The National Atmospheric Release Advisory Center (NARAC) Modeling and Decision Supports System for Radiological and NUCLEAR Emergency Preparedness and Response” (*Int. J. Emergency Management*), no. 3, vol. 4, pp. 1-32.

REFERENCES

1. Alymov, V.T., Tarasova N.P. *Tekhnogennyy risk: Analiz i otsenka* [Technogenic risk: Analysis and evaluation]. *Uchebnoye posobiye dlya vuzov* [A manual for higher education institutions]. Moscow: IKTs «Akademkniga», 2004, 118 p. (in Russian).
2. Belyayev N.N., Gunko E.Yu., Rostochilo N. V. *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikh opasnykh veshchestv* [Protection of buildings from the penetration of hazardous substances into them]. *Monografiya* [Monograph]. Dnepropetrovsk: «Aktsept PP», 2014, 136 p. (in Russian).
3. Belyaev N.N., Gun'ko E.Yu., Kirichenko P.S. and Muntyan L.Ya. *Otsenka tekhnogennoho riska pri emissii opasnykh veshchestv na zheleznodorozhnom transporte* [Assessment of man-made risk in the emission of hazardous substances in railway transport]. Krivoy Rog: Kozlov R.A. Publ., 2017, 127 p. (in Russian).
4. Stoetskiy V.F., Golin'ko V.I. and Dranishnikov L.V. *Otsenka riska pri avaryakh tekhnogennoho kharaktera* [Risk assessment for accidents of anthropogenic nature]. *Naukovyi visnyk NHU* [Scientific bulletin of NMU]. 2014, no. 3. pp. 117-1124. (in Russian).
5. Zgurovskiy M.Z., Skopetskiy V.V., Khrushch V.K. and Belyaev N.N. *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede* [Numerical modeling of pollution spreading in the environment]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1997. 368 p. (in Russian).
6. Anthony Michael Barret (2009), “Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness. Dissertation” (*Pittsburg, Pennsylvania, USA*), 123p.
7. Biliaiev, M. (2012), “Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography”, *Air Pollution Modeling and its Application XXI (Springer)*. – P. 87-91.
8. 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.
9. John S. Nasstrom, Gayle Sugiyama, Ronald L. Baskett, Shawn C. Larsen and Michael M. Bradley (2007), “The National Atmospheric Release Advisory Center (NARAC) Modeling and Decision Supports System for Radiological and NUCLEAR Emergency Preparedness and Response” (*Int. J. Emergency Management*), no. 3, vol. 4, pp. 1-32.

Надійшла до редколегії 5.10.2018 р.