

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 502.3:504.5

Н. Н. БЕЛЯЕВ^{1*}, И. В. КАЛАШНИКОВ^{2*}, И. В. КЛИМЕНКО^{3*}, В. А. КОЗАЧИНА^{4*}

^{1*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}ГП «Проектно-изыскательный институт железнодорожного транспорта «Укрзалізничпроект», ул. Конарева, 7, Харьков, Украина, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, эл. почта uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

^{3*}Каф. «Высшая математика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1746-9118

^{4*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

3D ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО РИСКА ПРИ ТЕРАКТЕ

Цель. Работа предполагает разработку 3D численной модели для оценки территориального риска в случае теракта с использованием химического агента. **Методика.** Для описания процесса рассеивания в атмосфере химического агента, выброшенного в случае теракта, используется трехмерное уравнение массопереноса примеси в атмосферном воздухе. Уравнение учитывает поле скорости ветрового потока, атмосферную диффузию, интенсивность эмиссии химического агента, наличие зданий возле места выброса химически опасного вещества. Для численного интегрирования моделирующего уравнения используется конечно-разностный метод. Особенностью разработанной численной модели является возможность оценки территориального риска в случае теракта при различных метеоусловиях и наличии зданий. Для расчета поля скорости ветрового потока в условиях застройки применяется трехмерное уравнение для потенциала скорости. **Результаты.** Разработанная численная модель и пакет программ могут быть использованы для оценки территориального риска как в случае терактов с применением химических агентов, так и в случае экстремальных ситуаций на химически опасных объектах и транспорте. Построенная численная модель может быть реализована на компьютерах малой и средней мощности, что позволяет широко использовать ее для решения задач рассматриваемого класса, при разработке плана ликвидации аварийной ситуации. Представлены результаты вычислительного эксперимента, позволяющие оценить возможности предложенного метода оценки территориального риска в случае теракта с использованием химического агента. **Научная новизна.** Предложена эффективная численная модель для оценки территориального риска в случае теракта с применением химически опасного вещества. Метод может быть использован для оценки территориального риска в условиях городской застройки, что позволяет получать адекватные данные о возможных зонах поражения. Метод основан на численном интегрировании фундаментального уравнения массопереноса, выражающего закон сохранения массы в жидкой среде. **Практическая значимость.** Предложенный метод оценки территориального риска в случае теракта с применением химического агента может быть использован для расчета зон поражения возле административных зданий, центров и других социально значимых объектов.

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

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Введение

Теракты с применением химических (биологических) агентов представляют собой уже реальную угрозу для населения разных стран [1-4, 6, 7-9, 11]. В качестве агентов могут быть использованы как химически опасные вещества, применяемые в различных отраслях промышленности (хлор, аммиак и т. под.), так и специальные, разработанные для боевого применения. Если рассматривать теракт в селитебной зоне, то особенностью его является ограниченный по массе и по времени выброс агента, т. е. эмиссия – полунепрерывная. Это связано с тем, что незаметно поставить в селитебную зону большие емкости с химическим (биологическим) агентом достаточно сложно. Например, емкостью для опасного вещества может являться баллон для топлива, используемый на автозаправочных станциях, но заполненный поражающим агентом.

Если теракт имеет место на промышленном объекте или в транспорте, то выброс опасного вещества является более мощным и происходит значительно дольше по времени. В случае теракта, сопровождающегося эмиссией химического (биологического) агента, в атмосфере формируется зона загрязнения, интенсивность которой в различных точках области различна. В определенных местах и в определенные моменты времени значение концентрации агента будет выше некоторого порогового значения (например, смертельной концентрации). Эта поражающая концентрация будет зависеть в первую очередь от мощности выброса и от метеоусловий.

Актуальной проблемой является прогноз риска поражения людей в селитебной зоне при возможных терактах с применением химических (биологических) агентов. Такой прогноз может быть выполнен только методом математического моделирования.

Цель

Основной целью данной работы является разработка 3D численной модели для оценки территориального риска при террористической атаке, сопровождающейся эмиссией химического агента в условиях застройки.

В настоящее время в Украине для оценки размеров и интенсивности зон химического за-

ражения используют методику ОНД-86, методику прогноза последствий аварий на химически опасных объектах и транспорте, модель Гаусса. За рубежом оценку зон поражения проводят чаще всего по модели Гаусса [4, 10], методом CFD-моделирования [2, 3, 12]. Следует подчеркнуть, что применение CFD-моделирования дает возможность получать прогнозные данные с учетом такого важного фактора, как наличие зданий в зоне рассеивания опасного вещества. За рубежом CFD-модели основаны на применении уравнений Навье–Стокса совместно с определенной моделью турбулентности, что приводит к значительным затратам компьютерного времени, даже при реализации моделей на мощных зарубежных компьютерах. Расчет одного варианта задачи может длиться несколько суток, что неудобно при проведении серийных расчетов.

Методика

Создание 3D CFD-модели необходимо для расчета аэродинамики обтекания зданий и оценки территориального риска при теракте на урбанизированной территории.

При оценке территориального риска будем учитывать, что зона заражения различна для различных метеоситуаций $P(W_i)$. Под определенной метеоситуацией будем понимать конкретное значение скорости и направления ветра.

Вероятность реализации конкретной метеоситуации в регионе известна и определяется по зависимости [1]:

$$P(W_i) = N_{\Pi} / T, \quad (1)$$

где N_{Π} – число дней (часов), соответствующих определенной метеоситуации; T – период наблюдений.

Для оценки потенциального территориального риска необходимо оценить вероятность для человека, находящегося в каждой точке области возле атакуемого объекта, оказаться под действием шлейфа химически опасного вещества.

Вероятность попадания человека под действие шлейфа химически опасного вещества определяется следующим образом:

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

$$P(W)_{\Sigma} = \sum_{i=0}^n P(W_i), \quad (2)$$

где $P(W)_{\Sigma}$ – суммарная вероятность всех рассматриваемых метеоситуаций, при которых человек попадает в зону воздействия источника эмиссии и получает токсичное заражение.

Расчет зоны заражения для каждого (вероятного) метеоусловия выполняется на базе трехмерного уравнения массопереноса [2, 3, 5, 8]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)C}{\partial z} + \sigma C = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \\ + \sum Q_i(t) \delta(x - x_i(t)) \delta(y - y_i(t)) \delta(z - z_i), \quad (3) \end{aligned}$$

где C – концентрация химического (биологического) агента в атмосферном воздухе; σ – коэффициент, учитывающий распад агента; u, v, w – компоненты вектора скорости воздушного потока; w_s – скорость гравитационно-оседания примеси; $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$ – коэффициенты атмосферной турбулентной диффузии; Q – интенсивность выброса агента; $\delta(x - x_i)(y - y_i)(z - z_i)$ – дельта-функция Дирака; x_i, y_i, z_i – координаты источника эмиссии агента; t – время.

Поскольку рассматривается теракт в селитебной зоне или в промышленной зоне вблизи зданий, то возникает необходимость расчета поля скорости ветрового потока (параметры u, v, w). Для этого расчета при наличии зданий будем использовать модель потенциального течения:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0, \quad (4)$$

где P – потенциал скорости.

После определения поля потенциала скорости осуществляется расчет компонент вектора скорости воздушного потока:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}; \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}; \quad w = \frac{\partial P}{\partial z}.$$

Постановка краевых условий для моделирующих уравнений (3, 4) рассмотрена в [2, 3, 5].

Для численного интегрирования уравнения (4) используется метод Рундсона, а для численного интегрирования уравнения переноса примеси применяется неявная разностная схема расщепления [2, 5].

Расчет территориального риска. Таким образом, при прогнозировании химической атаки террориста необходимо для конкретной точки конкретной области (поля) выполнить расчеты по формуле (5). Для их выполнения предварительно необходимо рассчитать значение концентрации химического агента в точке расположения конкретного человека, для конкретной метеоситуации, и определить, насколько эта величина превосходит заданный пороговый уровень.

Алгоритм решения. Оценку территориального риска (прогноз последствий) при теракте и при вероятной метеорологической ситуации PW будем осуществлять в такой последовательности [3]:

1) на *первом* этапе решения задачи формируется блок данных относительно инициирующего события (возможное место эмиссии химически опасного вещества, интенсивность, режим эмиссии, вид химического агента);

2) на *втором* этапе формируется блок данных относительно вероятных метеоситуаций PW_i , характерных для области, где находится атакуемый объект;

3) на *третьем* этапе рассчитывается уровень химического заражения для вероятных метеоситуаций (на этом этапе проводится численное интегрирование уравнений (1) и (3) для конкретной метеоситуации);

4) на *четвертом* этапе определяются зоны, где концентрация превышает пороговое значение (например, смертельную концентрацию) при конкретной метеоситуации;

5) на *пятом* этапе осуществляется построение поля риска для рассматриваемого объекта.

Данный алгоритм оценки риска реализован в разработанном коде «RISK–3D Q».

Результаты

Разработанный код был использован для решения следующей модельной задачи. Рассматривается сценарий атаки, когда возле двух

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

зданий происходит эмиссия хлора в двух местах. Полагается, что на момент атаки возможны такие значения скорости ветра: 3 м/с и 6 м/с.

На рис. 1 показаны изолинии концентрации хлора для момента времени 110 с, при скорости ветра 6 м/с (уровень $z = 2\text{ м}$). Из данного рисунка видно, что при эмиссии химически опасного вещества формируется зона заражения, которая охватывает оба здания и создает угрозу для людей, находящихся на любой стороне зданий.

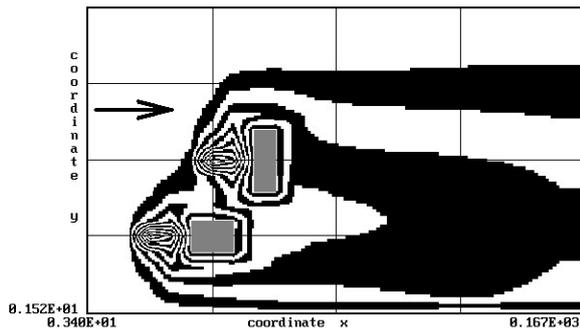


Рис. 1. Зона химического заражения при атаке террориста

Fig. 1. Zone of chemical contamination after the chemical attack of a terrorist

Это особенно хорошо видно из рис. 2, где представлена матрица территориального риска в районе химической атаки (момент времени 110 с) при вероятных метеоситуациях. Вероятность заражения людей возле здания показана в процентах. Принимается, что заражение наступает, если концентрация хлора в расчетной точке превышает 3 мг/м^3 .

Как видно из рис. 2, зона заражения (риск до 99 %) формируется не только возле зданий, но и за ними. То есть для рассматриваемого сценария здания не выполняют защитную функцию барьера.

Отметим, что время расчета составляет порядка 10 сек.

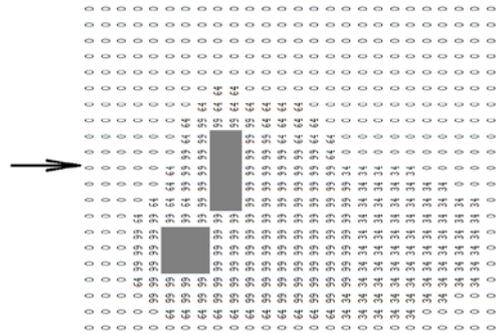


Рис. 2. Матрица территориального риска (уровень 3 м) при химической атаке террориста

Fig. 2. Matrix of territorial risk (level $z=2\text{ m}$) after the chemical attack of a terrorist

Научная новизна и практическая значимость

Разработана 3D численная модель, позволяющая оценить величину территориального риска в случае теракта с применением химического агента в условиях застройки (селитебная зона или промышленная площадка).

Особенностью построенной модели является использование стандартной исходной информации, быстрота в получении прогнозных данных и удобство для анализа получаемых результатов.

Выводы

В работе представлена 3D-модель для оценки территориального риска при атаке террориста с применением химически опасного вещества и рассеиванием химического агента в условиях застройки. В основу расчета риска положено численное моделирование рассеивания опасного вещества в условиях застройки с последующей оценкой размеров зон поражения для каждой вероятной метеоситуации.

Дальнейшее совершенствование выбранного научного направления следует проводить в области создания 3D-модели для расчета территориального риска на базе уравнений, описывающих вязкое движение воздушного потока.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

3. Оценка техногенного риска при эмиссии опасных веществ на железнодорожном транспорте / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гулько, П. С. Кириченко, Л. Я. Мунтян. – Кривой Рог : Р. А. Козлов, 2017. – 127 с.
4. 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.
5. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Киев : Наук. думка, 1997. – 368 с.
6. 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.
7. Berlov, O. V. Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo / O. V. Berlov // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 48–54. doi: 10.15802/stp2016/60953
8. 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. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8_15
9. Cefic Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations J Verlinden [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Documents/Cefic%20guidance%20on%20risk%20assessment.pdf> – Загл. с экрана. – Проверено : 29.01.2018.
10. Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling / Zahra Naserzadeh, Farideh Atabi, Faramarz Moattar, Naser Moharram Nejad // Bioscience Biotechnology Research Communication. – 2017. – Vol. 10 (1). – P. 192–204.
11. Protective Action Criteria. A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations [Электронный ресурс] / Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. – Edmonton, Alberta, 2017. – Режим доступа: <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> – Загл. с экрана. – Проверено : 14.06.2018.
12. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes / Ondrej Zavila, Pavel Dobes, Jakub Dlabka, Jan Bitta // Bezpecnostni vyzkum. The Science for Population Protection. – 2015. – № 2. – P. 1–9.

М. М. БЛЯЄВ^{1*}, І. В. КАЛАШНІКОВ^{2*}, І. В. КЛИМЕНКО^{3*}, В. А. КОЗАЧИНА^{4*}

^{1*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}Держ. підприємство «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту України «Укрзалізничпроект», вул. Конарева, 7, Харків, Україна, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, ел. пошта uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

^{3*}Каф. «Вища математика», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1746-9118

^{4*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

3D ЧИСЕЛЬНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕРИТОРІАЛЬНОГО РИЗИКУ ПРИ ТЕРАКТІ

Мета. Робота передбачає розробку 3D чисельної моделі для оцінки територіального ризику в разі терористичного нападу з використанням хімічного агента. **Методика.** Для опису процесу розсіювання в атмосфері хімічного агента, викинутого у випадку теракту, використовується рівняння масопереносу домішки в атмосферному повітрі. Рівняння враховує швидкість вітрового потоку, атмосферну дифузію, інтенсивність емісії хімічного агента, наявність будівель біля місця викиду хімічно небезпечної речовини. Для чисельного інтегрування моделюючого рівняння використовується кінцево-різницевий метод. Особливістю розробленої чисельної моделі є можливість оцінки територіального ризику в разі теракту при різних метеоумовах та наявності будівель. Для розрахунку поля швидкості вітрового потоку в умовах забудови використовується тривимірне рівняння для потенціалу швидкості. **Результати.** Розроблена спеціалізована чисельна модель та

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

пакет програм можуть бути використані для оцінки територіального ризику як у випадку терактів із застосуванням хімічних агентів, так і в разі екстремальних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах і транспорті. Метод може бути реалізований на комп'ютерах малої та середньої потужності, що дозволяє широко використовувати його для вирішення задач даного класу. Представлені результати обчислювального експерименту, що дозволяють оцінити можливості запропонованого методу оцінки територіального ризику в разі терористичного нападу з використанням хімічного агента. **Наукова новизна.** Запропоновано ефективний метод оцінки територіального ризику в разі теракту зі застосуванням хімічно небезпечної речовини. Метод може бути використаний для оцінки територіального ризику в умовах міської забудови, що дозволяє отримувати адекватні дані про можливі зони ураження. Метод заснований на чисельному інтегруванні фундаментального рівняння масопереносу, що виражає закон збереження маси в рідкому середовищі. **Практична значимість.** Запропонований метод оцінки територіального ризику в разі терористичного нападу зі застосуванням хімічного агента може бути використаний для розрахунку зон ураження біля адміністративних будівель, центрів та інших соціально значущих об'єктів.

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

M. M. BILIAIEV^{1*}, I. V. KALASHNIKOV^{2*}, I. V. KLYMENKO^{3*}, V. A. KOZACHYNA^{4*}

^{1*}Dep. «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 water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}State Enterprise «Design and Exploration Institute of Railway Transport of Ukraine «Ukrzaliznichproekt», Konarev St., 7, Kharkiv, 61052, tel. +38 (057) 724 41 25, e-mail uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

^{3*}Dep. «Higher Mathematics», 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 water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1746-9118

^{4*}Dep. «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 v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

3D NUMERICAL MODEL FOR TERRITORIAL RISK ASSESMENT AFTER TERRORIST ACT

Purpose. The paper deals with the development of 3D numerical model for a territorial risk assessment in a case of a terrorist attack with usage of a chemical agent. **Methodology.** To describe the process of chemical agent dispersion in the atmosphere, emitted in a case of a terrorist attack, authors used three-dimensional equation of mass transfer of an admixture in the atmospheric air. The equation takes into account a velocity of the wind flow, atmospheric diffusion, an intensity of chemical agent emission, a buildings presence near a place of a chemically hazardous substance release. For numerical integration of the modeling equation, a finite difference method is used. A feature of the developed numerical model is possibility of a territorial risk assessment in a case of a terrorist attack under different weather conditions and buildings presence. For calculation of wind flow velocity field in a case of building presence 3D equation for potential of velocity is used. **Findings.** The specialized numerical model and software package can be used for a territorial risk assessment, both in a case of terrorist attacks with usage of chemical agents and in a case of extreme situations at chemically hazardous facilities and transport. The method can be implemented on small and medium-powered computers, which allows it to be widely used for solving this class of problems, when developing an emergency response plan. The results of a computational experiment are presented that allow estimating possibilities of the proposed method for assessing a territorial risk in a case of a terrorist attack with usage of chemical agent. **Originality.** The effective method of a territorial risk assessment in a case of a terrorist attack with usage of a chemically hazardous substance is proposed. The method can be used to assess a territorial risk in an urban environment, which allows obtaining adequate data about possible affected areas. The method is based on numerical integration of the fundamental mass transfer equation, which expresses the law of conservation of mass in a liquid medium. **Practical value.** The proposed method for a territorial risk assessment in a case of a terrorist attack with usage of a chemical agent can be used to calculate the affected areas near administrative buildings, centers and other socially significant facilities.

Keywords: territorial risk; terrorist act; chemical pollution; numerical modelling; air pollution

REFERENCES

1. Alymov, V. T., & Tarasova, N. P. (2004). *Tekhnogennyy risk. Analiz i otsenka: Uchebnoye posobie dlya vuzov*. Moscow: Akademkniga. (in Russian).
2. Belyaev, N. N., Gunko, Y. Y., & Rostochilo, N. V. (2014). *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikh opasnykh veshchestv: Monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian).
3. Belyaev, N. N., Gunko, Y. Y., Kirichenko, P. S., & Muntyan, L. Y. (2017). *Otsenka tekhnogenogo riska pri emissii opasnykh veshchestv na zheleznodorozhnom transporte*. Krivoi Rog: Kozlov R. A. (in Russian).
4. Stoetsky, V. F., Golinko, V. I., & Dranishnikov, L. V. (2014). Risk assessment in man-caused accidents. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 3, 117-124. (in Russian).
5. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., Belyaev, N. N. (1997). *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian).
6. Barret, A. M. (2009). *Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness*. (Dissertation of Doctor of Philosophy). Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, USA. (in English)
7. Berlov, O. V. (2016). Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Science and Transport Progress*, 1(61), 48-54. doi: 10.15802/stp2016/60953 (in English)
8. Biliaiev, M. M., & Kharytonov, M. M. (2012). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security*. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8_15 (in English)
9. *Cefic Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations J Verlinden*. (n.d.). Retrived from <http://www.era.europa.eu/DocumentRegister/Documents/Cefic%20guidance%20on%20risk%20assessment.pdf> (in English)
10. Zahra Naserzadeh, Farideh Atabi, Faramarz Moattar, & Naser Moharram Nejad. (2017). Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling. *Bioscience Biotechnology Research Communication*, 10(1), 192-204. (in English)
11. Government of Alberta. Protective Action Criteria: A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations. Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. Edmonton, Alberta. Retrived from <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> (in English)
12. Ondrej Zavila, Pavel Dobes, Jakub Dlabka, & Jan Bitta. (2015). The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes. *Bezpecnostni vyzkum. The Science for Population Protection*, 2, 1-9. (in English)

Статья рекомендована к публикации д.физ.-мат.н., проф. С. А. Пичуговым (Украина)

Поступила в редколлегию: 12.02.2018

Принята к печати: 30.05.18