

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 502.3:504.5

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

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

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

^{3*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

РАСЧЕТ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО РИСКА ПРИ ТЕРАКТЕ: ЭКСПРЕСС МОДЕЛЬ

Цель. Работа предполагает разработку метода оценки территориального риска в случае теракта с использованием химического агента. **Методика.** Для описания процесса рассеивания в атмосфере химического агента, выброшенного в случае теракта, используется уравнение массопереноса примеси в атмосферном воздухе. Уравнение учитывает скорость 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. **Результаты.** Разработана специализированная численная модель и пакет программ, которые 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. Метод может быть реализован на компьютерах малой и средней мощности, что позволяет широко использовать его для решения задач рассматриваемого класса. Представлены результаты вычислительного эксперимента, позволяющие оценить возможности предложенного метода оценки территориального риска в случае теракта с использованием химического агента. **Научная новизна.** Предложен эффективный метод 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

Введение

В настоящее время за рубежом повышенное внимание уделяется прогнозу последствий террористических актов с возможным применением химических или биологических агентов [1,

2, 3, 8, 9, 11]. Как отмечают зарубежные исследователи, сейчас высока доступность для террористов тех химически опасных веществ, которые используются в различных отраслях промышленности (например, хлор, аммиак и т.п.). В этой связи, за рубежом при изучении проблемы оценки последствий терактов часто

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

рассматривается эмиссия именно таких химически опасных веществ и, реже, боевых отравляющих веществ [6, 7].

Известно, что теракты чаще происходят в условиях застройки (промышленной застройки или в селитебной зоне). В этой связи, для оценки последствий возможного теракта в создаваемых математических моделях обязательно следует учесть влияние зданий на рассеивание химического (биологического) агента. Однако, следует отметить, что такой учет крайне осложняет решение задачи, поскольку для прогноза возможных зон поражения следует знать поле скорости ветрового потока между зданиями, которое надо рассчитать для всех возможных метеоситуаций. Для решения данной задачи необходимо решить аэродинамическую задачу и определить это поле скорости.

Цель

Целью данной работы является разработка метода оценки территориального риска при террористической атаке, сопровождающейся эмиссией химического агента в условиях застройки. Метод расчета основывается на создании численной модели рассеивания химического агента при теракте.

Анализ публикаций. В настоящее время в Украине не разрабатываются методы по оценке последствий терактов (с применением химических или биологических агентов) в условиях застройки. Существуют публикации, где используются нормативные методики типа ОНД-86 или методика прогноза последствий аварий на химически опасных объектах и транспорте для оценки уровня загрязнения воздушной среды при выбросе химически опасных веществ. Для оценки такого уровня загрязнения при авариях на производствах используются методики типа «Токси» [4], «Аммиак», «SLAB» [6], реализующие модель Гаусса, или аналитическое решение уравнения массопереноса, которые также не могут быть применены, поскольку не учитывают влияние зданий на рассеивание химического (биологического) агента. Одним из подходов к оценке территориального риска при экстремальных ситуациях на транспорте является применение численных кинематических моделей и др. [3, 4, 10, 12]. Следует отметить, что применение данных мо-

делей ограничено только случаем рассеивания химически опасных веществ над ровной поверхностью. Следовательно, применять данные модели для оценки последствий терактов в условиях застройки нельзя.

Методика

Методика – создание 2D численной модели для расчета аэродинамики обтекания зданий и оценки территориального риска при теракте на урбанизированной территории.

Моделирующие уравнения. Для создания адекватной модели прогноза последствий теракта с применением химического (биологического) агента необходимо учесть неравномерное поле скорости ветра при наличии застройки. В этой связи для расчета поля скорости ветрового потока при наличии зданий будем использовать модель безвихревого течения идеальной жидкости:

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

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 химического агента (биологического агента) в атмосферном воздухе применяется уравнение массопереноса, осредненное по высоте переноса примеси [2, 3, 5, 8]:

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

где C – концентрация химического (биологического) агента в атмосферном воздухе; σ – коэффициент, учитывающий распад агента; u, v – компоненты вектора скорости воздушно-го потока; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коэффициенты атмосферной турбулентной диффузии; Q – интенсивность выброса химического (биологического) агента; $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$ – дельта-функция

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Дирака; x_i, y_i – координати источника эмиссии агента; t – время.

Таким образом, для расчета вероятности попадания в зону поражения (то есть для оценки величины территориального риска) необходимо выполнить расчеты для конкретного рецептора по формуле (3). Необходимо подчеркнуть, что для решения поставленной задачи надо знать концентрацию опасного вещества в точке расположения конкретного рецептора и насколько эта величина превосходит некоторый пороговый уровень (например, ПДК или какую-либо другую величину). Следовательно, мы приходим к первоочередной задаче – определению поля концентрации опасного вещества для конкретного региона (территории) и конкретной метеоситуации.

Поле скорости ветрового потока в условиях застройки по моделирующему уравнению (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 интегрирования уравнения (1) используется метод Либмана, а для численного интегрирования уравнения переноса примеси применяется неявная разностная схема расщепления [2, 5].

Расчет территориального риска. Для оценки территориального риска при теракте с применением химического агента будем учитывать, что каждому погодному состоянию $P(W_i)$ отвечает конкретная зона загрязнения, характеризующаяся размерами и концентрацией опасного вещества. Вероятность реализации конкретной метеоситуации определяется по зависимости [1]:

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

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

Здесь под определенной метеоситуацией будем понимать конкретное значение скорости и направления ветра. Для оценки потенциального территориального риска необходимо оценить вероятность для человека, находящегося в каждой точке области, возле атакуемого объекта, оказаться под действием шлейфа (облака)

химически опасного вещества. При прогнозе нас интересуют те точки области в районе теракта, где концентрация химически опасного вещества превышает некоторое пороговое значение, при котором происходит та или иная степень поражения людей. Схематически на рис. 1 показана ситуация попадания рецепторов А, В, С под действие источника эмиссии (баллона, в котором находится токсичный газ), причем отметим, что выброс происходит в условиях застройки.



Рис. 1. Вероятность появления зон поражения для различных метеоситуаций: 1 – здание

Fig. 1. Probability of occurrence of damage areas for various weather conditions: 1 – building

Как видно из рис. 1, человек, находящийся в точке А, попадает под воздействие шлейфа опасного вещества при любой метеоситуации. Человек, который расположен в точке В, попадает под воздействие шлейфа опасного вещества при метеоситуации PW_2 , PW_3 . Человек, находящийся в точке С, попадает под воздействие шлейфа опасного вещества только при метеоситуации PW_3 . Таким образом, вероятность попадания человека под действие шлейфа химически опасного вещества определится следующим образом:

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

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

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

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 эмиссии, 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 «CHEM-RISK».

Результаты

Разработанный код был использован для решения задачи методом моделирования. На рис. 2, *a* представлена расчетная область. В этой области располагаются несколько зда-

ний. Предполагалось, что происходит теракт с эмиссией хлора. Выброс происходит между двумя зданиями. Объект атаки – фронтально расположенная зона возле последнего здания. Длительность выброса – 6 мин. Для рассматриваемого региона вероятные значения скорости ветра составляют 2 м/с (вероятность 54 %) и 5 м/с (вероятность 30 %). Стрелка на рисунке показывает направление ветра. Рассматриваются два сценария. Первый сценарий – отсутствие защиты возле объекта атаки, второй – присутствие защиты типа «трейлер», которая размещается перед объектом атаки.

На рис. 2, *a, б* показаны изолинии концентрации хлора для момента времени 190 с, при скорости ветра 5 м/с, без защиты и при защите. Из данных рисунков видно, что формируется обширная зона химического заражения, которая охватывает объект атаки.

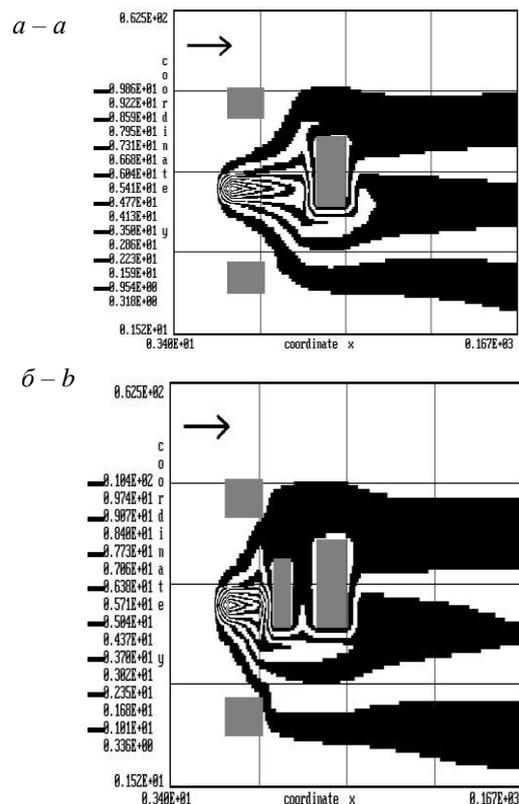


Рис. 2. Зона химического заражения при химической атаке террориста возле объекта атаки:

a – без защиты, *б* – при защите

Fig. 2. Zone of chemical contamination during a chemical attack of a terrorist:

a – no protection near the target object, *b* – with protection

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

На рис. 3, *а*, *б* представлені матриці потенціального територіального ризику в районі хімічної атаки для моменту часу 200 с, при можливих метеоситуаціях і розглядаваних сценаріях (с захистом і без захисту перед об'єктом атаки). Вероятність поразення людей вздовж будівлі показана в відсотках на кожному малюнку. Приймається, що поразення настає, якщо концентрація хлору в розрахунковій точці перевищує 3 мг/м³.

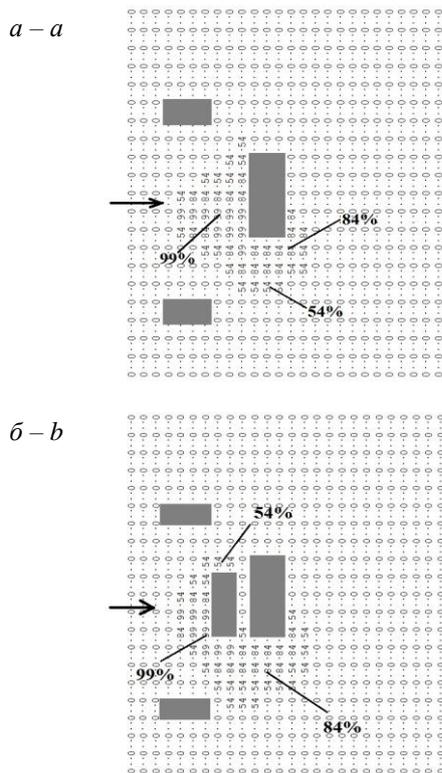


Рис. 3. Матрица территориального риска при химической атаке террориста возле объекта атаки:
а – без защиты, *б* – при защите

Fig. 3. Matrix of territorial risk in the chemical attack of a terrorist:
a – no protection near the target object, *b* – with protection

Как видно из представленных рисунков, значительному риску (до 99 %) подвергается пространство возле объекта атаки, если отсутствует защита. При наличии защиты – риск поразення людей возле объекта атаки снижается. Время расчета составляет 5 сек.

Научная новизна и практическая значимость

Разработана численная модель, позволяющая оценить величину потенциального территориального риска в случае теракта с применением химического агента.

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

Выводы

В работе представлен метод оценки территориального риска при атаке террориста с применением химически опасного вещества и рассеиванием химического агента в условиях застройки. В основу метода положен численный расчет загрязнения воздушной среды в условиях застройки с последующей оценкой размеров зон поражения. Дальнейшее совершенствование выбранного научного направления следует проводить в области создания 3D-модели для расчета территориального риска в случае химической атаки террориста.

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.
3. Оценка техногенного риска при эмиссии опасных веществ на железнодорожном транспорте / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, 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.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

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. Produced water treatment by ceramic membrane: A numerical investigation by computational fluid dynamics / Hortência Luma Fernandes Magalhães, Antonio Gilson Barbosa de Lima, Severino Rodrigues de Farias Neto, Helton Gomes Alves and Josedite Saraiva de Souza // *Advances in Mechanical Engineering.* – 2017. – Vol. 9. – Iss. 3. – P. 1–20. doi: 10.1177/1687814016688642.
11. Regucki, P. Numerical modelling of sulphate ion concentration in wastewater from a closed cooling system / Paweł Regucki, Barbara Janowska // *E3S Web of Conferences.* – 2017. – Vol. 17. – P. 1–8. doi: 10.1051/e3sconf/20171700078.
12. Tashvigh, A. A. Soft computing method for modeling and optimization of air and water gap membrane distillation – a genetic programming approach / Akbar Asadi Tashvigh, Bahram Nasernejad // *Desalination and Water Treatment.* – 2017. – Vol. 76. – P. 30–39. doi: 10.5004/dwt.2017.20696.

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

^{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. Червоноармійська, 7, Харків, Україна, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, ел. пошта uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

^{3*}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

РОЗРАХУНОК ТЕРИТОРІАЛЬНОГО РИЗИКУ ПІД ЧАС ТЕРАКТУ: ЕКСПРЕС МОДЕЛЬ

Мета. Робота передбачає розробку методу 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. **Результати.** Розроблено спеціалізовану чисельну модель та пакет програм, який може бути використаний 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 засно-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

ваний 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*}, V. A. KOZACHYNA^{3*}

^{1*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, 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», Str. Red Army, 7, Kharkov, 61052, тел. +38 (057) 724-41-25, e-mail: uzp38@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2814-380X

^{3*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

TERRITORIAL RISK ASSESMENT AFTER TERRORIST ACT: EXPRESS MODEL

Purpose. The paper involves the development of a method to assess the territorial risk in the event of a terrorist attack using a chemical agent. **Methodology.** To describe the process of chemical agent scattering in the atmosphere, ejected in the event of a terrorist attack, the equation of mass transfer of an impurity in atmospheric air is used. The equation takes into account the velocity of the wind flow, atmospheric diffusion, the intensity of chemical agent emission, the presence of buildings near the site of the emission of a chemically hazardous substance. For numerical integration of the modeling equation, a finite difference method is used. A feature of the developed numerical model is the possibility of assessing the territorial risk in the event of a terrorist attack under different weather conditions and the presence of buildings. **Findings.** A specialized numerical model and software package has been developed that can be used to assess the territorial risk, both in the case of terrorist attacks, with the use of chemical agents, and in case of extreme situations at chemically hazardous facilities and transport. The method can be implemented on small and medium-sized computers, which allows it to be widely used for solving the problems of the class under consideration. The results of a computational experiment are presented that allow estimating possibilities of the proposed method for assessing the territorial risk in the event of a terrorist attack using a chemical agent. **Originality.** An effective method of assessing the territorial risk in the event of a terrorist attack using a chemically hazardous substance is proposed. The method can be used to assess the territorial risk in an urban environment, which allows you to obtain adequate data on possible damage areas. The method is based on the 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 assessing the territorial risk in the event of a terrorist attack using 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. Biliaiev, N. N., Gunko, E. Yu., & Rostochilo, N. V. (2014). *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikh opasnykh veshchestv: Monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian).
3. Biliaiev, N. N., Gunko, E. Yu., Kirichenko, P. S., & Muntian, L. Y. (2017). *Otsenka tekhnogennogo riska pri emissii opasnykh veshchestv na zheleznodorozhnom transporte*. Krivoy 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., & Biliaiev, N. N. (1997). *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian).

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

6. Barret, A. M. (2009). *Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness*. (Dissertation) Pittsburg, 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*. (undated). Retrived from: <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Documents/Cefic%20guidance%20on%20risk%20assessment.pdf>. (In English)
10. Horteˆncia Luma Fernandes Magalhaˆes, Antonio Gilson Barbosa de Lima1, Severino Rodrigues de Farias Neto, Helton Gomes Alves, & Josedite Saraiva de Souza. (2017). Produced water treatment by ceramic membrane: A numerical investigation by computational fluid dynamics. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(3), 1-20. doi: 10.1177/1687814016688642. (in English)
11. Regucki, P., & Janowska, B. (2017) Numerical modelling of sulphate ion concentration in wastewater from a closed cooling system. *E3S Web of Conferences*, 17, 1-8. doi: 10.1051/e3sconf/20171700078. (in English)
12. Tashvigh, A. A., & Nasernejad, B. (2017) Soft computing method for modeling and optimization of air and water gap membrane distillation – a genetic programming approach. *Desalination and Water Treatment*, 76, 30-39. doi:10.5004/dwt.2017. (In English)

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

Поступила в редколлегию: 22.09.2017

Принята к печати: 10.01.2018