

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, 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 uzr38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

^{3*}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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ПОЯСА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ТЕРАКТАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ХИМИЧЕСКИХ АГЕНТОВ

Цель. Работа предполагает разработку 2D численной модели для расчета «пояса безопасности» в случае теракта с использованием химического агента. Пояс безопасности является границей, за которой эмиссия опасного вещества при теракте приведет к нежелательным последствиям на месте расположения объекта атаки. **Методика.** Для решения поставленной задачи используется уравнение, сопряженное с уравнением массопереноса в атмосферном воздухе химического агента, выброшенного в случае теракта. При моделировании учитывается поле скорости ветрового потока, атмосферная диффузия, интенсивность выброса опасного вещества. Для численного интегрирования моделирующего сопряженного уравнения вводятся новые переменные и применяется неявная разностная схема расщепления. Особенностью разработанной численной модели является возможность оперативной оценки положения пояса безопасности возле возможного объекта атаки. **Результаты.** Разработанная численная модель и компьютерная программа могут быть использованы для научно обоснованной оценки положения пояса безопасности возле значимых объектов в случае возможных терактов с применением химических (биологических) агентов. 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 расчета положения пояса безопасности в случае теракта с использованием химического агента. **Научная новизна.** Предложен эффективный метод расчета положения пояса безопасности возле объекта, который может быть целью террористической атаки с применением химически опасного вещества. Метод основан на численном интегрировании уравнения, являющегося сопряженным к уравнению массопереноса химически опасных веществ в атмосферном воздухе. **Практическая значимость.** Предложенный метод расчета положения пояса безопасности возле объекта, который может быть целью террористической атаки с применением химически опасного вещества, может быть использован для организации защитных мероприятий, направленных на минимизацию последствий терактов.

Ключевые слова: теракт; химическое загрязнение; сопряженное уравнение; численное моделирование; загрязнение атмосферы

Введение

Проблема терактов приобрела в последнее время очень большое значение [1, 2, 4-14]. Минимизация последствий терактов – крайне важная задача, успешное решение которой зависит

от ряда факторов и условий. Одним из факторов, который минимизирует негативные последствия терактов с применением химически опасных веществ, является наличие «пояса безопасности» возле возможного объекта атаки (рис.1).

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Это такая граница, за которой выброс опасного агента приведет к крайне нежелательному загрязнению воздушной среды с тяжелыми последствиями для человека.



Рис. 1. Гипотетическая цель при террористической атаке:

1 – цель (точка «интереса»), 2 – граница пояса безопасности, 3 – направление ветра.

Fig. 1. Hypothetical target during terrorist attack:
1 – target of terrorist attack; 2 – ‘safety boundary’;
3 – wind direction

Выброс опасного агента до этой границы – не приведет к серьезному загрязнению воздуха в точке «интереса». Под точкой интереса будем понимать объект, на который направлена атака террориста (развлекательные центры, административные здания и т.д.). Кроме этого, мы должны принимать во внимание, что при теракте с применением химического (биологического) агента важнейшим параметром является время: у людей, в зоне атаки должно быть *время* на укрытие.

Формализуем выше сказанное: координаты места атаки (место выброса опасного агента) обозначим через $r_0 = (x_0, y_0)$, рис.1. Координаты объекта атаки (точки «интереса») обозначим через $r_i = (x_i, y_i)$. До момента времени τ концентрация опасного вещества в точке «интереса» не должна превышать некоторого порогового значения φ . То есть:

$$C(r_i, \tau) < \varphi \quad (1).$$

Пороговое значение φ – это, например, концентрация, при которой наступает потеря

сознания человеком, удушье т.д. Время τ определяет «запас» времени у людей на эвакуацию.

Для решения задачи по оценке уровня загрязнения воздушной среды с применением химических (биологических) агентов, а значит для определения положения пояса безопасности, можно использовать аналитические или численные модели [3, 5, 8]. Но применение таких моделей для решения поставленной задачи требует проведения десятков расчетов, в ходе которых варьируются координаты возможного места выброса опасного вещества x_0, y_0 , поскольку эти координаты – неизвестны (неизвестно место атаки террориста). То есть, задача решается перебором различных вариантов места выброса при теракте. При этом необходимо учитывать характерные для региона метеоусловия. Применение такого подхода требует много времени на получение требуемого результата. В этой связи, актуальной проблемой является разработка эффективных методов решения задач по определению границы пояса безопасности при возможных терактах.

Цель

Целью данной работы является разработка 2D численной модели для определения границ пояса безопасности в случае возможных терактов с применением химических (биологических) агентов.

Методика

Разработку математической модели для оценки уровня загрязнения атмосферы при теракте будем проводить для двухмерного случая. В общем случае, прогноз загрязнения атмосферы при теракте с применением химического (биологического) агента основывается на решении уравнения переноса загрязняющего вещества в атмосфере [2, 3, 5, 7, 8]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \sigma C = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \\ + Q\delta(x - x_0)\delta(y - y_0), \quad (2) \end{aligned}$$

ЭКОЛОГИЯ НА ТРАНСПОРТІ

где C – концентрация химического (биологического) агента в атмосферном воздухе; σ – коэффициент, учитывающий распад агента в атмосфере; u, v – компоненты вектора скорости воздушного потока; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коэффициенты атмосферной турбулентной диффузии; Q – интенсивность выброса агента при теракте; $\delta(x-x_0)\delta(y-y_0)$ – дельта-функция Дирака; x_0, y_0 – координаты источника эмиссии агента при теракте; t – время.

Следует отметить, что масса опасного вещества – также заранее неизвестна, но можно предположить, что она *не будет* превосходить некоторой величины M_{\max} , соответствующей той массе, которую можно максимально близко и «незаметно» доставить к объекту атаки. Будем полагать, что выброс опасного вещества при теракте происходит очень быстро, поэтому в математической модели принимаем, что выброс – мгновенный.

Краевые условия для уравнения (2) записываются так [3]:

$$\tilde{N} = \tilde{N}_0 \quad \text{при } t = 0,$$

$C = 0$ на границах расчетной области, где C_0 – известная величина

При решении прогнозных задач (определение размеров зон заражения, их изменение с течением времени, определение времени подхода облака токсичного вещества к точке «интереса» и т.д.) необходимо задать информацию о точке выброса, т.е. координаты x_0, y_0 . Решение прогнозных задач на базе уравнения (2) называется решением прямой задачи массопереноса.

Однако, как уже отмечалось, координаты возможного места выброса опасного вещества неизвестны до совершения теракта. Поэтому для определения границы пояса безопасности необходимо провести серию расчетов на базе уравнения (2), чтобы путем перебора различных вариантов места эмиссии опасного вещества (т.е. путем перебора значений x_0, y_0) найти границу пояса безопасности.

В данной работе используем другой подход для определения границы пояса безопасности. Этот подход основывается на идее Г. И. Марчука применения сопряженного уравнения (3) [3]:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial C^*}{\partial t} - \frac{\partial u C^*}{\partial x} - \frac{\partial v C^*}{\partial y} + \sigma C^* = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C^*}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C^*}{\partial y} \right) + p, \end{aligned} \quad (3)$$

где C^* – функция, сопряженная с функцией C , p – некоторая функция [3].

Краевые условия для сопряженной задачи имеют вид [3]:

$C^* = C_T^*$ – концентрация химического агента в атмосферном воздухе при $t=T$; $C^* = 0$ – на границах расчетной области.

Вид функции p – может быть крайне разнообразным [3]. В данной работе вид функции p будет следующим:

$$p(x, y, t) = \delta(x-x_i)\delta(y-y_i)\delta(t-\tau) \quad (4)$$

Если решение сопряженного уравнения (2) найдено, то, далее, необходимо найти значение функционала следующего вида [3]

$$I = Q \int_0^T C^*(r_0, t) dt, \quad (5)$$

Построив изолинии этого функционала мы находим решение поставленной задачи из условия

$$I(r_0, \tau) < \varphi \quad (6)$$

Для решения сопряженной задачи (3), введем новые переменные [3]:

$$u' = -u, \quad v' = -v, \quad t' = T - t.$$

Решение сопряженной задачи начинается с момента времени $t=T$.

При использовании новых переменных, уравнение (3) принимает вид уравнения (2). Далее, проведем аппроксимацию производных, следуя [2, 5]. Аппроксимация производной по времени осуществляется так:

$$\frac{\partial \tilde{N}^*}{\partial t'} \approx \frac{C_{ij}^{*n+1} - C_{ij}^{*n}}{\Delta t'}$$

Далее, в формулах, символы «*», «'» будем опускать.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Первые производные аппроксимируются соотношениями [5]

$$\frac{\partial u \tilde{N}}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial v C}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y},$$

где $u^+ = \frac{u+|u|}{2}$, $u^- = \frac{u-|u|}{2}$, $v^+ = \frac{v+|v|}{2}$, $v^- = \frac{v-|v|}{2}$.

Для аппроксимации первых производных используем формулы [2, 5]:

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{ij}^{n+1} - u_{ij}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{ij}^{n+1} - v_{ij}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}.$$

Аппроксимация вторых производных осуществляется так [5]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \approx \mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_x \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} =$$

$$= M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \approx \mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_y \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta x^2} =$$

$$= M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}.$$

С учетом приведенных обозначений разностных операторов записываем разностный аналог уравнения (2):

$$\frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + L_y^+ C^{n+1} +$$

$$+ L_y^- C^{n+1} + \sigma C_{ij}^{n+1} = (M_{xx}^+ C^{n+1} + L_{xx}^- C^{n+1} +$$

$$+ L_{yy}^+ C^{n+1} + L_{yy}^- C^{n+1}) + Q_{ij} \delta_{ij}. \quad (7)$$

Теперь проведем расщепление разностного уравнения (7). Уравнения расщепления на каждом шаге записываются так:

на первом шаге ($k = \frac{1}{4}$):

$$\frac{C_{i,j}^{n+k} - C_{i,j}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{i,j}^k =$$

$$= \frac{1}{4} (M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n + M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n), \quad (8)$$

на втором шаге ($k = n + \frac{1}{2}$; $c = n + \frac{1}{4}$):

$$\frac{C_{i,j}^k - C_{i,j}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{i,j}^k =$$

$$= \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c), \quad (9)$$

на третьем шаге ($k = n + \frac{3}{4}$; $c = n + \frac{1}{2}$):

применяется зависимость (9);

на четвертом шаге ($k = n + 1$; $c = n + \frac{3}{4}$):

применяется зависимость (8).

Искомое значение функции C на каждом дробном шаге определяется по формуле «бегущего счета». На последнем расчетном шаге имеем уравнение

$$\frac{\partial C^*}{\partial t} = p.$$

Для решения данного уравнения применяется метод Эйлера.

Для программной реализации построенной численной модели использовался FORTRAN.

Результаты

Разработанный код был использован для решения модельной задачи. Рассматривался выброс хлора. Ставится задача определить положение границы пояса безопасности возле объекта возможной атаки (рис.1) для двух моментов времени $\tau = 3$ и $\tau = 5$ (время безразмерное). В обоих случаях концентрация опасного вещества для каждого момента времени не

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

должна превышать пороговое значение $\varphi = 22$ возле объекта атаки (концентрация безразмерная). Характерное направление скорости ветра показано стрелкой на приводимых ниже рисунках. На этих рисунках представлены линии функционала (4), определенные после решения сопряженного уравнения (3).



Рис. 2. Изолинии функционала (4) для момента времени $\tau = 3$ (время безразмерное)

Fig. 2. Isolines of functional (4) for the time moment $\tau = 3$ (time is dimensionless)

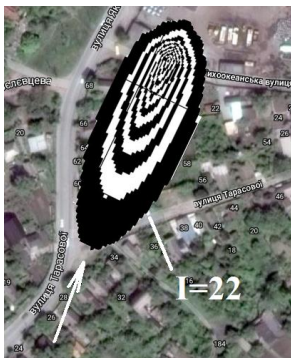


Рис. 3. Изолинии функционала (4) для момента времени $\tau = 5$ (время безразмерное)

Fig. 3. Isolines of functional (4) for the time moment $\tau = 5$ (time is dimensionless)

Размещение источника эмиссии вдоль линии $I = const$, приведет к одинаковому воздействию на уровень загрязнения атмосферы в точке «интереса». На границе пояса безопасности должны быть приняты все

меры, не позволяющие террористу ее пересечь и осуществить эмиссию опасного вещества. Как уже отмечалось выше, если эмиссия опасного вещества произойдет до границы пояса безопасности (рис.2, 3), то уровень загрязнения на объекте атаки не превысит заданного порогового значения концентрации для выбранных моментов времени τ . Иными словами, риск поражения людей в точке «интереса» будет минимальным.

Отметим, что время расчета положения границы пояса безопасности составляет 2 сек.

Научная новизна и практическая значимость

Разработана численная модель, позволяющая определить границы пояса безопасности возле объекта возможной атаки террориста, применяющего химический (биологический) агент.

Особенностью построенной модели является использование сопряженного уравнения для решения задачи и быстрота расчета.

Выводы

Предложена численная модель для определения границы пояса безопасности на базе решения сопряженной задачи в области загрязнения атмосферного воздуха при мгновенной эмиссии опасных веществ. Построенная модель может применяться при разработке стратегии минимизации последствий терактов с применением химических (биологических) агентов. Для решения сопряженного уравнения используется неявная разностная схема расщепления. Дальнейшее совершенствование данного направления следует проводить в направлении разработки численной модели, позволяющей определять границы пояса безопасности с учетом влияния застройки на формирование зон загрязнения при теракте.

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. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
4. 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.
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 [Електронний 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. Development of advanced mathematical predictive models for assessing damage avoided accidents on potentially-dangerous sea-based energy facility / Aleksandr Tumanov, Vasily Gumenyuk, Vladimir Tumanov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2017 – Vol. 90. – P. 1-11. doi: 10.1088/1755-1315/90/1/012027
11. 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.
12. Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain / Cejun Cao, Congdong Li, Qin Yang, Fanshun Zhang // Sustainability MDPI, Open Access Journal. – 2017. – Vol. 9. – Iss. 11. – P. 2103. doi:10.3390/su9112103
13. Protective Action Criteria. A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations [Електронний 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.
14. 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. КАЛАШНИКОВ^{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*}ДП «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. «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

ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖ ПОЯСУ БЕЗПЕКИ ПРИ ТЕРАКТАХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ХІМІЧНИХ АГЕНТІВ

Мета. Робота передбачає розробку 2D чисельної моделі для розрахунку «поясу безпеки» в разі терористичного нападу із використанням хімічного агента. Пояс безпеки є кордоном, за яким емісія небезпечної речовини під час теракту призведе до небажаних наслідків на місці розташування об'єкта атаки. **Методика.** Для вирішення поставленого завдання використовується рівняння, поєднане з рівнянням масо-переносу в атмосферному повітрі хімічного агента, викинутого в разі теракту. При моделюванні враховується поле швидкості вітрового потоку, атмосферна дифузія, інтенсивність викиду небезпечної речовини. Для

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

чисельного інтегрування моделюючого сполученого рівняння вводяться нові змінні та застосовується невяна різницева схема розщеплення. Особливістю розробленої чисельної моделі є можливість оперативної оцінки стану пояса безпеки біля можливого об'єкта атаки. **Результати.** Розроблена чисельна модель і комп'ютерна програма можуть бути використані для науково обґрунтованої оцінки стану пояса безпеки біля значущих об'єктів у разі можливих терактів із застосуванням хімічних (біологічних) агентів. Побудована чисельна модель може бути реалізована на комп'ютерах малої і середньої потужності, що дозволяє широко використовувати її для вирішення завдань даного класу при розробці плану ліквідації аварійної ситуації. Представлені результати обчислювального експерименту, що дозволяють оцінити можливості запропонованого методу розрахунку положення пояса безпеки в разі терористичного нападу із використанням хімічного агента. **Наукова новизна.** Запропоновано ефективний метод розрахунку положення пояса безпеки біля об'єкта, який може бути метою терористичної атаки із застосуванням хімічно небезпечної речовини. Метод заснований на чисельному інтегруванні рівняння, що є зв'язаним до рівняння масопереносу хімічно небезпечних речовин в атмосферному повітрі. **Практична значимість.** Запропонований метод розрахунку положення пояса безпеки біля об'єкта, який може бути метою терористичної атаки із застосуванням хімічно небезпечної речовини, може бути використаний для організації захисних заходів, спрямованих на мінімізацію наслідків терактів.

Ключові слова: теракт; хімічне забруднення; спряжене рівняння; чисельне моделювання; забруднення атмосфери

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, 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. «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

DEFINITION OF «SAFETY BOUNDARY» IN CASE OF TERRORIST ATTACK WITH CHEMICAL AGENTS

Purpose. The work involves the development of a 2D numerical model for calculating the «safety boundary» in the case of a terrorist attack using a chemical agent. The safety boundary is the boundary behind which the emission of a dangerous substance in a terrorist act will lead to undesirable consequences at the site of the attack object.

Methodology. To solve this problem, we used an equation conjugated with the equation of mass transfer in the atmospheric air of a chemical agent ejected in the case of a terrorist attack. The simulation takes into account the field of wind speed, atmospheric diffusion, the release intensity of a hazardous substance. For numerical integration of the modeling conjugated equation, new variables are introduced and an implicit difference splitting scheme is applied. A feature of the developed numerical model is the ability to quickly assess the position of the safety boundary near a possible object of attack. **Findings.** The developed numerical model and computer program can be used for a scientifically grounded assessment of the safety boundary position near significant objects in the event of possible terrorist attacks using chemical (biological) agents. The constructed numerical model can be implemented on computers of small and medium power, which makes it possible to widely use it to solve the problems of the considered class, when developing an emergency response plan. The results of a computational experiment are presented that allow one to evaluate the possibilities of the proposed method for calculating the position of the safety boundary in the case of a terrorist attack using a chemical agent. **Originality.** An effective method for calculating the position of the safety boundary near the facility, which may be the target of a terrorist attack using a chemically hazardous substance, is proposed. The method is based on the numerical integration of the equation, which is conjugated to the equation of mass transfer of chemically hazardous substances in the atmospheric air. **Practical value.** The proposed method for calculating the position of the safety boundary near the facility, which may be the target of a terrorist attack using a chemically hazardous substance, can be used to organize protective measures aimed at minimizing the consequences of terrorist attacks.

Ключевые слова: terrorist attack; chemical pollution; conjugated equation; numerical model; 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. Marchuk G.I. Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy [Mathematical modeling in the environmental problem]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 320 p. (in Russian)
4. 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)
5. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Belyaev, N. N. (1997). *Chislennoe modelirovanie 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, 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*. (n.d.). Retrived from <http://www.era.europa.eu/DocumentRegister/Documents/Cefic%20guidance%20on%20risk%20assessment.pdf> (in English)
10. Tumanov, A., Gumenyuk, V., & Tumanov, V. (2017). Development of advanced mathematical predictive models for assessing damage avoided accidents on potentially-dangerous sea-based energy facility. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 90*, 1-11. doi: 10.1088/1755-1315/90/1/012027 (in English)
11. 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)
12. Cao, C., Li, C., Yang, Q. & Zhang, F. (2017). Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain. *Sustainability, 9(11)*, 2103. doi: 10.3390/su9112103 (in English)
13. 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)
14. 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)

Поступила в редколлегию: 12.02.2018

Принята к печати: 30.05.18