

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 502.3:504.5

Н. Н. БЕЛЯЕВ^{1*}, А. В. БЕРЛОВ², И. В. КАЛАШНИКОВ^{3*}, В. А. КОЗАЧИНА^{4*}

^{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*}Каф. «Безопасность жизнедеятельности», Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24а, Днипро, Украина, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, эл. почта berlovaalexandr@gmail.com, ORCID 0000-0002-7442-0548

^{3*}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

^{4*}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 ЗОНЫ «УЯЗВИМОСТИ» ОБЪЕКТА ПРИ ВОЗМОЖНОМ ТЕРАКТЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ХИМИЧЕСКОГО АГЕНТА

Цель. Работа предполагает разработку численной модели для расчета зоны «уязвимости» возможного объекта атаки террориста с применением химического агента в условиях застройки. Зона «уязвимости» представляет собой территорию возле объекта атаки, где эмиссия химического агента при теракте приведет к нежелательным последствиям. Эмиссия химического агента вне зоны «уязвимости» не создаст опасной концентрации возле объекта атаки. **Методика.** Для решения поставленной задачи использовано уравнение для потенциала скорости, на базе которого определено поле скорости ветрового потока, и уравнение, сопряженное с уравнением массопереноса в атмосферном воздухе химического агента, выброшенного в случае теракта. При моделировании были учтены неравномерное поле скорости ветрового потока, атмосферная диффузия, интенсивность выброса химически опасного вещества. При численном интегрировании уравнения для потенциала скорости использован метод Самарского А. А. Для численного решения сопряженного уравнения введены новые переменные и применена неявная разностная схема расщепления. Особенностью разработанной численной модели является возможность оперативной оценки зоны «уязвимости» возле возможного объекта атаки. **Результаты.** Разработанная численная модель и компьютерная программа могут быть использованы для научно обоснованной оценки положения зоны «уязвимости» 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 в аварийной ситуации. Представлены результаты вычислительного эксперимента, позволяющие оценить возможности этой численной модели. **Научная новизна.** Предложена эффективная численная модель для расчета зоны «уязвимости» возле объекта, который может быть целью террористической атаки с применением химического агента. Модель основана на численном интегрировании уравнения для потенциала скорости и уравнения, являющегося сопряженным к уравнению массопереноса химически опасного вещества в атмосфере. **Практическая значимость.** Разработанная модель может быть использована для организации защитных мероприятий возле объектов возможной химической атаки террориста.

Ключевые слова: теракт; химическое загрязнение; зона «уязвимости»; сопряженное уравнение; численное моделирование; загрязнение атмосферы

Введение

В последнее время особое внимание привлекают задачи, связанные с оценкой последствий возможных терактов с применением химических (биологических) агентов [1, 2, 4–14]. В рамках данной проблемы можно выделить крайне важную и специфическую задачу – определение зоны «уязвимости» для объектов химической атаки террориста. Зона «уязвимости» представляет собой территорию возле объекта атаки, где эмиссия химического агента при теракте приведет к нежелательным последствиям на объекте. Выброс химически опасного вещества вне данной зоны не создаст его опасной концентрации на объекте атаки.

Математически данное положение можно выразить так: на объекте возможной химической атаки террориста до момента времени τ концентрация опасного вещества не должна превышать некоторого опасного значения φ :

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

Здесь φ – это концентрация, при которой наступает поражение определенной тяжести для человека.

Следует отметить, что решение данной задачи становится достаточно сложным, если рассматривается эмиссия химического агента в условиях застройки – это, по сути, наиболее очевидная ситуация в случае химической атаки. В качестве «нулевого» приближения можно пренебречь влиянием конкретных зданий, иных объектов на формирование зон химического заражения и использовать для решения задачи, например, Гауссовы модели, как это сделано в коде «АЛОНА». Для более детальной оценки зон заражения необходимо учитывать влияние объектов на формирование концентрационных полей. Такая детализация может быть различной и зависит от ряда факторов (например, наличия достаточного количества входной информации для моделирования, наличия пакета программ для проведения расчетов, времени на получение результатов и т. д.). Применяемые на практике модели по оценке последствий теракта основаны на решении «прямой» задачи массопереноса – т. е. непосредственное решение уравнения конвективно-диффузионного рассеивания

примеси в атмосфере при заданном месте эмиссии опасного вещества. Однако применение таких моделей требует значительного времени для определения зоны «уязвимости», поскольку решение задачи находится путем перебора различных точек выброса химического агента при возможном. В этой связи актуальной проблемой является разработка эффективных методов решения задач по определению зоны «уязвимости» для различных объектов в условиях возрастающей террористической угрозы.

Цель

Данная работа предусматривает создание численной модели для определения зоны «уязвимости» объекта при возможной химической атаке террориста в условиях застройки.

Методика

Методику исследования рассмотрим на примере решения двух задач, которые могут быть сформулированы при рассмотрении терактов с применением химического или биологического агента.

«Прямая» задача. В случае применения химического (биологического) агента при террористической атаке зона заражения может быть рассчитана на базе следующего уравнения массопереноса (плановая задача) [2–5, 7, 8]:

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

где C – осредненная 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 источ-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

ника эмиссии агента при теракте; t – время.

Краевые условия для уравнения (2) записываются так [3]: $C = C_0$ при $t = 0$, $C = 0$ на границах расчетной области, где C_0 – известная величина.

При решении «прямой» задачи необходимо задать информацию о точке выброса химического агента (координаты x_0, y_0), а также интенсивность эмиссии агента Q .

Для применения уравнения (1) в случае рассеивания химического (биологического) агента в условиях застройки необходимо знать неравномерное поле скорости ветрового потока, т. е. значение величин $u = f(x, y)$, $v = f(x, y)$. Определение этого поля при наличии зданий является сложной гидродинамической задачей. За рубежом для решения этой задачи, традиционно используют уравнения Навье–Стокса, дополненные той или иной моделью турбулентности. На такой базе разработаны специализированные пакеты программ «ANSYS Fluent», «FAST» и др. Эти пакеты представляют собой мощный инструмент решения широкого класса задач. Однако известно, что применение уравнений Навье–Стокса для расчета течений с большими числами Рейнольдса (Re) требует использования очень малой расчетной сетки, что сразу приводит к большим затратам компьютерного времени при практической реализации модели. Кроме этого, необходимы очень мощные компьютеры. Это становится существенным препятствием при необходимости проведения серийных расчетов, например, при разработке ПЛАСа (план ликвидации аварийной ситуации). В МЧС или в других компетентных организациях необходимо иметь быстросчитающие модели, которые к тому же учитывали бы наиболее существенные физические факторы моделируемого процесса. В данной работе для определения поля скорости ветрового потока $u = f(x, y)$, $v = f(x, y)$ в условиях застройки будем использовать модель потенциального течения [5]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (3)$$

где P – потенциал скорости.

Значение компонент вектора скорости ветрового потока определяем на основе соотношений:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (4)$$

Для уравнения (2) ставим следующие граничные условия:

– на твердых границах ставим условие непротекания:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0,$$

где n – единичный вектор внешней нормали к границе;

– на границе «выхода» потока из расчетной области ставим граничное условие Дирихле, вида $P = \text{const}$;

– на тех границах, где происходит «втеkanie» воздушного потока, ставим граничное условие Неймана: $\frac{\partial P}{\partial n} = V$, где V – известная скорость воздушного потока.

Решение задач по определению размеров, интенсивности зон заражения на базе уравнений (1) и (2) называется решением прямой задачи массопереноса.

Для определения зоны «уязвимости» объекта при возможной химической атаке можно использовать уравнения (1) и (2) и определить эту зону путем «перебора» различных значений координат x_0, y_0 , т. е. провести расчеты для различных точек выброса химического агента. Совершенно очевидно, что такое решение задачи требует большой вычислительной работы, что не всегда удобно.

Сопряженная задача. Теперь рассмотрим иной подход к определению зоны «уязвимости» объекта при возможной химической атаке террориста.

Этот подход основывается на применении сопряженного уравнения (3) [3]:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial C^*}{\partial t} - \frac{\partial u C^*}{\partial x} - \frac{\partial v C^*}{\partial y} + \sigma C^* = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C^*}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C^*}{\partial y} \right) + p, \quad (5) \end{aligned}$$

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

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.

Особенность применения уравнения (3) состоит в том, что поле скорости ветрового потока является неравномерным в условиях застройки, и его определяют путем предварительного решения уравнения (2) с последующим расчетом компонент вектора скорости по зависимостям (3).

Вид функций p может быть крайне разнообразным [3], например:

$$p(x, y, t) = \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(t - \tau) \quad (6)$$

Если решение сопряженного уравнения (5) найдено, то далее необходимо найти значение функционала следующего вида [3]:

$$I = \int_0^T C^*(r_0, t) dt. \quad (7)$$

Построив изолинии этого функционала мы находим решение поставленной задачи из условия:

$$I(r_0, \tau) < \varphi. \quad (8)$$

Рассмотрим теперь методологию решения сопряженного уравнения. Для решения сопряженной задачи (4) 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 (5) принимает вид уравнения (2). Далее проведем аппроксимацию производных, следуя [2, 5]. Аппроксимацию производной по времени осуществляем так:

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

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

Первые производные аппроксимируют соотношениями [5]:

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

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

где

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

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

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

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

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

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

Аппроксимацию вторых производных осуществляем 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):

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

$$+ L_y^- C^{n+1} + \sigma C_{ij}^{n+1} =$$

$$(M_{xx}^+ C^{n+1} + L_{xx}^- C^{n+1} + L_{yy}^+ C^{n+1} + L_{yy}^- C^{n+1}) +$$

$$+ Q_{ij} \delta_{ij}. \quad (9)$$

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Теперь проведем расщепление разностного уравнения (9). Уравнения расщепления на каждом шаге записывают так:

– на первом шаге ($k = n + \frac{1}{4}$):

$$\frac{C_{i,j}^{n+k} - C_{i,j}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{i,j}^k = \frac{1}{4}(M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n + M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n), \quad (10)$$

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

$$\frac{C_{i,j}^k - C_{i,j}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{i,j}^k = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c), \quad (11)$$

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

применяем зависимость (11);

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

применяем зависимость (10).

Искомое значение функции C на каждом дробном шаге определяем по формуле бегущего счета. На последнем расчетном шаге имеем уравнение:

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

Для решения данного уравнения применяется метод Эйлера.

Для численного решения уравнения (2) используем метод А. А. Самарского. Предварительно уравнение (2) приводится к эволюционному виду:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (12)$$

здесь t – фиктивное время.

При $t \rightarrow \infty$ решение уравнения (12) стремится к решению уравнения Лапласа (3). Для решения уравнения (12) необходимо задать поле потенциала при $t = 0$, например, можно принять $P = 0$ во всей расчетной области.

Решение уравнения (12) расщепляем на два шага, на каждом шаге расщепления разностные уравнения имеют вид:

$$\frac{P_{i,j}^{n+1/2} - P_{i,j}^n}{0,5\Delta\eta} = \frac{P_{i+1,j}^n - P_{i,j}^n}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1}^n - P_{i,j}^n}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i,j-1}^{n+1/2}}{\Delta y^2},$$

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1/2}}{0,5\Delta\eta} = \frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i,j-1}^{n+1/2}}{\Delta y^2}.$$

Неизвестную величину $P_{i,j}$ на каждом шаге расщепления рассчитываем по явной формуле бегущего счета.

Для программной реализации построенной численной модели был использован FORTRAN.

Результаты

На рис. 1, 2 представлены результаты решения «прямой» задачи – расчет зоны химического заражения при эмиссии аммиака в определенной точке области. Характерное направление скорости ветра показано стрелкой. Как видно из представленных рисунков, зона химического заражения увеличивается со временем и охватывает здания, расположенные в районе атаки.

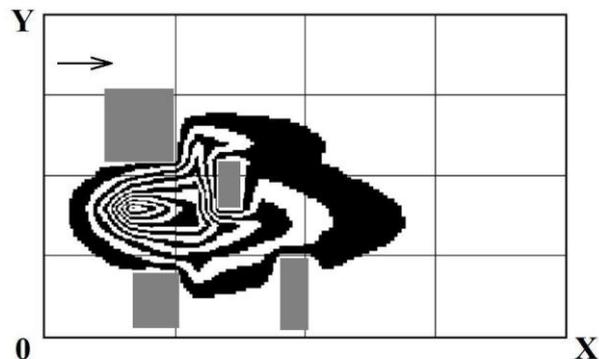


Рис. 1. Изолинии концентрации аммиака при гипотетическом теракте $\tau = 9$ (время безразмерное, решение «прямой» задачи):
I – место эмиссии агента

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ



Рис. 2. Изолинии концентрации аммиака при гипотетическом теракте $\tau = 14$ (время безразмерное, решение «прямой» задачи):
 I – место эмиссии агента

Время решения «прямой» задачи – 3сек.

На рис. 3 показана схема расчетной области во второй задаче – определение зоны «уязвимости» на базе сопряженного уравнения. Моделировалась ситуация возможной химической атаки в районе расположения трех зданий (рис. 3). Полагалось, что возле объекта атаки (здание) концентрация аммиака не должна превышать пороговое значение $\varphi = 9$ для момента времени $\tau = 16$ (концентрация и время – безразмерные).

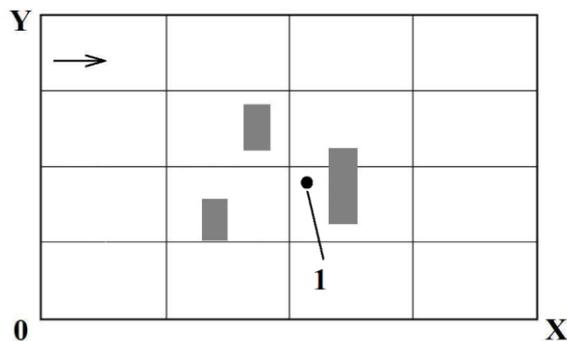


Рис. 3. Схема расчетной области (вторая задача – определение зоны «уязвимости» объекта):
 I – цель атаки террориста

На рис. 4 представлены линии функционала (7), определенные после решения сопряженного уравнения (5). Стрелка на рис. 3 и 4 указывает направление ветра.

Изолинии на рис. 4 показывают, что если источник эмиссии химического агента будет находиться вдоль одной из линий $I = const$, то

химическое воздействие на объект атаки будет одинаковым. Так, изолиния $I = 9$ показывает, что если выброс химического агента будет в одной из точек на этой изолинии, то в момент времени $\tau = 16$ концентрация химического агента возле объекта атаки будет соответствовать заданному значению $\varphi = 9$ (здесь концентрация – безразмерная величина).

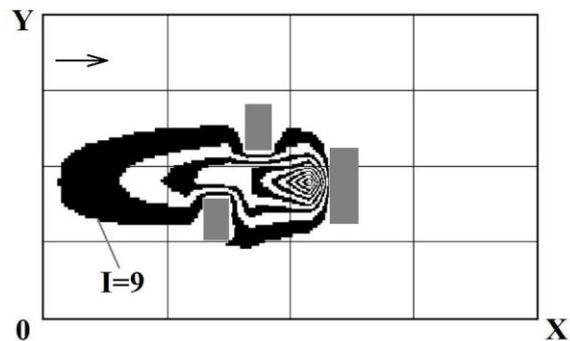


Рис. 4. Изолинии функционала (7) для момента времени $\tau = 16$ (время безразмерное)

Выброс химического агента внутри зоны, ограниченной этой изолинией, приведет к еще большей степени заражения атмосферного воздуха возле объекта атаки.

Отметим, что время расчета зоны «уязвимости» составляет порядка 3 сек.

Научная новизна и практическая значимость

Разработана численная модель, позволяющая определить зону «уязвимости» возле объекта возможной атаки террориста, применяющего химический (биологический) агент.

Особенностью построенной модели является использование сопряженного уравнения для решения задачи совместно с уравнением потенциального течения для расчета поля скорости ветрового потока в условиях застройки. Затраты компьютерного времени на реализацию модели составляют несколько секунд.

Выводы

Разработана численная модель для определения зоны «уязвимости» объекта при возможной химической атаке террориста в условиях застройки. Основой расчета является решение

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

сопряженного уравнения массопереноса. Построенную модель можно применить при разработке стратегии минимизации последствий терактов с применением химических (биологических) агентов. Дальнейшее совершенствование

данного направления следует проводить в направлении разработки трехмерной численной модели, позволяющей определять размеры зоны «уязвимости» объекта при возможной химической атаке 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. Гулько, Н. В. Росточило. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – 136 с.
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 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://app.croneri.co.uk/news/cefic-guidance-safety-risk-assessment-chemical-transport-operations?product=139> – 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. 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. – 2017. – Vol. 9. – Iss. 11. doi: 10.3390/su9112103
13. 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.
14. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes / Ondrej Zavila, Pavel Dobs, Jakub Dlabka, Jan Bitta // Bezpecnostni vyzkum. The Science for Population Protection. – 2015. – No. 2.

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, О. В. БЕРЛОВ^{2*}, І. В. КАЛАШНІКОВ^{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*}Каф. «Безпека життєдіяльності», Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, ел. пошта berlovaalexandr@gmail.com, ORCID 0000-0002-7442-0548

^{3*}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

^{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

РОЗРАХУНОК ЗОНИ «УРАЗЛИВОСТІ» ОБ'ЄКТА ЗА МОЖЛИВОГО ТЕРАКТУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ХІМІЧНОГО АГЕНТА

Мета. Робота передбачає розробку чисельної моделі для розрахунку зони «уразливості» можливого об'єкта атаки терориста із застосуванням хімічного агента в умовах забудови. Зона «уразливості» являє собою територію біля об'єкта атаки, де емісія хімічного агента під час теракту призведе до небажаних наслідків. Емісія хімічного агента поза зоною «уразливості» не створить небезпечну концентрацію біля об'єкта атаки. **Методика.** Для вирішення поставленого завдання використано рівняння для потенціалу швидкості, на базі якого визначено поле швидкості вітрового потоку, і рівняння, спряжене з рівнянням масопереносу в атмосферному повітрі хімічного агента, викинутого в разі теракту. Під час моделювання були враховані нерівномірне поле швидкості вітрового потоку, атмосферна дифузія, інтенсивність викиду хімічно небезпечної речовини. Під час чисельного інтегрування рівняння для потенціалу швидкості використаний метод Самарського А. А. Для чисельного розв'язання спряженого рівняння введені нові змінні та застосована неявна різницева схема розщеплення. Особливістю розробленої чисельної моделі є можливість оперативної оцінки зони «уразливості» біля можливого об'єкта атаки. **Результати.** Розроблена чисельна модель і комп'ютерна програма можуть бути використані для науково обгрунтованої оцінки стану зони «уразливості» біля важливих 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 зазначеного класу під час розробки плану ліквідації в аварійній ситуації. Наведені результати обчислювального експерименту, що дозволяють оцінити можливості цієї чисельної моделі. **Наукова новизна.** Запропоновано ефективну чисельну модель для розрахунку зони «уразливості» біля об'єкта, який може бути ціллю терористичної атаки із застосуванням хімічного агента. Модель заснована на чисельному інтегруванні рівняння для потенціалу швидкості й рівняння, що є спряженим до рівняння масопереносу хімічно небезпечної речовини в атмосфері. **Практична значимість.** Розроблена модель може бути використана для організації захисних заходів біля об'єктів можливої хімічної атаки терориста.

Ключові слова: теракт; хімічне забруднення; зона «уразливості»; спряжене рівняння; чисельне моделювання; забруднення атмосфери

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, О. В. БЕРЛОВ^{2*}, І. В. КАЛАШНІКОВ^{3*}, В. А. КОЗАЧИНА^{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*}Dep. «Life Safety», Public higher education institution «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», Chernyshevskiy St., 24a, 49600, tel. +38 (056) 756 34 57, e-mail berlovaalexandr@gmail.com, ORCID 0000-0002-7442-0548

^{3*}State Enterprise «Design and Exploration Institute of Railway Transport of Ukraine «Ukrzaliznychprojekt», Konariev St., 7, Kharkiv, 61052, tel. +38 (057) 724 41 25, e-mail uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

^{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

CALCULATION OF «VULNERABILITY» ZONE IN CASE OF TERRORIST ATTACK WITH CHEMICAL AGENTS

Purpose. The work involves the development of a numerical model for calculating the «vulnerability» zone of a possible terrorist attack objective with the use of a chemical agent in a built-up environment. The «vulnerability» zone is a territory near the attack objective, where the emission of a chemical agent during the attack will lead to undesirable consequences. The emission of a chemical agent outside the «vulnerability» zone will not create a dangerous concentration near the attack objective. **Methodology.** To solve this problem, we use the equation for the velocity potential, on the basis of which we determine the wind stream velocity field, and the equation adjoint to the equation of mass transfer in the atmospheric air of the chemical agent emitted in the event of a terrorist attack. During simulation, we take into account the uneven wind stream velocity field, atmospheric diffusion and the rate of emission of a chemically hazardous substance. For the numerical integration of the velocity potential equation, we use the method of A. A. Samarsky. For numerical solution of the adjoint equation, we introduce new variables and use an implicit difference splitting scheme. The peculiarity of the developed numerical model is the possibility of operative estimation of the «vulnerability» zone near a possible attack objective. **Findings.** The developed numerical model and computer program can be used for scientifically grounded assessment of the «vulnerability» zone near significant facilities in the event of possible attacks with the use of chemical (biological) agents. The constructed numerical model can be implemented on computers of small and medium power, which allows it to be widely used to solve the problems of this class when developing the emergency response plan. The results of the computational experiment are presented, which allow us to evaluate the possibilities of the proposed numerical model. **Originality.** An effective numerical model is proposed for calculating the «vulnerability» zone near the facility, which may be the target of a terrorist attack with the use of a chemical agent. The model is based on the numerical integration of the velocity potential equation and the equation adjoint to the equation of mass transfer of a chemically dangerous substance in the atmosphere. **Practical value.** The developed model can be used to organize protective actions near the target facility of a possible chemical attack by terrorists.

Keywords: terrorist attack; chemical pollution; «vulnerability» zone, adjoint equation; numerical simulation; air contamination

REFERENCES

1. Alymov, V. T., & Tarasova, N. P. (2004). *Tekhnogennyy risk. Analiz i otsenka: Uchebnoe 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. (1982). *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy*. Moscow: Nauka. (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*. Kyiv: 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. (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*, 87-91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8_15 (in English)
9. *CEFIC Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations*. Retrieved from <https://app.croneri.co.uk/news/cefic-guidance-safety-risk-assessment-chemical-transport-operations?product=139> (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. doi: 10.1088/1755-1315/90/1/012027 (in English)

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

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). 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. *Bezpečnostní výzkum. The Science for Population Protection*, 2. (in English)

Поступила в редколлегию: 04.06.2018

Принята к печати: 28.09.2018