

УДК 502.3:504.5

И. В. КАЛАШНИКОВ^{1*}, В. А. ГАБРИНЕЦ², В. Н. ГОРЯЧКИН³

^{1*}Харьковское отделение филиала «Проектно-изыскательный институт железнодорожного транспорта» акционерного общества «Українська залізниця», ул. Котляра, 7, Харьков, Украина, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, эл. почта uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

²Каф. «Теплотехника», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, эл. почта gabrin62@gmail.com, ORCID 0000-0002-6115-7162

³Каф. «Теплотехника», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, эл. почта vgora@ukr.net, ORCID 0000-0002-8952-952X

КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ

Цель. Работа предполагает разработку численных моделей для оценки уровня загрязнения воздушной среды в случае чрезвычайных ситуаций. **Методика.** Для описания процесса рассеивания в атмосфере химически опасных веществ, эмитированных при чрезвычайных ситуациях, использовано трехмерное уравнение массопереноса примеси в атмосферном воздухе. Для проведения экспресс-расчета используется двухмерное уравнение массопереноса. Уравнения учитывают поле скорости ветрового потока, атмосферную диффузию, интенсивность выброса химически опасного вещества в атмосферу. Для численного интегрирования уравнений массопереноса использованы неявные разностные схемы. Комплекс программ создан для решения задач прогноза уровня загрязнения атмосферы с учетом влияния зданий на формирование зон загрязнения. При этом выполнен расчет поля скорости ветрового потока на базе модели потенциального течения. Применение данной модели позволяет оперативно рассчитывать это поле при наличии препятствий. **Результаты.** Построенные математические модели составляют основу созданного комплекса программ и могут быть применены для проведения оперативных расчетов размеров, интенсивности зон загрязнения, которые формируются в атмосфере при выбросе химических веществ в случае чрезвычайных ситуаций на химически опасных объектах, транспорте. Разработанный комплекс программ может быть реализован на компьютерах малой и средней мощности, что позволяет широко использовать его для решения задач при разработке плана ликвидации аварийной ситуации (ПЛАС). Для практического применения разработанного комплекса программ необходима стандартная входная информация. **Научная новизна.** Предложен комплекс программ для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха при выбросе в атмосферу химически опасных веществ. Этот комплекс может быть использован для оценки воздействия выбросов на риск химического поражения людей как на территории промышленного объекта, так и в селитебной зоне. Основой разработанного комплекса программ являются численные модели для расчета аэродинамики и массопереноса. **Практическая значимость.** Разработанный комплекс программ позволяет решать прикладные задачи, возникающие при разработке ПЛАСа для химически опасных объектов.

Ключевые слова: химическое загрязнение атмосферы; чрезвычайная ситуация; численное моделирование

Введение

В настоящее время повышенный интерес в области промышленной безопасности привлекают задачи, связанные с оценкой воздействия выбросов химически опасных веществ на загрязнение воздушной среды и риска химического поражения людей [1–4, 7–14]. Основой такой оценки является расчет зон химического заражения, формирующихся при эмиссии химически опасных веществ. На основе такого

расчета можно оценить те области, которые попадают под влияние источника эмиссии. Расчет зон химического заражения составляет основу плана ликвидации аварийной ситуации (ПЛАС). Однако его можно выполнить, только используя метод математического моделирования.

Поэтому создание эффективных математических моделей и комплексов программ для оперативного расчета зон химического заражения является актуальной проблемой.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Для расчета зон химического заражения наиболее часто используют модели Гаусса [4]. Реже в Украине используют методику ОНД-86. В ней не учтена реальная скорость ветра, а вместо этого параметра использован параметр, не имеющий физического смысла, называемый «опасная скорость ветра». Также в данной методике не учтена величина атмосферной диффузии, ее можно применить только для стационарной эмиссии химически опасного вещества. Методика прогноза последствий аварий на химически опасных объектах и транспорте также не учитывает атмосферную диффузию и влияние зданий на формирование зон заражения. Альтернативным подходом является метод CFD-моделирования [2, 3, 5, 11]. Однако известно, что применение такого метода требует использования очень мощных персональных компьютеров. Поэтому на практике важно иметь быстросчитающие комплексы программ, реализующие физически обоснованные математические модели.

Цель

Основной целью данной работы является разработка специализированного комплекса программ для расчета зон химического заражения при выбросе химически опасных веществ в атмосферу.

Методика

Для достижения цели использован метод численного моделирования, реализованный в виде комплекса программ.

Численное моделирование представляет собой применение специальных методов решения моделирующих уравнений. Поэтому сначала рассмотрим моделирующие уравнения.

Для расчета зон химического заражения используется уравнение Марчука Г. И. [2, 3, 5, 9]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)C}{\partial z} + \sigma C = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \\ + \sum Q_i(t) \delta(x - x_i(t)) \delta(y - y_i(t)) \delta(z - z_i), \quad (1) \end{aligned}$$

где C – концентрация примеси; $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$ – коэффициенты атмосферной турбулентной диффузии; σ – коэффициент, учитывающий вымывание примеси осадками; u, v, w – компоненты вектора скорости ветра; w_s – скорость гравитационного оседания загрязнителя; Q – интенсивность выброса агента; $\delta(x - x_i)(y - y_i)(z - z_i)$ – дельта-функция Дирака; x_i, y_i, z_i – координаты источника эмиссии агента; t – время.

Устойчивость атмосферы определяют значением коэффициентов атмосферной диффузии.

Для решения задач на этапе оперативного принятия решения используют двухмерное уравнение Марчука Г. И., осредненное по высоте переноса примеси [2, 3, 5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \sigma C = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \\ + \sum Q_i(t) \delta(x - x_i(t)) \delta(y - y_i(t)). \quad (2) \end{aligned}$$

Следует подчеркнуть, что уравнения (1) и (2) учитывают два важных фактора: движение источника эмиссии химически опасного вещества и различную интенсивность его выброса с течением времени.

Отметим, что расчет зон химического заражения на базе уравнений (1) и (2) представляет собой кинематический подход к решению задачи. При этом поле скорости ветра известно (например, на основе метеорологического прогноза).

При необходимости учета влияния зданий на процесс формирования зон загрязнения следует выполнить расчет поля скорости ветра в условиях застройки. Для расчета поля скорости воздушного потока во время распространения химически опасного вещества при наличии застройки применяют модель потенциального течения. В этом случае моделирующее уравнение имеет вид:

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

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

где P – потенциал скорости.

Для расчета компонент вектора скорости ветра используют зависимости:

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

При проведении экспресс-расчета используют двухмерное уравнение для потенциала скорости:

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

Постановка краевых условий для моделирующих уравнений рассмотрена в [5].

При численном решении трехмерного уравнения для потенциала скорости применяют локально-одномерную разностную схему. Предварительно уравнение (1) расщепляют на уравнения вида:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2},$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2},$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}.$$

Для аппроксимации каждого уравнения из данной системы будем использовать следующие разностные выражения:

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \frac{P_{i-1,j,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x},$$

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta t} = \frac{P_{i+1,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x},$$

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \frac{P_{i,j-1,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta y},$$

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta t} = \frac{P_{i,j+1,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y},$$

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \frac{P_{i,j,k-1}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta z},$$

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta t} = \frac{P_{i,j,k+1}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z}.$$

Для численного интегрирования трехмерного и двухмерного уравнений переноса примеси применяют неявную разностную схему расщепления [2, 5]. Исходное моделирующее уравнение расщепляют на три уравнения. Первое уравнение учитывает рассеивание примеси только за счет ветрового потока, второе – за счет атмосферной диффузии, третье учитывает влияние источника эмиссии на формирование зоны загрязнения.

При численном интегрировании двухмерного уравнения для потенциала скорости также используют локально-одномерную разностную схему. Уравнения расщепления имеют вид:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2},$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}.$$

Для аппроксимации каждого уравнения из данной системы будем использовать такие разностные выражения:

$$\frac{P_{i,j}^{n+1/2} - P_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{P_{i-1,j}^{n+1/2} - P_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta x},$$

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta t} = \frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x},$$

$$\frac{P_{i,j}^{n+1/2} - P_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{P_{i,j-1}^{n+1/2} - P_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta y},$$

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

Оценку уровня загрязнения воздушной среды осуществляют в следующей последовательности:

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

– вводять інформацію о регионе, для которого выполняются моделирование процесса загрязнения воздушной среды (расчетный участок на карте Google Map, размеры расчетной области, положение источника выброса);

– вводять інформацію о метеорологических условиях в регионе (скорость ветра, его направление, устойчивость атмосферы);

– вводять інформацію об источнике выброса (его координаты, режим эмиссии, является ли источник движущимся или нет);

– вводять, при необходимости, інформацію о положении зданий в расчетной области;

– выполняют расчет поля скорости ветра;

– выполняют расчет поля концентрации загрязняющего вещества для конкретного промежутка времени после начала эмиссии;

– осуществляют печать результатов математического моделирования.

Для кодирования разностных уравнений использован FORTRAN. Разработанный комплекс включает в себя следующие программы:

– программу расчета поля скорости ветрового потока на базе уравнений (3) или (4);

– программу расчета концентрации химически опасного вещества в расчетной области для конкретного промежутка времени (решение уравнений (1) или (2));

– программу расчета токсодозы для конкретной точки в расчетной области;

– программу печати результатов моделирования.

Результаты

Комплекс программ был использован для решения следующей задачи. Рассмотрим гипотетическую аварию на химически опасном объекте, где хранится аммиак. Полагаем, что в результате аварии происходит эмиссия аммиака с интенсивностью 2 кг/с . Задача состоит в оценке интенсивности загрязнения воздушной среды после начала эмиссии.

На рис. 1 и 2 показаны изолинии концентрации аммиака для различных моментов времени. При расчете принято, что стабильность атмосферы соответствует классу D.

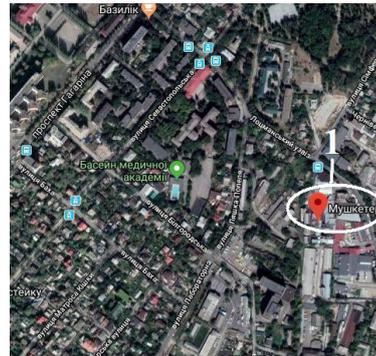


Рис. 1. Расчетная область:
1 – положение химически опасного объекта

Fig. 1. Computational region:
1 – position of the chemical enterprise

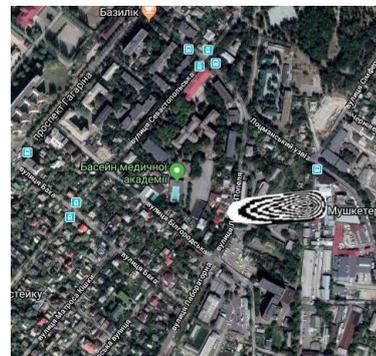


Рис. 2. Зона химического заражения через $t = 7$ мин после начала эмиссии химически опасного вещества (сечение $z = 7 \text{ м}$)

Fig. 2. Zone of chemical contamination after emission of toxic chemical, $t = 7 \text{ min}$ (section $z = 7 \text{ m}$)

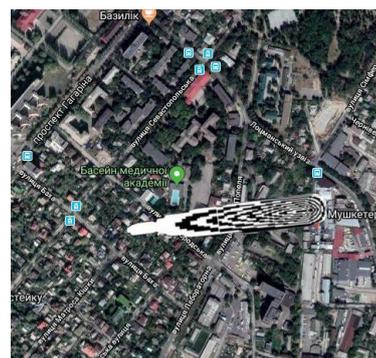


Рис. 3. Зона химического заражения через $t = 15$ мин после начала эмиссии химически опасного вещества (сечение $z = 7 \text{ м}$)

Fig. 3. Zone of chemical contamination after emission of toxic chemical, $t = 15 \text{ min}$ (section $z = 7 \text{ m}$)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

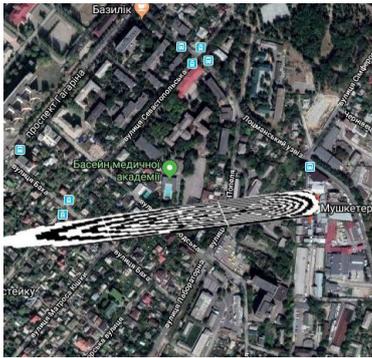


Рис. 4. Зона химического заражения через $t = 24$ мин после начала эмиссии химически опасного вещества (сечение $z = 7$ м)

Fig. 4. Zone of chemical contamination after emission of toxic chemical, $t = 24$ min (section $z = 7$ m)

Как видно из представленных рисунков, после аварии на химически опасном объекте быстро формируется значительная зона загрязнения атмосферного воздуха. Эта зона вытягивается в виде «языка» по направлению движения ветрового потока и накрывает жилую зону.

На рис. 5 показано распределение концентрации аммиака на уровне $Z = 2$ м для момента времени $t = 27$ мин после начала эмиссии при аварии.

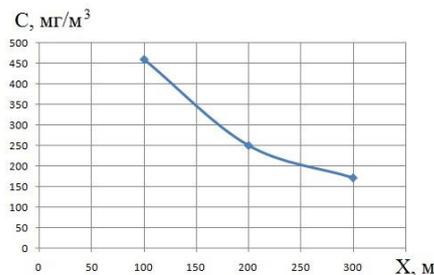


Рис. 5. Распределение концентрации химически опасного вещества на различном расстоянии от источника эмиссии

Fig. 5. Distribution of the concentration of a chemically hazardous substance at different distances from the source of emission

Из рис. 5 видно, что при аварии возле предприятия возникает зона, где существует риск токсичного поражения людей. Если принять во внимание, что предельно допустимая концентрация для аммиака составляет 20 мг/м^3 , то видно, что вблизи данного промышленного объекта уровень загрязнения атмосферы будет значительно превышать эту величину. Ввиду быстрого формирования зоны загрязнения в атмосфере эвакуация людей из жилой зоны практически невозможна.

Отметим, что время расчета составляет порядка 10 сек.

Научная новизна и практическая значимость

В статье рассмотрен комплекс программ для оперативного расчета зон химического заражения атмосферы при аварийной эмиссии химически опасного вещества.

При применении предложенного комплекса программ можно использовать стандартную входную информацию (скорость и направление ветра, устойчивость атмосферы и т. д.). Особенностью комплекса программ является быстрота расчета.

Выводы

В работе представлен комплекс программ, позволяющий выполнять 3D- или 2D-моделирование процесса загрязнения воздушной среды при эмиссии химически опасного вещества вследствие аварии. Основой комплекса программ является численное моделирование на базе уравнений массопереноса и аэродинамики. Дальнейшее совершенствование выбранного научного направления следует проводить в области создания 3D-модели для расчета загрязнения воздушной среды на базе уравнений, описывающих вязкое движение воздушного потока.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алымов, В. Т. Техногенный риск: Анализ и оценка : учеб. пособие для вузов / В. Т. Алымов, Н. П. Тарасова. – Москва : Академкнига, 2004. – 118 с.
2. Беляев, Н. Н. Защита зданий от проникновения в них опасных веществ : монография / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гулько, Н. В. Росточило. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – 136 с.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

3. Оценка техногенного риска при эмиссии опасных веществ на железнодорожном транспорте / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гулько, П. С. Кириченко, Л. Я. Мунтян. – Кривой Рог : Р. А. Козлов, 2017. – 127 с.
4. Стоецкий, В. Ф. Оценка риска при авариях техногенного характера / В. Ф. Стоецкий, В. И. Голинько, Л. В. Дранишников // *Наук. вісн. НГУ.* – 2014. – № 3. – С. 117–124.
5. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Киев : Наук. думка, 1997. – 368 с.
6. Bai, Y. Grey Mathematics Model for Atmospheric Pollution Based on Numerical Simulation / Y. Bai // *Chemical Engineering Transactions.* – 2018. – Vol. 71. – P. 679–684. doi: 10.3303/CET1871114
7. 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.
8. 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
9. 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
10. Cefic Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations [Електронний ресурс] // Stoner-i. – Режим доступа: <http://clc.am/OnkmUw> – Загл. с экрана. – Проверено : 29.03.2019.
11. Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling / Z. Naserzadeh, F. Atabi, F. Moattar, N. M. Nejad // *Bioscience Biotechnology Research Communications.* – 2017. – Vol. 10 (1). – P. 192–204.
12. Oyjinda, P. Numerical Simulation to Air Pollution Emission Control near an Industrial Zone [Електронний ресурс] / P. Oyjinda, N. Pochai // *Advances in Mathematical Physics.* – 2017. – Vol. 2017. – Режим доступа: <https://www.hindawi.com/journals/amp/2017/5287132/> – Загл. с экрана. – Проверено : 23.04.2019. doi: 10.1155/2017/5287132
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 : 23.04.2019.
14. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes [Електронний ресурс] / O. Zavila, P. Dobes, J. Dlabka, J. Bitta // *The science for population protection.* – 2015. – № 2. – Режим доступа: <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/eng/22/112.pdf> – Загл. с экрана. – Проверено : 23.04.2019.

І. В. КАЛАШНИКОВ^{1*}, В. О. ГАБРИНЕЦЬ², В. М. ГОРЯЧКІН³

1*Харківське відділення філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» акціонерного товариства «Укр-раїнська залізниця», вул. Котляра, 7, Харків, Україна, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, ел. пошта uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

2Каф. «Теплотехніка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, ел. пошта gabrin62@gmail.com, ORCID 0000-0002-6115-7162

3Каф. «Теплотехніка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, ел. пошта vgoga@ukr.net, ORCID 0000-0002-8952-952X

КОМПЛЕКС ПРОГРАМ ДЛЯ ОЦІНКИ РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА

Мета. Робота передбачає розробку чисельних моделей для оцінки рівня забруднення повітряного середовища в разі надзвичайних ситуацій. **Методика.** Для опису процесу розсіювання в атмосфері хімічно небезпечних речовин, емітованих під час надзвичайних ситуацій, використано тривимірне рівняння масопереносу домішки в атмосферному повітрі. Для проведення експрес-розрахунку використано двовимірне рівняння масопереносу. Рівняння враховують поле швидкості вітрового потоку, атмосферну дифузію, інтенсивність викиду хімічно небезпечної речовини в атмосферу. Для чисельного інтегрування рівнянь масопереносу використано неявні різницеві схеми. Комплекс програм створений для розв'язання задач прогнозу рівня за-

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: 10.15802/stp2019/164949

© І. В. Калашников, В. А. Габринець, В. Н. Горячкин, 2019

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

бруднення атмосфери з урахуванням впливу будівель на формування зон забруднення. При цьому виконано розрахунок поля швидкості вітрового потоку на базі моделі потенціальної течії. Застосування цієї моделі дозволяє оперативно розраховувати це поле за наявності перешкод. **Результати.** Побудовані математичні моделі складають основу створеного комплексу програм і можуть бути застосовані для проведення оперативних розрахунків розмірів, інтенсивності зон забруднення, які формуються в атмосфері під час викиду хімічних речовин у разі надзвичайних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах, транспорті. Розроблений комплекс програм може бути реалізований на комп'ютерах малої і середньої потужності, що дозволяє широко використовувати його для розв'язання задач, що виникають під час розробки плану ліквідації аварійної ситуації (ПЛАС). Для практичного застосування розробленого комплексу програм необхідна стандартна вхідна інформація. **Наукова новизна.** Запропоновано комплекс програм для оцінки рівня забруднення атмосферного повітря під час викиду в атмосферу хімічно небезпечних речовин. Цей комплекс може бути використаний для оцінки впливу викидів на ризик хімічного ураження людей як на території промислового об'єкта, так і в селітебній зоні. Основою розробленого комплексу програм є чисельні моделі для розрахунку аеродинаміки й масопереносу. **Практична значимість.** Розроблений комплекс програм дозволяє вирішувати прикладні задачі, які виникають під час розробки ПЛАСу для хімічно небезпечних об'єктів.

Ключові слова: хімічне забруднення атмосфери; надзвичайна ситуація; чисельне моделювання

I. V. KALASHNIKOV^{1*}, V. O. GABRINETS², V. M. HORIACHKIN³

^{1*}Kharkiv Branch Office «Design and Research Institute of Railway Transport» of the Public Joint Stock Company «Ukrainian Railway», Kotliar St., 7, Kharkiv, 61052, tel. +38 (057) 724 41 25, e-mail uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

²Dep. «Heat Engineering», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 87, e-mail gabrin62@gmail.com, ORCID 0000-0002-6115-7162

³Dep. «Heat Engineering», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 87, e-mail vgora@ukr.net, ORCID 0000-0002-8952-952X

COMPLEX OF PROGRAMS FOR ASSESSMENT OF AIR ENVIRONMENT POLLUTION LEVEL

Purpose. The work involves the development of numerical models for assessing the level of air pollution in the case of emergencies. **Methodology.** To describe the process of dispersing in the atmosphere of chemically hazardous substances emitted in emergency situations, we use the three-dimensional equation of the mass transfer of pollutants in the atmospheric air. For the express calculation two-dimensional mass transfer equation is used. Equations of mass transfer take into account the field of wind speed, atmospheric diffusion, the intensity of release of chemically hazardous substances into the atmosphere. For numerical integration of the mass transfer equations, implicit difference schemes are used. The developed complex of programs was created for solving the problems of forecasting the level of atmospheric pollution taking into account the influence of buildings on the formation of pollution zones. In order to take into account the influence of buildings on the formation of pollution zones, the calculation of the velocity field of the wind stream is based on the model of potential flow. Application of this model makes it possible to quickly calculate this field in the presence of obstacles. **Findings.** The developed mathematical models form the basis of the programs complex and can be applied for carrying out operative calculations of the sizes, intensity of pollution zones, which are formed in the atmosphere during the release of chemical substances in the case of emergency situations on chemically dangerous objects and transport. The developed complex of programs can be realized on computers of small and average power, which allows it to be widely used for solving problems that arise during the development of PLES (plan for liquidation of emergency situations). For practical application of the developed complex of programs, standard input information is required. **Originality.** The complex of programs for the estimation of the level of air pollution during the release of chemically hazardous substances into the atmosphere is proposed. The program complex can be used to assess the impact of emissions on the risk of chemical damage to people both on the territory of the industrial facility and in the residential area. The basis of the developed complex of programs are numerical models for calculating aerodynamics and mass transfer. **Practical value.** The developed complex of programs makes it possible to solve the applied problems that arise during the development of PLES for chemically hazardous objects.

Keywords: chemical pollution of the atmosphere; emergency situation; numerical simulation

REFERENCES

1. Alymov, V. T., & Tarasova, N. P. (2004). *Tekhnogennyy risk: Analiz i otsenka: Uchebnoe posobie dlya vuzov*. Moscow: Akademkniga. (in Russian)
2. Biliaiev, N. N., Gunko, E. Y., & Rostochilo, N. V. (2014). *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikh opasnykh veshchestv: Monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
3. Biliaiev, N. N., Gunko, E. Y., 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). *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
6. Bai, Y. (2017). Grey Mathematics Model for Atmospheric Pollution Based on Numerical Simulation. *Chemical Engineering Transactions*, 71, 679-684. doi: 10.3303/CET1871114 (in English)
7. Barret, A. M. (2009). *Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness*. (Doctoral dissertation). Carnegie Mellon University. Pittsburg. Pennsylvania. (in English)
8. 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)
9. 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*. Dordrecht. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8_15 (in English)
10. Cefic Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations. *Croner-i*. Retrieved from <http://clc.am/OnkmUw> (in English)
11. Naserzadeh, Z., Atabi, F., Moattar, F., & Nejad, N. M. (2017). Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling. *Bioscience Biotechnology Research Communications*, 10(1), 192-204. (in English)
12. Oyjinda, P., & Pochai, N. (2017). Numerical Simulation to Air Pollution Emission Control near an Industrial Zone. *Advances in Mathematical Physics*, 2017. Retrieved from <https://www.hindawi.com/journals/amp/2017/5287132/> doi: 10.1155/2017/5287132 (in English)
13. Government of Alberta. (2017). 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. Retrieved from <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> (in English)
14. Zavila, O., Dobes, P., Dlabka, J., & Bitta, J. (2015). The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes. *The science for population protection*, 2. Retrieved from <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/eng/22/112.pdf> (in English)

Поступила в редколлегию: 12.11.2018

Принята к печати: 11.03.2019