

УДК 614.833.3,614.833.4,614.841.412,614.841.412,614.841.43

Д. С. Котов¹, Е. В. Новиков², С. Г. Котов³¹НИРУП «Геоинформационные системы»²Институт современных технологий связи Белорусской государственной академии связи³ГУ «Белорусский институт системного анализа и информационного обеспечения научно-технической сферы»**ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПО ГАУССОВОЙ МОДЕЛИ ЗАРАЖЕНИЯ ПЕРВИЧНЫМ ОБЛАКОМ В ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ МЕТЕОУСЛОВИЯХ**

Динамическое моделирование развития аварий исходит из двух вариантов хранения опасного вещества на опасном производственном объекте: в газообразном состоянии и в жидкой фазе. Для каждого из этих вариантов рассматриваются по два типа выброса – залповый и продолжительный. В работе исследуется первый сценарий – полное разрушение оборудования, содержащего газообразное опасное вещество, и образование первичного облака. Прогнозирование заражения для первых метеоусловий, характеризующихся конкретным классом стабильности атмосферы, скорости и направления ветра, ведется в системе координат, центр которых расположен на поверхности земли в месте разрушения оборудования: ось Ox направлена по ветру, ось Oy – перпендикулярна ветру, ось Oz – перпендикулярна плоскости земли и связана с топографической картой. Для вторых метеоусловий, отличающихся от первых хотя бы одним из показателей – классом стабильности атмосферы, скоростью и направлением ветра, также используется система координат, у которой ось Ox направлена по ветру, ось Oy – перпендикулярна ветру, ось Oz – перпендикулярна плоскости земли. Система координат для вторых метеоусловий связана с системой координат для первых условий через точку максимальной концентрации в конце первых и начале вторых метеоусловий. При этом для начала вторых метеоусловий уточняется размер первичного облака опасного вещества в гауссовой модели в начальный момент времени, что позволяет вести расчет для вторых метеоусловий, базирующийся на методике «Токси-2». Это дает возможность создать алгоритм динамического моделирования заражения по гауссовой модели первичным облаком для изменяющихся метеоусловий.

Ключевые слова: алгоритм, заражение, изменяющиеся метеоусловия, моделирование, первичное облако.

Для цитирования: Котов Д. С., Новиков Е. В., Котов С. Г. Динамическое моделирование по гауссовой модели заражения первичным облаком в изменяющихся метеоусловиях // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2024. № 1 (278). С. 11–17.

DOI: 10.52065/2520-6141-2024-278-2.

D. S. Kotov¹, E. V. Novikov², S. G. Kotov³¹SIUE “Geoinformation systems”²Institute of Modern Communication Technologies of the Belarusian State Academy of Communications³State Institution “Belarusian Institute of System Analysis and Information Support for the Scientific and Technical Sphere”**DYNAMIC SIMULATION USING A GAUSSIAN INFECTION MODEL
PRIMARY CLOUD IN CHANGING WEATHER CONDITIONS**

Dynamic modeling of accident development is based on two options for storing a hazardous substance at a hazardous production facility: in a gaseous state and in a liquid phase. For each of these options, two types of release are considered: salvo and long-lasting. The work considers the first scenario - the complete destruction of equipment containing a gaseous hazardous substance and the formation of a primary cloud. Forecasting of infection for first and weather conditions is carried out in a coordinate system, the center of which is located on the surface of the earth at the site of equipment destruction, the Ox axis is directed downwind, the Oy axis is perpendicular to the wind, the Oz axis is perpendicular to the plane of the earth, and which is associated with a topographic map. For the second weather conditions, a coordinate system is also used, in which the Ox axis is directed downwind, the Oy axis is perpendicular to the wind, and the Oz axis is perpendicular to the plane of the earth. The coordinate system for the second weather conditions is connected to the coordinate system for the first conditions through the point of maximum concentration at the end of the first and the beginning of the second weather conditions. At the same time, to begin the second weather conditions, the size of the primary cloud of a hazardous substance in the Gaussian model at the initial time is specified, which allows calculations for the second weather conditions to be based on the Toxi-2 method. This allows you to create an algorithm for dynamic modeling of infection using a Gaussian model by a primary cloud for changing weather conditions.

Keywords: algorithm, infection, changing weather conditions, modeling, primary cloud.

For citation: Kotov D. S., Novikov E. V., Kotov S. G. Dynamic simulation using a Gaussian infection model primary cloud in changing weather conditions. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2024, no. 1 (278), pp. 11–17 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-6141-2024-278-2.

Введение. В настоящее время существует большой спектр методик, позволяющих моделировать последствия выброса опасных веществ: от простых полуэмпирических моделей до детальных расчетов по сложным газодинамическим моделям [1]. Это простые полуэмпирические модели [2–4], гауссовы модели рассеяния [5–11]; модели рассеяния, базирующиеся на интегральных законах сохранения [12–18], и модели, построенные на численном решении системы уравнений сохранения в их оригинальном виде [19–29].

Методики, построенные на численном решении системы уравнений, позволяют реализовать динамическое моделирование зон заражения. В то же время использование моделей последнего класса связано с существенными временными затратами по поиску и вводу исходных данных и имеет смысл только при оценке экологических рисков от промышленных источников загрязнения [3].

Методики, построенные на полуэмпирических моделях [2–4], гауссовых моделях рассеяния [5–11] и моделях рассеяния, базирующихся на интегральных законах сохранения [12–18], позволяют моделировать зоны заражения для разных метеорологических условий, но вопрос динамического моделирования зон заражения ранее решен только для методик, построенных на полуэмпирических моделях [30].

В настоящей статье впервые приводится алгоритмическое обеспечение динамического моделирования зон заражения для методики, построенной на гауссовых моделях.

Основная часть. Согласно современным воззрениям, модель развития аварии строится для двух вариантов хранения опасного вещества в оборудовании: в газообразном виде и в жидкой фазе (в т. ч. с наличием над поверхностью жидкости объема, заполненного газовой фазой) [31].

Для каждого варианта (газ или жидкость) рассматриваются по два типа выброса – залповый и продолжительный. Залповому выбросу на практике соответствует сильное разрушение оборудования, размер отверстия разгерметизации сопоставим с размером оборудования [20].

Таким образом, в системе координат «состояние вещества – характер разрушения» при двоякой градации по каждой из координат можно выделить четыре сценария: два для опасного вещества, находящегося в технологическом оборудовании в газообразном состоянии, и два для опасного вещества, находящегося в технологическом оборудовании в жидком состоянии [20]: полное разрушение оборудования, содержащего

опасное вещество, нарушение герметичности (частичное разрушение) оборудования, содержащего опасное вещество.

В настоящей работе рассматривается первый сценарий – полное разрушение оборудования, содержащего газообразное опасное вещество, и образование только первичного облака.

Пусть имеется электронная карта. Левый угол карты – это начало координат, точка $O(0,0)$. Пусть ось Ox направлена вдоль левой стороны карты с севера на юг, а ось Oy – вдоль верхней стороны карты с востока на запад. Любой пиксель (точку) на карте в данном случае можно охарактеризовать с помощью двух матриц

$$OX = \begin{pmatrix} x_{000}, & x_{001}, & x_{002}, \dots & x_{00i} \\ x_{010}, & x_{011}, & x_{012}, \dots & x_{01i} \\ x_{020}, & x_{021}, & x_{022}, \dots & x_{02i} \\ \dots, & \dots, & \dots, \dots & \dots \\ x_{0j0}, & x_{0j1}, & x_{0j2}, \dots & x_{0ji} \end{pmatrix};$$

$$OY = \begin{pmatrix} y_{000}, & y_{001}, & y_{002}, \dots & y_{00i} \\ y_{010}, & y_{011}, & y_{012}, \dots & y_{01i} \\ y_{020}, & y_{021}, & y_{022}, \dots & y_{02i} \\ \dots, & \dots, & \dots, \dots & \dots \\ y_{0j0}, & y_{0j1}, & y_{0j2}, \dots & y_{0ji} \end{pmatrix},$$

где x_{0ij} – число пикселей по горизонтали от левого края карты; y_{0ij} – число пикселей по вертикали от верхнего края карты.

Пусть масштаб карты M , м/пиксель. Тогда любой пиксель в системе координат Oxy , определяемый с помощью матриц OX и OY , характеризуется координатами

$$MOX = \begin{pmatrix} Mx_{000}, & Mx_{001}, & Mx_{002}, \dots & Mx_{00i} \\ Mx_{010}, & Mx_{011}, & Mx_{012}, \dots & Mx_{01i} \\ Mx_{020}, & Mx_{021}, & Mx_{022}, \dots & Mx_{02i} \\ \dots, & \dots, & \dots, \dots & \dots \\ Mx_{0j0}, & Mx_{0j1}, & Mx_{0j2}, \dots & Mx_{0ji} \end{pmatrix}; \quad (1)$$

$$MOY = \begin{pmatrix} My_{000}, & My_{001}, & My_{002}, \dots & My_{00i} \\ My_{010}, & My_{011}, & My_{012}, \dots & My_{01i} \\ My_{020}, & My_{021}, & My_{022}, \dots & My_{02i} \\ \dots, & \dots, & \dots, \dots & \dots \\ My_{0j0}, & My_{0j1}, & My_{0j2}, \dots & My_{0ji} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где Mx_{0ij} – координата пикселя по оси Ox , м; My_{0ij} – координата пикселя по оси Oy , м.

Пусть точки, координаты которых определяются матрицами (1) и (2), характеризуются шероховатостью поверхности, описываемой матрицей

$$zO = \begin{pmatrix} zO_{000}, & zO_{001}, & zO_{002}, \dots & zO_{00i} \\ zO_{010}, & zO_{011}, & zO_{012}, \dots & zO_{01i} \\ zO_{020}, & zO_{021}, & zO_{022}, \dots & zO_{02i} \\ \dots, & \dots, & \dots, & \dots \\ zO_{0j0}, & zO_{0j1}, & zO_{0j2}, \dots & zO_{0ji} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где zO_{0ij} – шероховатость поверхности в системе координат Oxy для точек, координаты которых описываются матрицами (1) и (2).

В гауссовых моделях расчет концентрации опасного вещества при прохождении первичного облака ведется в системе координат, у которой центр расположен на поверхности земли в месте разрушения оборудования, ось Ox направлена по ветру, ось Oy – перпендикулярно ветру, ось Oz – перпендикулярно плоскости земли.

Создание алгоритмического обеспечения, которое позволяет формировать любые системы координат, в частности систему координат для первых метеоусловий $O_{m1}x_{m1}y_{m1}z_{m1}$ и систему координат для вторых метеоусловий $O_{m2}x_{m2}y_{m2}z_{m2}$, описываемые матрицами типа (1)–(3), не представляет труда.

Исходные данные для расчета концентрации опасного вещества при прохождении первичного облака в системах координат $O_{m1}x_{m1}y_{m1}z_{m1}$ и $O_{m2}x_{m2}y_{m2}z_{m2}$: масса опасного вещества, образующая первичное облако, – Q_1 , кг, и размер первичного облака опасного вещества в гауссовой модели в начальный момент времени – R_1 , м, рассчитанный по [8, 12].

Для системы координат $O_{m1}x_{m1}y_{m1}z_{m1}$ проверяют выполнение условия

$$x_{m1} > 0. \quad (4)$$

Если условие (4) не выполняется, расчет не производится, а концентрация опасного вещества в данной точке принимается равной нулю.

Если условие (4) выполняется, по [8, 12] рассчитывают дисперсию по осям $O_{m1}x_{m1}$, $O_{m1}y_{m1}$ и $O_{m1}z_{m1}$ и вспомогательную величину, используемую при расчете концентраций ($G_{3m1}(x_{m1}, y_{m1}, z_{m1}, t)$).

Если выполняется условие

$$t \leq t_{m1}, \quad (5)$$

где t_{m1} – продолжительность первых метеоусловий, с; t – время, прошедшее с момента аварии, с; для точек с координатами x_{m1} , y_{m1} , z_{m1} рассчитывают концентрацию при прохождении первичного облака ($c_1(x_{m1}, y_{m1}, z_{m1}, t)$, г/м³) по формуле

$$c_1(x_{m1}, y_{m1}, z_{m1}, t) = \frac{Q_1 G_3(x_{m1}, y_{m1}, z_{m1}, t)}{\frac{8}{3} \pi R_1^3 + (2\pi)^{3/2} \sigma_{x_{m1}} \sigma_{y_{m1}} \sigma_{z_{m1}}}$$

Максимальную концентрацию и ее координаты в системе $O_{m1}x_{m1}y_{m1}z_{m1}$ можно рассчитать по формуле

$$C_{1max}(x_{m1} = t_{m1} U_{m1}, 0, 0, t_{m1}) = \frac{2Q_1 G_0(x_{m1})}{\frac{8}{3} \pi R_1^3 + (2\pi)^{3/2} \sigma_{x_{m1}} \sigma_{y_{m1}} \sigma_{z_{m1}}},$$

где U_{m1} – скорость ветра для первых метеоусловий, м/с; $G_0(x_{m1})$ – вспомогательная величина, используемая при расчете максимальной концентрации.

Если условие (5) не выполняется, то проверяется выполнение условия

$$t_{m1} < t \leq t_{m2}, \quad (6)$$

где t_{m2} – продолжительность вторых метеоусловий.

Если условие (6) не выполняется, то временной интервал выходит за время существования вторых метеоусловий и задача требует уточнений по продолжительности времени или введения параметров третьих метеоусловий.

Так как точка с координатами максимальной концентрации при прохождении первичного облака в системе координат для вторых метеоусловий в системе координат $O_{m2}x_{m2}y_{m2}z_{m2}$ для момента времени

$$t_{m2} = 0$$

совпадает с этой же точкой в системе координат $O_{m1}x_{m1}y_{m1}z_{m1}$ для момента времени t_{m1} , это позволяет заключить, что точка O_{m2} смещена относительно точки максимальной концентрации при прохождении первичного облака против направления ветра на расстояние

$$x_{m2} = U_{m2} t_{m1},$$

где U_{m2} – скорость ветра для вторых метеоусловий, м/с. В результате можно представить систему координат $O_{m2}x_{m2}y_{m2}z_{m2}$, матрицами типа (1)–(3).

На основании методики, изложенной в [8, 12], рассчитываются дисперсия по осям $O_{m2}x_{m2}$, $O_{m2}y_{m2}$ и $O_{m2}z_{m2}$, вспомогательные величины, используемые при определении концентраций ($G_{0m2}(x_{m2})$ и $G_{3m2}(x_{m2}, y_{m2}, z_{m2}, t)$) в точке с координатами $x_{m2} = U_{m2} t_{m1}$, 0, 0, что позволяет получить размер первичного облака опасного вещества в гауссовой модели в начальный момент времени (R_{1m2} , м) в системе координат $O_{m2}x_{m2}y_{m2}z_{m2}$:

$$R_{1m2} = \sqrt[3]{(2\pi)^{3/2} \left(\frac{G_0(x_{m2})}{G_0(x_{m1})} R_1^3 \cdot \sigma_{x_{m1}} \sigma_{y_{m1}} \sigma_{z_{m1}} - \frac{3}{8\pi} \sigma_{x_{m2}} \sigma_{y_{m2}} \sigma_{z_{m2}} \right)}$$

Из вышесказанного следует, что рассчитать концентрацию можно при прохождении первичного облака в любой точке системы координат $O_{M_2}x_{M_2}y_{M_2}z_{M_2}$.

Для этого в системе координат $O_{M_2}x_{M_2}y_{M_2}z_{M_2}$ проверяют выполнение условия

$$x_{1M_2} > 0. \quad (7)$$

Если условие (7) не выполняется, расчет не производится, а концентрация опасного вещества в данной точке в системе координат $O_{M_2}x_{M_2}y_{M_2}z_{M_2}$ принимается равной нулю.

Если условие (7) выполняется, находят дисперсию по осям $O_{M_2}x_{M_2}$, $O_{M_2}y_{M_2}$, $O_{M_2}z_{M_2}$, вспомогательную величину, используемую при расчете концентраций ($G_{3M_2}(x_{M_2}, y_{M_2}, z_{M_2}, t)$), и концентрацию при прохождении первичного облака ($c_2(x_{M_2}, y_{M_2}, z_{M_2}, t)$, г/м³):

$$\begin{aligned} C_1(x_{M_1}, y_{M_1}, z_{M_1}, t) &= \\ &= \frac{Q_1 G_3(x_{M_2}, y_{M_2}, z_{M_2}, t)}{\frac{8}{3} \pi R_1^3 + (2\pi)^{3/2} \sigma_{x_{M_2}} \sigma_{y_{M_2}} \sigma_{z_{M_2}}}. \end{aligned}$$

Максимальную концентрацию и ее координаты в системе $O_{M_2}x_{M_2}y_{M_2}z_{M_2}$ можно определить по формуле

$$\begin{aligned} C_{1\max}(x_{M_2} = tU_{M_2}, 0, 0, t) &= \\ &= \frac{2Q_1 G_0(x_{M_2})}{\frac{8}{3} \pi (R_{1M_2})^3 + (2\pi)^{3/2} \sigma_{x_{M_2}} \sigma_{y_{M_2}} \sigma_{z_{M_2}}}, \end{aligned}$$

где U_{M_2} – скорость ветра для вторых метеоусловий, м/с; $G_0(x_{M_2})$ – вспомогательная величина, используемая при расчете максимальной концентрации.

Применяя представленный алгоритм для третьих и последующих условий, получаем алгоритмическое обеспечение динамического моделирования по гауссовым моделям зон заражения в изменяющихся метеорологических условиях.

Заключение. Таким образом, впервые для гауссовых моделей решен вопрос динамического моделирования зон заражения первичным облаком в изменяющихся метеоусловиях.

Список литературы

1. Лисанов М. В., Пчельников А. В., Сумской С. И. Моделирование рассеяния выбросов опасных веществ в атмосфере // Российский химический журнал. 2005. Т. XLIX, № 4. С. 18–28.
2. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте: РД 52.04.253-90. Л., 1990. 27 с.
3. Грановский Э. А., Лыфарь В. А. Анализ методов оценки риска последствий аварийных выбросов и рассеяния парогазовых примесей в атмосфере // Техногенно-экологична безпека та цивільний захист. 2010. Вип. 2. С. 23–27.
4. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля: ГОСТ Р 12.3.047-2012. Введ. 01.01.2014. М.: Федер. агентство по техн. регулированию и метеорологии. Стандартиформ, 2014. 61 с.
5. Научно-методические аспекты анализа аварийного риска / В. Г. Горский [и др.]. М.: Экология и информатика, 2002. 260 с.
6. Защита атмосферы от промышленных загрязнений: справочник: в 2 кн. / под ред. С. Калверта, Г. М. Инглунда. М.: Металлургия, 1988. Кн. 2. 712 с.
7. Методика оценки последствий химических аварий (Методика ТОКСИ). М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 1996. 27 с.
8. Методика оценки последствий химических аварий (Методика «ТОКСИ-2.2») НТЦ «Промышленная безопасность», согл. Госгортехнадзором России): Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: сб. докл. Сер. 27. Вып. 2 М.: ГУП НТЦ «Промышленная безопасность», 2010. С. 123–204.
9. US Department of Commerce // Office of Response and Restoration. URL: http://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/ALOHA_Tech_Doc.pdf. (accessed 19.04.2016).
10. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий: ОНД-86: утв. Председателем Государственного комитета СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды 04.08.1986. Л.: Госкомгидромет; Гидрометеоздат, 1987. 94 с.
11. Сравнение моделей распространения загрязнений в атмосфере / И. В. Белов [и др.] // Математическое моделирование. 1999. Т. 11, № 8. С. 52–64.
12. Методика расчета распространения аварийных выбросов, основанная на модели рассеивания тяжелого газа / А. А. Шаталов [и др.] // Безопасность труда в промышленности. 2004. № 9. С. 46–52.

13. Моделирование распространения паровоздушного облака тяжелого газа при его мгновенном выбросе и непрерывном истечении / А. П. Шевчук [и др.] // Химическая промышленность. 1992. № 10. С. 54–57.
14. Crabol B., Roux A., Lhomme V. Interpretation of the Thomey Island Phase I trials with the BOX model CIGALE2 // Journal of Hazardous Materials. 1987. Vol. 16. P. 201–214.
15. Spicer T. O., Havens J. A. Field test validation of the DEGADIS model // Journal of Hazardous Materials. 1987. Vol. 16. P. 231–245.
16. Puttock J. S. Comparison of Thomey Island data with predictions of HEGABOX/HEGADAS // Journal of Hazardous Materials. 1987. Vol. 16. P. 439–455.
17. Mohan M., Panwar T. S., Singh M. P. Development of dense gas dispersion model for emergency preparedness // Atmospheric Environment. 1995. Vol. 29. No. 16. P. 2075–2087.
18. Morgan D. L., Kansa E. J., Morris L. K. Simulations and parameter variation studies of heavy gas dispersion using the SLAB model – condensed // IUTAM Symposium on atmospheric dispersion heavy gases and small particles. Delft University of Technology, The Netherlands, September, 1983. P. 83–92.
19. Deaves D. M. 3-dimensional model predictions for the upwind building trial of Thomey Island Phase II // Journal of Hazardous Materials. 1985. Vol. 11. P. 341–346.
20. Jacobsen O., Magnussen B. F. 3-D numerical simulation of heavy gas dispersion // Journal of Hazardous Materials. 1987. Vol. 16. P. 215–230.
21. Chan S. T., Ermak D. L., Morris L. K. FEM3 model simulations of selected Thomey Island Phase I trials // Journal of Hazardous Materials. 1987. Vol. 16. P. 267–292.
22. Едигаров А. С. Численный расчет турбулентного течения холодного тяжелого газа в атмосфере // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1991. Т. 31, № 9. С. 1369–1380.
23. Едигаров А. С. Численное моделирование аварий на хранилище сжиженного нефтяного газа высокого давления // Математическое моделирование. 1995. Т. 7, № 4. С. 3–18.
24. Иванов А. В., Мاستрюков Б. С. О достоверности использования вычислительного комплекса PHOENICS в расчетах рассеяния вещества в возмущенном потоке // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 1999. № 11. С. 64–68.
25. Иванов А. В. Разработка методических основ оценки последствий химических промышленных аварий (на примере металлургического комбината): дис. ... канд. техн. наук. М., 1999. 283 л.
26. Perdikaris G. A. Numerical simulation of the three-dimensional microscale dispersion of air-pollutants in regions with complex topography // Heat and Mass Transfer. 2001. Vol. 37. P. 583–591.
27. Селезнев В. Е., Клишин Г. С., Алешин В. В. Математический анализ газовой опасности при выбросах природного газа // Инженерная экология. 2000. № 5. С. 29–36.
28. Селезнев В. Е. Повышение безопасности и эффективности газопроводных систем ТЭК с использованием методов прямого численного моделирования: дис. ... д-ра техн. наук. Саров, 2003. 303 л.
29. Селезнев В. Е., Алешин В. В., Прялов С. Н. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов / под. ред. В. Е. Селезнева. М.: КомКнига, 2005. 496 с.
30. Котов Д. С. Методики и алгоритмическое обеспечение прогнозирования зон заражения при чрезвычайных ситуациях на химически опасных объектах: дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2018. 221 л.
31. Сумской С. И. Модели оценки последствий распространения опасных веществ в воздушной среде: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2007. 23 с.

References

1. Lisanov M. V., Pchel'nikov A. V., Sumskoy S. I. Modeling the dispersion of emissions of hazardous substances in the atmosphere. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal* [Russian Chemical Journal], 2005, vol. XLIX, no. 4, pp. 18–28 (In Russian).
2. Methodology for predicting the scale of contamination with potent toxic substances during accidents (destructions) at chemically hazardous facilities and transport: RD 52.04.253-90. Leningrad, 1990. 27 p. (In Russian).
3. Granovsky E. A., Lyfar V. A. Analysis of methods for assessing the risk of consequences of emergency emissions and dispersion of steam-gas impurities in the atmosphere. *Tekhnogenno-ekologichna bezpeka ta tsivil'niy zakhist* [Technogenic-ecological safety and civil protection], 2010, issue. 2, pp. 23–27 (In Russian).
4. System of occupational safety standards. Fire safety of technological processes. General requirements. Control methods: GOST R 12.3.047-2012. Enter. 01.01.2014. Moscow, Federal'noye Agenstvo po tekhnicheskomy regulirovaniyu i meteorologii Publ., 2014. 61 p. (In Russian).

5. Gorsky V. G., Motkin G. A., Petrunin V. A., Tereshchenko G. F., Shatalova A. A., Shvetsova-Shilovskaya T. N. *Nauchno-metodicheskiye aspekty analiza avariynogo riska* [Scientific and methodological aspects of emergency risk analysis]. Moscow, Ekologiya i informatika Publ., 2002. 260 p. (In Russian).
6. *Zashchita atmosfery ot promyshlennykh zagryazneniy: spravochnik: v 2 kn.* [Protection of the atmosphere from industrial pollution: reference book: in 2 books]. Ed. S. Calvert, G. M. Englund. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988. Book 2. 712 p. (In Russian).
7. *Metodika otsenki posledstviy khimicheskikh avariy* (Metodika TOKSI) [Methodology for assessing the consequences of chemical accidents (TOXI Methodology)]. Moscow, NTTS "Promyshlennaya bezopasnost'" Publ., 1996. 27 p. (In Russian).
8. *Metodika otsenki posledstviy khimicheskikh avariy* (Metodika "TOKSI-2.2" NTTS "Promyshlennaya bezopasnost'", soglasovannaya Gosgortekhnadzorom Rossii): *Metodiki otsenki posledstviy avariy na opasnykh proizvodstvennykh ob'yektakh: sbornik dokladov* [Methodology for assessing the consequences of chemical accidents (Methodology "TOXI-2.2" of the Scientific and Technical Center "Industrial Safety", approved by the Gosgortekhnadzor of Russia): Methods for assessing the consequences of accidents at hazardous production facilities: collection report], series 27, issue 2. Moscow, NTTS "Promyshlennaya bezopasnost'" Publ., 2010, pp. 123–204 (In Russian).
9. US Department of Commerce. *Office of Response and Restoration*. Available at: http://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/ALOHA_Tech_Doc.pdf. (accessed 04.19.2016).
10. Methodology for calculating concentrations in the atmospheric air of harmful substances contained in emissions from enterprises: OND-86: approved. Chairman of the USSR State Committee for Hydrometeorology and Environmental Control 08/04/1986. Leningrad, Goskomgidromet: Gidrometeoizdat Publ., 1987. 94 p. (In Russian).
11. Belov I. V., Bespalov M. S., Klochkova L. V., Pavlova N. K., Suzan D. V., Tishkin V. F. Comparison of models of the spread of pollution in the atmosphere. *Matematicheskoye modelirovaniye* [Mathematical modeling], 1999, vol. 11, no. 8, pp. 52–64 (In Russian).
12. Shatalov A. A., Lisanov M. V., Pchel'nikov A. V., Sumskey S. I. Methodology for calculating the distribution of emergency emissions based on the heavy gas dispersion model. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Labor safety in industry], 2004, no. 9, pp. 46–52 (In Russian).
13. Shevchuk A. P., Shebeko YU. N., Gurinovich L. V., Smolin I. M. Modeling the propagation of a steam-air cloud of heavy gas during its instantaneous release and continuous outflow. *Khimicheskaya promyshlennost'* [Chemical industry], 1992, no. 10, pp. 54–57 (In Russian).
14. Crabol V., Roux A., Lhomme V. Interpretation of the Thomey Island Phase I trials with the BOX model CIGALE2. *Journal of Hazardous Materials*, 1987, vol. 16, pp. 201–214.
15. Spicer T. O., Havens J. A. Field test validation of the DEGADIS model. *Journal of Hazardous Materials*, 1987, vol. 16, pp. 231–245.
16. Puttock J. S. Comparison of Thomey Island data with predictions of HEGABOX/HEGADAS. *Journal of Hazardous Materials*, 1987, vol. 16, pp. 439–455.
17. Mohan M., Panwar T. S., Singh M. P. Development of dense gas dispersion model for emergency preparedness. *Atmospheric Environment*, 1995, vol. 29, no. 16, pp. 2075–2087.
18. Morgan D. L., Kansa E. J., Morris L. K. Simulations and parameter variation studies of heavy gas dispersion using the SLAB model – condensed. *IUTAM Symposium on atmospheric dispersion heavy gases and small particles*. Delft University of Technology, The Netherlands, September, 1983, pp. 83–92.
19. Deaves D. M. 3-dimensional model predictions for the upwind building trial of Thomey Island Phase II. *Journal of Hazardous Materials*, 1985, vol. 11, pp. 341–346.
20. Jacobsen O., Magnussen B. F. 3-D numerical simulation of heavy gas dispersion. *Journal of Hazardous Materials*, 1987, vol. 16, pp. 215–230.
21. Chan S. T., Ermak D. L., Morris L. K. FEM3 model simulations of selected Thomey Island Phase I trials. *Journal of Hazardous Materials*, 1987, vol. 16, pp. 267–292.
22. Edigarov A. S. Numerical calculation of the turbulent flow of cold heavy gas in the atmosphere. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics], 1991, vol. 31, no. 9, pp. 1369–1380 (In Russian).
23. Edigarov A. S. Numerical modeling of accidents at a high-pressure liquefied petroleum gas storage facility. *Matematicheskoye modelirovaniye* [Mathematical Modeling], 1995, vol. 7, no. 4, pp. 3–18 (In Russian).
24. Ivanov A. V., Mastryukov B. S. On the reliability of using the PHOENICS computer complex in calculating the scattering of matter in a disturbed flow *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya VUZov. Ferrous metallurgy], 1999, no. 11, pp. 64–68 (In Russian).
25. Ivanov A. V. *Razrabotka metodicheskikh osnov otsenki posledstviy khimicheskikh promyshlennykh avariy (na primere metallurgicheskogo kombinata)*. *Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk*

[Development of methodological foundations for assessing the consequences of chemical industrial accidents (using the example of a metallurgical plant). Dissertation PhD (Engineering)]. Moscow, 1999. 283 p. (In Russian).

26. Perdikaris G. A. Numerical simulation of the three-dimensional microscale dispersion of air-pollutants in regions with complex topography. *Heat and Mass Transfer*, 2001, vol. 37, pp. 583–591.

27. Seleznev V. E., Klishin G. S., Aleshin V. V. Mathematical analysis of gas hazard during natural gas emissions. *Inzhenernaya ekologiya* [Engineering Ecology], 2000, no. 5, pp. 29–36 (In Russian).

28. Seleznev V. E. *Povysheniye bezopasnosti i effektivnosti gazoprovodnykh sistem TEK s ispol'zovaniyem metodov pryamogo chislennogo modelirovaniya*. *Dissertatsiya doktora tekhnicheskikh nauk* [Improving the safety and efficiency of gas pipeline systems of the fuel and energy complex using direct numerical modeling methods. Dissertation DSc (Engineering)]. Sarov, 2003. 303 p. (In Russian).

29. Seleznev V. E., Aleshin V. V., Pryalov S. N. *Osnovy chislennogo modelirovaniya magistral'nykh truboprovodov* [Fundamentals of numerical modeling of main pipelines]. Ed. by V. E. Seleznev. Moscow, KomKniga Publ., 2005. 496 p. (In Russian).

30. Kotov D. S. *Metodiki i algoritmicheskoye obespecheniye prognozirovaniya zon zarazheniya pri chrezvychaynykh situatsiyakh na khimicheski opasnykh ob'yektakh*. *Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk* [Methods and algorithmic support for forecasting contamination zones in emergency situations at chemically hazardous objects. Dissertation PhD (Engineering)]. Minsk, 2018. 221 p. (In Russian).

31. Sumskey S. I. *Modeli otsenki posledstviy rasprostraneniya opasnykh veshchestv v vozduшной среде*. *Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Models for assessing the consequences of the spread of hazardous substances in the air. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. Moscow, 2007. 23 p. (In Russian).

Информация об авторах

Котов Дмитрий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, ученый секретарь. НИРУП «Геоинформационные системы» (220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6, Республика Беларусь). E-mail: viscount.d@gmail.com

Новиков Евгений Владимирович – кандидат технических наук, доцент, директор. Институт современных технологий связи Белорусской государственной академии связи (220006, г. Минск, ул. Ф. Скорины, 8/2, Республика Беларусь). E-mail: eugenovikov@gmail.com

Котов Сергей Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ГУ «Белорусский институт системного анализа и информационного обеспечения научной сферы» (220006, г. Минск, пр-т Победителей, 7, Республика Беларусь). E-mail: kotov@belisa.org.by

Information about the authors

Kotov Dmitry Sergeevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Scientific Secretary. SIUE “Geoinformation systems” (6, Surganova str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: viscount.d@gmail.com

Novikov Evgeniy Vladimirovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Director. Institute of Modern Communication Technologies of the Belarusian State Academy of Communications (8/2, Francysk Skaryna str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: eugenovikov@gmail.com

Kotov Sergey Grigorievich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Leading Researcher, State Institution “Belarusian Institute of System Analysis and Information Support for the Scientific Sphere” (7, Pobediteley Ave., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kotov@belisa.org.by

Поступила после доработки 26.12.2023