

Р. В. Киричевский¹, А. В. Скринникова²

¹Луганский государственный университет им. Владимира Даля, Луганск, Российская Федерация;

²Луганский государственный педагогический университет, Луганск, Российская Федерация;
ann3005@rambler.ru)

ПРИМЕНЕНИЕ КВАДРАТИЧНОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ НА ПРИМЕРЕ НАХОЖДЕНИЯ ГЛУБИНЫ ЗОНЫ ВОЗМОЖНОГО ЗАРАЖЕНИЯ АВАРИЙНО ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ

РЕЗЮМЕ

Введение. При расчёте глубины и угла зоны возможного поражения аварийно химически опасными веществами, распространяемыми воздушными массами, применяют старую, упрощённую методику РД 52.04.253-90, имеющую ряд ограничений, что может существенно повлиять на полученный размер площади зоны поражения и на установление других последствий аварии и мер, необходимых для её ликвидации. В последней редакции СНиП 2.01.51-90 от 26.11.2020: в СП 165.1325800.2014 – эта методика так же используется.

Цель исследования состоит в разработке метода определения глубины и угла зоны возможного поражения во время выброса аварийно химически опасных веществ с использованием квадратичной интерполяции при значениях входных данных, отличных от тех, что предусмотрены методами применяемой в настоящее время методики.

Методы. В исследовании применены методы системного анализа, линейной алгебры, аналитической геометрии, математической статистики.

Результаты и их обсуждение. Проведённое исследование при расчёте глубины зоны возможного поражения аварийно химически опасными веществами предлагаемым методом показало, что квадратичная интерполяция в основном даёт увеличение глубин зон возможного поражения, в то время как линейная аппроксимация при тех же данных всегда уменьшает километраж в сравнении со значениями, взятыми из таблиц справочников.

Выводы. Предлагаемый метод будет особенно полезен при нахождении угловых размеров зоны возможного поражения, поскольку они подбираются слишком неточно. Кроме того, по данным квадратичной интерполяции возможно нахождение оптимальных (максимальных и минимальных) значений глубины и угла зоны возможного поражения аварийно химически опасными веществами. Результаты этого исследования также могут помочь в перспективе при оценке рисков в режиме реального времени и оказать поддержку лицам, принимающим решения в реагировании на чрезвычайные ситуации.

Ключевые слова: аварийно химически опасные вещества; прогнозирование; зона поражения; квадратичная интерполяция; линейная аппроксимация.

Для цитирования: Киричевский Р. В., Скринникова А. В. Применение квадратичной интерполяции на примере нахождения глубины зоны возможного заражения аварийно химически опасными веществами // Технологии техносферной безопасности. 2023. Вып. 2 (100). С. 124-136. <https://doi.org/10.25257/TTS.2023.2.100.124-136>

R. V. Kirichevskij¹, A. V. Skrinnikova^{2✉}

¹Lugansk Vladimir Dahl State University, Lugansk, Russian Federation;

²Lugansk State Pedagogical University Lugansk, Russian Federation; ann3005@rambler.ru)

THE USE OF QUADRATIC INTERPOLATION ON THE EXAMPLE OF FINDING THE DEPTH OF THE ZONE OF POSSIBLE DAMAGE BY EMERGENCY CHEMICAL HAZARDOUS SUBSTANCES

SUMMARY

Introduction. When calculating the depth and angle of the zone of possible damage by emergency chemically hazardous substances distributed by air masses, the old, simplified methodology set out in the Guidance Document RD 52.04.253-90 is used. This technique has a number of limitations, which can significantly affect the resulting size of the affected area and the establishment of other consequences of the accident and measures necessary for its elimination. In the latest version of Building Codes and Regulations SNiP 2.01.51-90 dated 11/26/2020: in Code of Practice SP 165.1325800.2014, this technique is also used.

The purpose of the study is to develop a method for determining the depth and angle of the zone of possible damage during the release of an emergency chemically hazardous substance using quadratic interpolation at input data values other than those provided by the methods of the currently used methodology.

Methods. The research uses methods of system analysis, linear algebra, analytical geometry, mathematical statistics.

Results and their discussion. The conducted research when calculating the depth of the zone of possible damage by emergency chemically hazardous substances by the proposed method showed that quadratic interpolation mainly gives an increase in the depths of the zones of possible damage, while linear approximation with the same data always reduces the size in comparison with the values taken from the reference tables.

Conclusions. The proposed method will be especially useful when finding the angular dimensions of the zone of possible damage, since they are selected too inaccurately. In addition, according to the quadratic interpolation data, it is possible to find optimal (maximum and minimum) values of the depth and angle of the zone of possible damage by emergency chemically hazardous substances. The results of this study can also help in the long term when assessing risks in real time and provide support to decision makers in responding to emergencies.

Keywords: emergency chemical hazardous substances; forecasting; affected area; quadratic interpolation; linear approximation.

For citation: Kirichevskij R. V., Skrinnikova A. V. The use of quadratic interpolation on the example of finding the depth of the zone of possible damage by emergency chemical hazardous substances. *Technology of technosphere safety*, 2023; 2(100):124-136. (In Russ.). <https://doi.org/10.25257/TTS.2023.2.100.124-136>

Введение

Аналитические исследования и системный анализ показывают, что проблемы по ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и/или техногенного характера приобретают все большую остроту в связи с интенсификацией производства. Поэтому прогнозирование последствий возникновения ЧС является чрезвычайно актуальной задачей как для федеральных органов исполнительной власти в рамках функционирования РСЧС, так и для научных организаций [1-6].

ЧС, обусловленные выбросом/утечкой аварийно химически опасных веществ (АХОВ), могут привести к различным поражающим воздействиям, ведущим к повреждению материальных ценностей, токсическим поражениям людей и животных, загрязнению окружающей среды за короткое время в больших масштабах. Уточним, что АХОВ могут использоваться при различных видах производства, храниться, перерабатываться или транспортироваться. В данной работе внимание уделено АХОВ, которые распространяются воздушными массами.

Для прогноза масштабов поражения АХОВ непосредственно после аварии берутся конкретные данные о количестве выброшенного АХОВ и реальные метеоданные в регионе. Существующие комплексы программ прогнозирования ЧС, например, программа "АХОВ"¹, оперативно рассчитывают и выводят на карту местности зоны возможного поражения. В расчётах используют регламентированную МЧС России методику РД 52.04.253-90². Эта методика основана на простых методах и кроме очерченных в [2] неточностей и ограничений, например, расчёт зоны заражения определяется лишь для непересечённой местности, имеет и другие: угловые размеры зоны возможного поражения АХОВ в зависимости от скорости ветра на высоте 2 м ограничены значениями 2π , π , $\pi/2$, $\pi/4$; скорость ветра ограничена от 1 до 15 м/с с шагом изменения, равным 1 м/с; эквивалентное количество АХОВ определяется неточно. Если в случае определения глубины заражения при "нестандартных" значениях входных данных прибегают к линейной аппроксимации, то с угловыми размерами поступают "грубее" [4].

В то же время разработаны другие модели и методы, позволяющие оценить параметры распространения АХОВ в случае их утечки [3, 5]: имеющие эмпирический характер, использующие дифференциальные уравнения, различные модели рассеяния облака газа. В методике [6], основанной на [4], глубины распространения первичного и вторичного облака АХОВ определяются на основании табличных значений глубин распространения облака АХОВ на равнинной местности при стандартных внешних температурных условиях, но с поправочным коэффициентом, учитывающим влияние температуры воздуха, с коэффициентом влияния рельефа местности, коэффициентом пропорциональности, учитывающим расхождение массы АХОВ с типичным объёмом контейнера. Это несложно реализовать при помощи компьютерных технологий, однако, при расчёте глубины и угла зоны поражения АХОВ в настоящее время используют именно указанную выше методику.

Целью работы является разработка метода нахождения глубины и угла зоны возможного заражения АХОВ с применением квадратичной интерполяции при возникновении ЧС на объекте.

Опишем принципы создания метода. Для наглядности основную идею проследим на примере функции двух переменных.

¹ Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022611211 от 21 января 2022 г. https://titan-optima.com/programm/ahov/sert_AHOV.jpg

² РД 52.04.253-90. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте

Поиск интерполирующей функции двух переменных

Поскольку площадь зоны поражения АХОВ зависит от скорости ветра (x_1) и эквивалентного количества АХОВ (x_2) [4], однако, линейность этой зависимости не обоснована (ветер, например, меняет направление, возможны порывы, бризы, бури и т.п.), то будем рассматривать глубину зоны возможного поражения АХОВ как функцию от двух переменных: $y(x_1, x_2)$. Заметим, что в настоящее время большое внимание уделяется комбинированию, гибридизации различных методов. Причём, метаэвристические методы [7] не гарантируют сходимость к глобальному решению задачи оптимизации, построенной по интерполяции, однако, в сравнении с классическими методами позволяют получить хорошее решение за приемлемое с практической точки зрения время. Поэтому насущным является решение задачи поиска подхода, лишённого указанных недостатков.

Применение квадратичной интерполяции снимает очерченные выше ограничения, поскольку ищется оптимум квадратичной формы. Также не возникает проблемы плохой обусловленности вблизи оптимума, поскольку поиск ведётся в "условных" координатах. Введение "условных" координат позволяет работать даже в криволинейных реальных координатах, преобразуя их в сетку с равноотстоящими узлами. И, наконец, зависимость оптимума только от значений целевой функции избавляет от необходимости проверки выполнения условий о существовании производных и их вычислений.

Пусть для некоторой функции цели $y(x_1, x_2)$ от двух переменных x_1, x_2 известна таблица 3×3 её значений при некоторых x_1, x_2 . При условии, что точки находятся на одинаковом расстоянии друг от друга (с равномерным, не обязательно одинаковым, шагом по каждой из координат), будем иметь табл. 1

Таблица 1
Table 1

Предполагаемая сетка для функции двух переменных
Assumed grid for a function of two variables

x_1/x_2	$x_2^0 - \Delta x_2$	x_2^0	$x_2^0 + \Delta x_2$
$x_1^0 - \Delta x_1$	y_1	y_2	y_3
x_1^0	y_4	y_5	y_6
$x_1^0 + \Delta x_1$	y_7	y_8	y_9

Обозначим центральную точку через (x_1^0, x_2^0) . В общем случае исходные координаты могут не обладать свойствами ортогональности и равнозначности шагов по каждой из координат. Перейдём к безразмерным координатам (z_1, z_2) , удовлетворяющим указанным условиям.

Преобразование координат $z_1 = z_1(x_1)$, $z_2 = z_2(x_2)$, приводит искомые координаты к виду, изображённому на рис. 1.

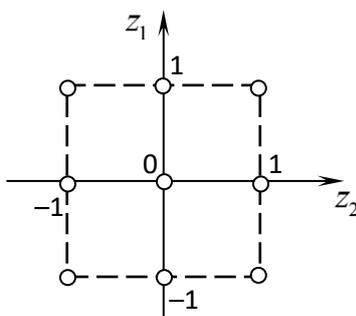


Рис. 1. Сетка, построенная после преобразования координат из табл. 1

Fig. 1. The grid constructed after the transformation of coordinates from Table 1

В простейшем случае достаточно переноса центра координат и изменения масштаба по каждой из координат. В случае равноотстоящих узлов решётки реальных координат искомым преобразованием будет

$$z_1 = \frac{x_1 - x_1^0}{\Delta x_1}, \quad z_2 = \frac{x_2 - x_2^0}{\Delta x_2}, \quad f(z_1, z_2) = y(x_1, x_2).$$

В общем случае переход от вектора $\bar{x}(x_1, x_2)$ к вектору $\bar{z}(z_1, z_2)$ не обязательно связан с линейным преобразованием. В рассматриваемом случае выполним перенос центра и изменение масштаба. В произвольном случае может быть целесообразным переход к криволинейным координатам.

Для решения задачи нахождения оптимума необходимо уметь вычислить функцию f в любой точке внутри заданной области. Для этого воспользуемся квадратичной функцией:

$$\hat{f} = a_0 + a_1 z_1 + a_2 z_2 + a_3 z_1^2 + a_4 z_2^2 + a_5 z_1 z_2. \quad (1)$$

Число степеней свободы в этом случае будет равно

$$\nu = 3^n - \frac{(n+1)(n+2)}{2} - 1 = 3^2 - \frac{(2+1)(2+2)}{2} - 1 = 2 > 0,$$

где n – количество переменных; $3^n = N$ – число опытов; $\frac{(n+1)(n+2)}{2} = \lambda$ – количество коэффициентов полной квадратичной формы. Поскольку $\nu > 0$ – можем использовать метод наименьших квадратов.

Построим табл. 2 для девяти рассматриваемых узлов сетки (рис. 1), обозначив для удобства:

$$\begin{aligned} f_1 = y_5; \quad f_2 = y_6; \quad f_3 = y_4; \quad f_4 = y_8; \quad f_5 = y_9; \\ f_6 = y_7; \quad f_7 = y_2; \quad f_8 = y_3; \quad f_9 = y_1. \end{aligned}$$

Таблица 2
Table 2Матрица узлов сетки для двухуровневого эксперимента
Grid node matrix for a two-level experiment

Номер точки Point number	z_1	z_2	f
1	0	0	f_1
2	0	1	f_2
3	0	-1	f_3
4	1	0	f_4
5	1	1	f_5
6	1	-1	f_6
7	-1	0	f_7
8	-1	1	f_8
9	-1	-1	f_9

Составим систему нормальных уравнений:

$$\begin{pmatrix} N & z_1 & z_2 & z_1^2 & z_2^2 & z_1 z_2 & f \\ z_1 & z_1^2 & z_1 z_2 & z_1^3 & z_1 z_2^2 & z_1^2 z_2 & z_1 f \\ z_2 & z_1 z_2 & z_2^2 & z_1^2 z_2 & z_2^3 & z_1 z_2^2 & z_2 f \\ z_1^2 & z_1^3 & z_1^2 z_2 & z_1^4 & z_1^2 z_2^2 & z_1^3 z_2 & z_1^2 f \\ z_2^2 & z_1 z_2^2 & z_2^3 & z_1^2 z_2^2 & z_2^4 & z_1 z_2^3 & z_2^2 f \\ z_1 z_2 & z_1^2 z_2 & z_1 z_2^2 & z_1^3 z_2 & z_1 z_2^3 & z_1^2 z_2^2 & z_1 z_2 f \end{pmatrix}. \quad (2)$$

В системе (2) любой элемент, кроме N , означает суммирование по обозначенным признакам. Например, элемент $z_1 z_2$, находящийся на пересечении 2 строки и 3 столбца, надо понимать как $\sum_{i=1}^9 z_{1i} z_{2i}$, а элемент $z_1^2 f$, находящийся на пересечении 4 строки и 7 столбца, надо понимать как $\sum_{i=1}^9 z_{1i}^2 f_i$.

Данную систему легко упростить, подставив значения z_1 и z_2 из табл. 2 и обозначив столбец свободных членов через b_i .

$$\begin{pmatrix} 9 & 0 & 0 & 6 & 6 & 0 & f = b_0 \\ 0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & z_1 f = b_1 \\ 0 & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 & z_2 f = b_2 \\ 6 & 0 & 0 & 6 & 4 & 0 & z_1^2 f = b_3 \\ 6 & 0 & 0 & 4 & 6 & 0 & z_2^2 f = b_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & z_1 z_2 f = b_5 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Запишем систему уравнений в матричной форме. Выпишем матрицу A :

$$A = \begin{pmatrix} 9 & 0 & 0 & 6 & 6 & 0 \\ 0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 6 & 4 & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 4 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

тогда

$$A \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{pmatrix}.$$

Найдём вектор-столбец $\bar{a} = \{a_i\}$: $\bar{a} = A^{-1} \cdot \bar{b}$ или

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{pmatrix} = A^{-1} \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Из полученных равенств видно, что для дальнейшего решения необходимо вычислить обратную матрицу A^{-1} . Учитывая размерность матрицы A , промежуточные вычисления опустим, укажем только конечный результат, поскольку промежуточные вычисления с помощью алгебраических дополнений не имеют для рассматриваемого вопроса весомого значения. Обратная матрица выглядит следующим образом:

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{5}{9} & 0 & 0 & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & 0 \\ 0 & \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{3} & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{4} \end{pmatrix}.$$

Воспользуемся найденной обратной матрицей для записи равенства (5) в другом виде:

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \frac{5}{9}b_0 && -\frac{1}{3}b_3 && -\frac{1}{3}b_4; \\
 a_1 &= && \frac{1}{6}b_1; \\
 a_2 &= && \frac{1}{6}b_2; \\
 a_3 &= -\frac{1}{3}b_0 && && +\frac{1}{2}b_3; \\
 a_4 &= -\frac{1}{3}b_0 && && +\frac{1}{2}b_4; \\
 a_5 &= && && \frac{1}{4}b_5.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Из (3) следует, что

$$\begin{aligned}
 b_0 &= \sum f_i; & b_1 &= \sum z_{1i}f_i; & b_2 &= \sum z_{2i}f_i; & b_3 &= \sum z_{1i}^2f_i; \\
 & & b_4 &= \sum z_{2i}^2f_i; & b_5 &= \sum z_{1i}z_{2i}f_i.
 \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{5}{9} & 0 & 0 & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & 0 \\ 0 & \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{3} & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{4} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sum f_i \\ \sum z_{1i}f_i \\ \sum z_{2i}f_i \\ \sum z_{1i}^2f_i \\ \sum z_{2i}^2f_i \\ \sum z_{1i}z_{2i}f_i \end{pmatrix};$$

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \sum \left(\frac{5}{9} - \frac{1}{3}z_{1i}^2 - \frac{1}{3}z_{2i}^2 \right) f_i; & a_1 &= \sum \frac{1}{6}z_{1i}f_i; \\
 a_2 &= \sum \frac{1}{6}z_{2i}f_i; & a_3 &= \sum \left(-\frac{1}{3} + \frac{1}{2}z_{1i}^2 \right) f_i; \\
 a_4 &= \sum \left(-\frac{1}{3} + \frac{1}{2}z_{2i}^2 \right) f_i; & a_5 &= \sum \frac{1}{4}z_{1i}z_{2i}f_i.
 \end{aligned} \tag{7}$$

Из (7) легко видеть, что в условных координатах коэффициенты a_i зависят только от f_i . Действительно, если записать (7) в виде: $a_i = \bar{\alpha}_i \bar{f}$, $i = \overline{1,9}$, где $\bar{\alpha}_i$ – вектор-строка, а \bar{f} – вектор-столбец, то используя табл. 2 можно получить инвариантные значения векторов $\bar{a}_0, \dots, \bar{a}_5$:

$$\begin{aligned}\bar{\alpha}_0 &= \left(\frac{5}{9}; \frac{2}{9}; \frac{2}{9}; \frac{2}{9}; -\frac{1}{9}; -\frac{1}{9}; \frac{2}{9}; -\frac{1}{9}; -\frac{1}{9} \right); \bar{\alpha}_1 = \left(0; 0; 0; \frac{1}{6}; \frac{1}{6}; \frac{1}{6}; -\frac{1}{6}; -\frac{1}{6}; -\frac{1}{6} \right); \\ \bar{\alpha}_2 &= \left(0; \frac{1}{6}; -\frac{1}{6}; 0; \frac{1}{6}; -\frac{1}{6}; 0; \frac{1}{6}; -\frac{1}{6} \right); \bar{\alpha}_3 = \left(-\frac{1}{3}; -\frac{1}{3}; -\frac{1}{3}; \frac{1}{6}; \frac{1}{6}; \frac{1}{6}; \frac{1}{6}; \frac{1}{6}; \frac{1}{6} \right); \\ \bar{\alpha}_4 &= \left(-\frac{1}{3}; \frac{1}{6}; \frac{1}{6}; -\frac{1}{3}; \frac{1}{6}; \frac{1}{6}; -\frac{1}{3}; \frac{1}{6}; \frac{1}{6} \right); \bar{\alpha}_5 = \left(0; 0; 0; 0; \frac{1}{4}; -\frac{1}{4}; 0; -\frac{1}{4}; \frac{1}{4} \right).\end{aligned}$$

Теперь интерполирующий полином (1) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}\hat{f} &= \bar{\alpha}_0 \cdot \bar{f} + \bar{\alpha}_1 \cdot \bar{f} \cdot z_1 + \bar{\alpha}_2 \cdot \bar{f} \cdot z_2 + \bar{\alpha}_3 \cdot \bar{f} \cdot z_1^2 + \\ &\quad + \bar{\alpha}_4 \cdot \bar{f} \cdot z_2^2 + \bar{\alpha}_5 \cdot \bar{f} \cdot z_1 z_2 = \\ &= \left(\bar{\alpha}_0 + z_1 \bar{\alpha}_1 + z_2 \bar{\alpha}_2 + z_1^2 \bar{\alpha}_3 + z_2^2 \bar{\alpha}_4 + z_1 z_2 \bar{\alpha}_5 \right) \cdot \bar{f}.\end{aligned}\quad (8)$$

Откуда видно, что при постоянных $\bar{\alpha}_i$ и известных z_1, z_2 , значение \hat{f} напрямую зависит от \bar{f} . Это избавляет от проблемы слабой обусловленности матрицы A вблизи точки оптимума.

Подставив в (8) числовые значения векторов $\bar{a}_0, \dots, \bar{a}_5$, получим более конкретную в смысле числового выражения формулу:

$$\begin{aligned}\hat{f} &= \left[\left(\frac{5}{9}; \frac{2}{9}; \frac{2}{9}; \frac{2}{9}; -\frac{1}{9}; -\frac{1}{9}; \frac{2}{9}; -\frac{1}{9}; -\frac{1}{9} \right) + z_1 \left(0; 0; 0; \frac{1}{6}; \frac{1}{6}; \frac{1}{6}; -\frac{1}{6}; -\frac{1}{6}; -\frac{1}{6} \right) + \right. \\ &\quad + z_2 \left(0; \frac{1}{6}; -\frac{1}{6}; 0; \frac{1}{6}; -\frac{1}{6}; 0; \frac{1}{6}; -\frac{1}{6} \right) + z_1^2 \left(-\frac{1}{3}; -\frac{1}{3}; -\frac{1}{3}; \frac{1}{6}; \frac{1}{6}; \frac{1}{6}; \frac{1}{6}; \frac{1}{6}; \frac{1}{6} \right) + \\ &\quad \left. + z_2^2 \left(-\frac{1}{3}; \frac{1}{6}; \frac{1}{6}; -\frac{1}{3}; \frac{1}{6}; \frac{1}{6}; -\frac{1}{3}; \frac{1}{6}; \frac{1}{6} \right) + z_1 z_2 \left(0; 0; 0; 0; \frac{1}{4}; -\frac{1}{4}; 0; -\frac{1}{4}; \frac{1}{4} \right) \right] \cdot \bar{f}.\end{aligned}\quad (9)$$

Таким образом, при решении задачи интерполяции функции двух переменных найдены коэффициенты $\bar{a}_0, \dots, \bar{a}_5$. Достаточно в формулу (9) подставить конкретные значения z_1, z_2 и получить значение \hat{f} .

Полученные результаты

Сравним имеющиеся табличные значения, результаты интерполяции глубин зон возможного заражения АХОВ, полученные при помощи выражения (9), и полученные при помощи линейной аппроксимации [3].

Занесём в табл. 3 данные глубин зон возможного заражения АХОВ (P , км) при известных скоростях ветра (z_1 , м/с) и эквивалентных количествах АХОВ (z_2 , т), взятые из источника [4, с. 27]. Результаты расчётов по выражению (9), в том числе не представленные в других источниках значения P при z_2 , равном 200, 400 и 450 т, занесём в табл. 4. В табл. 5 поместим результаты сравнения некоторых табличных значений P и их рассчитанных значений ($\hat{P}_{лин}$ – линейная аппроксимация, $\hat{P}_{кли}$ – по выражению (9)).

Таблица 3
Table 3

Данные глубин зон возможного заражения АХОВ

Data on the depths of zones of possible contamination with emergency chemically hazardous substances

z_1	z_2	P	z_1	z_2	P	z_1	z_2	P
7	300	30,73	4	100	24,8	5	500	54,67
7	500	41,63	5	100	20,82	6	500	47,09
7	100	16,17	6	100	18,13	9	300	25,39
15	300	17,6	9	100	13,5	11	300	21,91
15	500	23,5	11	100	11,74	13	300	19,45
15	100	9,7	13	100	10,48	9	500	34,24
4	300	48,18	5	300	40,110	11	500	29,44
4	500	65,92	6	300	34,670	13	500	26,04

Таблица 4
Table 4

Результаты интерполяции по выражению (9)

Interpolation results by expression (9)

$z_1 \backslash z_2$	100	200	300	400	450	500
4	25,45	36,970	47,56	57,198	61,666	65,899
5	21,660	32,045	41,491	49,995	53,894	57,557
6	18,340	27,587	35,894	43,260	46,590	49,680
7	15,49	23,596	30,766	36,993	39,754	42,278
9	13,650	20,910	27,226	32,600	34,934	37,030
11	12,086	18,490	23,951	28,471	30,377	32,049
13	10,780	16,330	20,938	24,604	26,084	27,330
15	9,73	14,430	18,189	21,000	22,055	22,872

Точность интерполяции

Interpolation accuracy

Табличное значение (P_i) Table value (P_i)	Линейная аппроксимация Linear approximation	Интерполяция по (9) Interpolation by (9)	$P_i - \hat{P}_{лиi}$	$P_i - \hat{P}_{киi}$
48,180	45,36	47,56	-2,820	-0,620
40,110	37,745	41,491	-2,365	1,381
34,670	32,61	35,894	-2,060	1,224
30,73	28,9	30,766	-1,830	0,036
25,390	23,87	27,226	-1,520	1,836
21,910	20,59	23,951	-1,320	2,041
19,450	18,26	20,938	-1,190	1,488
17,6	16,6	18,189	-1,000	0,589
65,92	63,271	65,899	-2,649	-0,021
47,090	45,25	49,68	-1,840	2,590

По средней квадратичной ошибке модели $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - \hat{P}_i)^2}$ получим:

$\sigma_{ли} \approx 1,950$ для линейной аппроксимации, $\sigma_{ки} \approx 1,435$ для квадратичной интерполяции, то есть $\sigma_{ки} < \sigma_{ли}$. Из табл. 5 видно, что квадратичная интерполяция в основном даёт увеличение глубин зон возможного заражения АХОВ, в то время, как линейная всегда уменьшает километраж зон. На рис. 2 схематически представлены глубины зон заражения АХОВ (P) при скорости ветра 15 м/с и эквивалентном количестве АХОВ 300 т в зависимости от методов их нахождения.

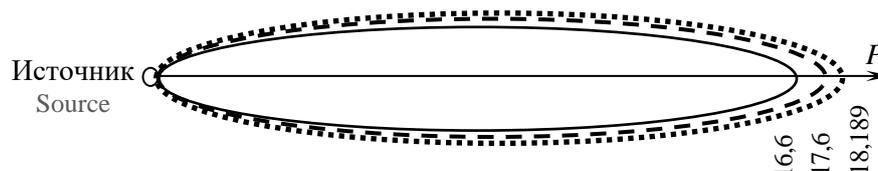


Рис. 2. Зависимость глубины заражения АХОВ от метода её нахождения:

— линейная интерполяция; - - табличное значение;

••• интерполяция по (9)

Fig. 2. Dependence of the depth of damage by emergency chemically hazardous substances on the method of its finding:

— linear interpolation; - - table value;

••• interpolation by (9)

Заключение

В работе обозначены некоторые недостатки используемых в настоящее время методов определения глубины и угла зоны возможного поражения АХОВ по методике РД 52.04.253-90: слишком неточное определение угла в зависимости от скорости ветра, который считается постоянным, и нахождение глубины зоны также при постоянных входных данных.

С помощью выведенного выражения (9) построена уточнённая интерполяционная модель нахождения глубины и угла зоны возможного поражения АХОВ. Полученный на основе этой модели метод послужит проверочным дополнением и/или даже альтернативой методу, используемому в настоящее время в методике прогнозирования масштабов заражения АХОВ. Это в свою очередь поможет в некоторых случаях сократить расходы на дезактивацию зоны поражения.

В перспективе по результатам квадратичной интерполяции планируется нахождение оптимальных (максимальных и минимальных) значений глубины и угла зоны возможного поражения АХОВ, описание разработанного алгоритма нахождения оптимума и его программная реализация.

Список источников

1. *Приходько С. А.* Безопасность в чрезвычайных ситуациях: прогнозирование и оценка последствий техногенных чрезвычайных ситуаций: учеб. пособие. Благовещенск: изд-во АмГУ, 2014. 228 с.
2. *Толстых А. С., Гладкая А. Д.* Модификация методики прогнозирования химического заражения местности при авариях на химически опасных // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2021. № 2(88). С. 50-57. EDN QHKMLO.
3. *Седнев В. А., Немцов В. М.* Оценка возможной обстановки при аварии на химически опасных объектах Ставропольского края // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2020. № 1. С. 44-53. <https://doi.org/10.25257/FE.2020.1.44-53>. EDN CUAUEU.
4. *Майорова Л. П.* Прогноз заражения АХОВ: указания к практическому занятию по дисциплине "Оценка воздействия на среду и экологическая экспертиза". Хабаровск: изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2017. 36 с.
5. *Вишняков А. В., Осипчук А. О., Рязанов А. А., Мурзин С. М., Шишкин П. Л., Удилова И. Я.* О прогнозировании обстановки при аварии на химически опасном объекте // Технологии техносферной безопасности. 2015. Вып. 1 (59). С. 113-119. EDN TWPDDH.
6. *Konstantinova E. V.* Structuring threats in the technological companies and the opposition on the basis of Blakean technologies // World Ecology Journal. 2017. Vol. 7. No. 10. Pp. 3-7. EDN TKVBLE.
7. *Полупанов А. А., Полупанова Е. Е., Чумаченко С. В.* Гибридный алгоритм оптимизации сложных функций // Научные исследования в области технических и технологических систем: сборник статей Международной научно-практической конференции. Тюмень: ООО "ОМЕГА САЙНС", 2018. С. 58-61. EDN XPXSLZ.

References

1. Prikhodko S. A. Safety in emergency situations: forecasting and assessment of the consequences of man-made emergencies: textbook. Blagoveshchensk, Amur State University Publ., 2014; 228. (In Russ.).
2. Tolstykh A. S., Gladkaya A. D. Modification of the forecasting method chemical contamination of the area in accidents at chemically hazardous facilities. Socioeconomic and technical systems: research, design, optimization, 2021; 2(88):50-57. (In Russ.). EDN QHKMLO.
3. Sednev V. A., Nemtsov V. M. Evaluation of a possible situation in case of an emergency at a chemically hazardous facility in the Stavropol region. *Fire and emergencies: prevention, elimination*, 2020; 1:44-53. (In Russ.). <https://doi.org/10.25257/FE.2020.1.44-53>. EDN CUAUEU.
4. Mayorova L. P. Prognosis of contamination of emergency chemically hazardous substances: instructions for a practical lesson in the discipline "Environmental Impact Assessment and Environmental Expertise". Khabarovsk, Pacific Ocean State University Publ., 2017; 36. (In Russ.).
5. Vishnyakov A. V., Osipchuk A. O., Ryazanov A. A., Murzin S. M., Shishkin P. L., Udilova I. Y. About forecasting of situation during the accident on chemically hazardous object. *Technology of technosphere safety*, 2015; 1(59):113-119. (In Russ.). EDN TWPDDH.
6. Konstantinova E. V. Structuring threats in the technological companies and the opposition on the basis of Blakean technologies. *World Ecology Journal*, 2017; 7(10):3-7. EDN TKVBLE.
7. Polupanov A. A., Polupanova E. E., Chumachenko S. V. Hybrid algorithm for optimization of complex functions. Proceed. of International Scientific and Practical Conference "Scientific research in the field of technical and technological systems", Tyumen, OMEGA SCIENCE Publ., 2018; 58-61. (In Russ.). EDN XPXSLZ.

Поступила 27.12.2022, одобрена после рецензирования 28.06.2023; принята к публикации 29.06.2023
Received December 27, 2022; Approved after reviewing June 28 2023; Accepted June 29, 2023

Информация об авторах

КИРИЧЕВСКИЙ Ростислав Викторович
канд. техн. наук, доцент; доцент
кафедры аварийно-спасательных работ;
Луганский государственный университет
имени Владимира Даля; Российская Феде-
рация, 91000, г. Луганск, кв. Молодёжный,
д. 20а; РИНЦ SPIN-код: 5902-2702; РИНЦ
Author ID: 1158413; rost71@mail.ru

СКРИННИКОВА Анна Владимировна
канд. техн. наук; старший преподаватель
кафедры фундаментальной математики;
Луганский государственный педагогиче-
ский университет; Российская Федерация,
91001, г. Луганск, ул. Оборонная, д. 2;
<https://orcid.org/0000-0003-1005-6967>;
РИНЦ SPIN-код: 3782-7901; РИНЦ Author
ID: 815017; ann3005@rambler.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Information about the authors

KIRICHEVSKIJ Rostislav Victorovich
Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor; Associate Professor of Department
Rescue operations; Lugansk Vladimir Dahl
State University; Russian Federation, 91000,
Lugansk, Molodezhny Block, 20a; RSCI
SPIN code: 5902-2702; RSCI Author ID:
1158413; rost71@mail.ru

SKRINNIKOVA Anna Vladimirovna
Candidate of Technical Sciences; Senior Lec-
turer the Department of Fundamental Mathe-
matics; Lugansk State Pedagogical Univer-
sity; Russian Federation, 91001, Lugansk,
Oboronnaya St., 2; <https://orcid.org/0000-0003-1005-6967>;
RSCI SPIN code: 3782-
7901; RSCI Author ID: 815017;
ann3005@rambler.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests