

## Модификация алгоритма фронтального моделирования последствий аварийных выбросов на основе эмпирико-статистического подхода

Л.О. Чернышев<sup>1</sup>✉, Ю.Н. Матвеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Тверской государственный технический университет,  
г. Тверь, 170026, Россия

### Ссылка для цитирования

Чернышев Л.О., Матвеев Ю.Н. Модификация алгоритма фронтального моделирования последствий аварийных выбросов на основе эмпирико-статистического подхода // Программные продукты и системы. 2024. Т. 37. № 1. С. 95–104. doi: 10.15827/0236-235X.142.095-104

### Информация о статье

Группа специальностей ВАК: 2.3.1

Поступила в редакцию: 21.07.2023

После доработки: 11.09.2023

Принята к публикации: 25.09.2023

**Аннотация.** В статье рассматривается эмпирико-статистический подход к построению клеточной модели для визуализации последствий выброса в атмосферу токсических веществ при локальном масштабе аварии. Показано, что в условиях априорной неопределенности исходных данных в вычислительном ядре супервизорной системы, воспроизводящей последствия аварийных выбросов, должна быть реализована двухконтурная схема обработки информации. Эффективность параметрического оценивания модели во внешнем контуре такой схемы существенно зависит от скорости и точности модельных вычислений, реализуемых алгоритмами внутреннего контура моделирования и визуализации последствий выброса. Проанализированы особенности процедур параметрического оценивания в условиях дефицита информации для продолженного выброса токсических веществ. Сформированы требования к альтернативной модификации алгоритма моделирования с учетом преимуществ эмпирико-статистического подхода. Дано краткое описание разработанного алгоритма: обоснован выбор 16-точечного шаблона моделирования, рассмотрены особенности эмпирической функции, модифицирующей поле расстояний в зависимости от углового направления ветрового массопереноса, детализирована блок-схема алгоритма и раскрыты основные соотношения, составляющие основу расчета карты расстояний с последующей оценкой верхних пределов концентрации загрязнителя. Выявлены преимущества и недостатки практической реализации алгоритма. Представлены результаты испытания алгоритма при отработке фактических экспериментальных данных на условном макете карты местности. Предлагаемый подход позволит повысить быстродействие алгоритма фронтального моделирования и снизить временные затраты на поиск опорного решения в двухконтурной схеме обработки информации. Материалы статьи могут быть использованы для совершенствования функционала супервизорных систем поддержки принятия решений при ликвидации последствий аварийных выбросов.

**Ключевые слова:** чрезвычайная ситуация, оперативное реагирование, фронтальное моделирование, эмпирико-статистический подход, поле расстояний, визуализация

**Введение.** Современные химические производства неразрывно связаны с использованием, транспортировкой и хранением *аварийных химически опасных веществ (АХОВ)*, выбросы которых могут привести к негативным последствиям, большому ущербу и загрязнению окружающей среды. В силу этого разработка и внедрение ПО для прогнозирования последствий выбросов АХОВ находятся под постоянным контролем органов государственной власти. Эффективность реагирования на ЧС с химическим загрязнением местности напрямую зависит от оперативности и обоснованности принимаемых решений. В таких случаях обычно используют результаты функционирования автоматизированных систем поддержки принятия решений, позволяющие сформировать на карте местности визуальное отображение границ *опасной зоны загрязнения (ОЗЗ)* и профилей концентрации АХОВ. Наглядное

воспроизведение последствий аварии служит основой для исходного варианта управленческого решения, направленного на ликвидацию последствий ЧС, которое подлежит уточнению по мере накопления оперативной информации. Для визуализации полей концентрации АХОВ, наиболее приближенных к фактическим данным химического мониторинга местности, и первичной оценки площади ОЗЗ активно применяются методы пространственного анализа данных: IDW (метод обратных взвешенных расстояний), кригинг и другие [1]. Представим подход к разработке алгоритмического обеспечения внутреннего контура моделирования в системе поддержки принятия решений [2], ориентированного на расчет полей концентрации АХОВ за пределами измеренных областей с учетом метеорологических данных, основных параметров источника выброса и конфигурации городской или промышленной инфраструктуры.

## Обзор существующих подходов

Модуль аварийного прогнозирования, реализующий алгоритмы моделирования последствий выброса АХОВ, является одним из наиболее значимых функциональных компонентов системы поддержки принятия решений при выборе стратегии ликвидации ЧС [3]. К основным моделям прогнозирования относятся box-модели, модели Гаусса, Лагранжа, Эйлера, вычислительные гидродинамические модели. Детальный обзор таких моделей сделан в монографии [4]. Развернутый перечень с анализом программных средств и систем моделирования качества воздуха представлен в публикации [5].

Существующие подходы к разработке моделей рассеивания вредных веществ в атмосфере [6] можно условно разделить на две категории: теоретический (априорный), основанный на известных представлениях о процессе распространения примесей с использованием, в частности, решений уравнения турбулентной диффузии, и эмпирико-статистический (апостериорный), позволяющий анализировать области атмосферных загрязнений с использованием метеоданных и результатов полевых наблюдений. Краткий анализ методик расчета рассеивания, приведенный в обзоре [7], показал, что эмпирико-статистические модели (например, регрессионные картографические модели) в настоящее время находят широкое применение для описания пространственного распределения загрязняющих веществ в городской атмосфере.

В некоторых публикациях отмечено, что сложность задачи анализа и прогнозирования последствий загрязнения обусловлена проблемами в понимании реальных физических процессов, сопутствующих выбросу АХОВ [8, 9]. Разработка достоверного прогноза невозможна без учета основных условий распространения выброса и факторов образования зоны загрязнения (эмиссии, ветрового массопереноса, турбулентной диффузии, седиментации). Поэтому в расчетные модели прогноза включены многочисленные параметры, которые разделены на следующие основные типы: параметры источника выброса (химический состав и физические свойства загрязняющих веществ, количественная оценка выброса, сценарии аварии), параметры метеоусловий выброса (направление и скорость ветра, температура воздуха и т.д.), параметры конфигурации местности (схемы застройки, характеристики ландшафта и шероховатости окружающей среды) [10]. К тому же

каждая ЧС обладает специфическими условиями и уникальными особенностями, которые невозможно воспроизвести с помощью предварительных натуральных экспериментов.

Особенности рельефа местности, нестационарность и стохастичность условий выброса ограничивают возможности использования аналитических методов для расчета ОЗЗ при локальном масштабе аварии. Априорная неопределенность, недостаточность или неточность исходных данных могут привести к ошибкам прогноза. В этих условиях целесообразно использовать апостериорный подход, позволяющий оценивать параметры модели прогноза на основе сравнения результатов моделирования и данных мониторинга.

Схема обработки аварийной ситуации должна учитывать фактическую оценку последствий загрязнения территории и формировать прогноз развития аварийной ситуации на основе сравнения результатов моделирования последствий выброса с данными мониторинга местности [4]. Минимизация отклонений между прогнозируемыми и реальными данными является основой для настройки параметров расчетной модели, наилучшим образом воспроизводящей измеренные данные о концентрации загрязнителей [11]. Таким образом, в вычислительном ядре автоматизированной системы поддержки принятия решений должны быть реализованы, по крайней мере, два контура обработки информации: внутренний контур, содержащий алгоритм модели распространения примеси с последующей визуализацией ОЗЗ, и внешний контур, формирующий оценки параметров модели на основе данных химического мониторинга местности [2].

Анализ источников [11, 12] выявил основные режимы расчета параметров модели в зависимости от условий организации наблюдений и доступности средств мониторинга: режим настройки (калибровки) модели, реализуемый в случае единичных наблюдений, режим ассимиляция данных при доступности показаний датчиков в режиме реального времени. Режим настройки модели основан на поиске ее наилучших параметров, которые доставляют минимум целевой функции выходных переменных (отклонению результатов моделирования от данных мониторинга, рассчитанному для некоторого интервала полевых наблюдений). Временные затраты на поиск опорного решения напрямую связаны с числом итераций в серийном прогоне имитационной модели, а скорость модельных вычислений является ос-

новным показателем автоматизированной системы поддержки принятия решений даже в случае некоторого снижения точности прогноза.

Практическая реализация такого подхода связана с разработкой простых и универсальных алгоритмов имитационного моделирования, обеспечивающих высокое быстродействие процесса оценивания параметров модели. В данном случае, а также при наличии помех в сложных системах допустимо использование методов параметрической или даже структурной оптимизации. При параметрической оптимизации осуществляется подбор атрибутов модели, при структурной модель претерпевает структурные изменения.

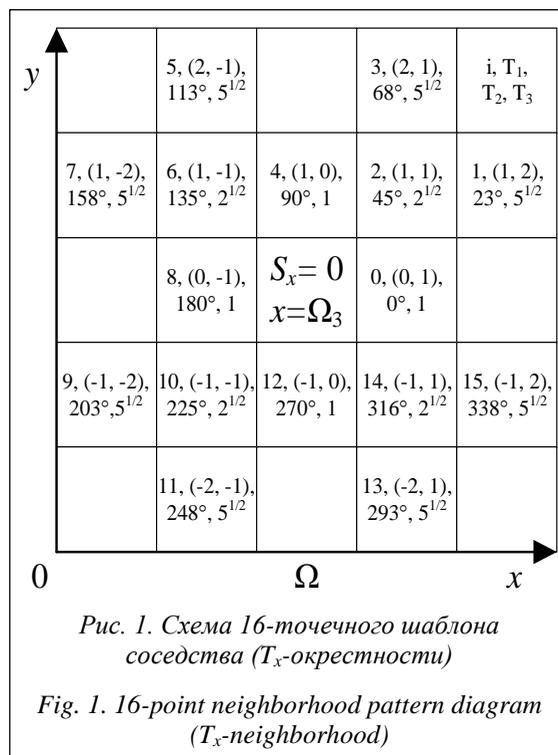
В статье [13] авторами представлен алгоритм стохастического фронтального клеточного автомата, реализующий механизм работы со списками, каждый из которых соотносится с направлением ветра. Численная диффузия [14] является причиной перехода от окрестности фон Неймана к гексагональному шаблону соседства, который на основе метода Монте-Карло позволил воспроизвести линии равных концентраций продолженного выброса пассивного АХОВ. Результаты имитационных экспериментов показали, что процедуры генерации случайных чисел в существенной мере обуславливают дополнительные временные затраты в процессах оценивания параметров модели и приводят к появлению шумов в результатах моделирования. Возникает задача поиска альтернативных модификаций фронтального алгоритма моделирования диффузии с учетом особенностей и преимуществ эмпирико-статистического подхода к построению клеточной модели для визуализации последствий аварийных выбросов.

### Выбор шаблона соседства

В рассматриваемом подходе для получения эффекта диффузии пассивного газа предлагается использовать компоненты расчетной схемы поиска кратчайшего пути. Ранее было отмечено, что к основным проблемам воспроизведения результатов моделирования приводят ошибки численной диффузии, искажающие результаты прогноза. Количество возможных направлений перехода в алгоритмах с одноранговыми шаблонами соседства существенно ограничено, что приводит к искажению результирующей формы облака, наблюдаемой в ходе имитационных экспериментов.

Для разрешения этой проблемы использованы результаты работы [15], в которой раскрыты особенности формирования статического поля расстояний  $S$  до ближайшего выхода (карты местности), позволившие учесть геометрию моделируемой области в клеточно-автоматной модели движения людей. Вид результирующего поля  $S$ , формируемого на основе графа видимости, в сильной мере зависит от конфигурации используемого шаблона. Показано, что эффект смягчения от ошибок численной диффузии может быть достигнут в расчетных схемах с 16-точечным шаблоном соседства, который составил основу представленного далее алгоритма моделирования диффузии вещества.

Ячейки 16-точечного шаблона соседства (рис. 1) расположены на разных расстояниях  $S_x$  от источника выброса: ячейки (1-го уровня, 1-го ранга) окрестности фон Неймана – на расстоянии  $S_x = 1$ ; ячейки (1-го уровня, 2-го ранга) окрестности Мура – на расстоянии  $S_x = 2^{1/2}$ ; для дополняющих ячеек (2-го уровня, 2-го ранга)  $S_x = 5^{1/2}$ . Дополняющие ячейки сформированы на основе правил построения графа видимости [13]. Вся область выброса представлена в виде множества  $\Omega$  равных по площади клеток поверхности квадратной формы, структура которого делится на четыре составляющие: внутренние клетки среды  $\Omega_1$ , клетки границ  $\Omega_2$ , клетки источника  $\Omega_3$ , клетки препятствий  $\Omega_4$ .



Центральная ячейка в схеме шаблона принадлежит множеству источников  $\Omega_3$  ( $S_x = 0$ ). В схеме шаблона (рис. 1) использованы следующие обозначения:  $i$  – порядковый номер клетки;  $T_{1,i}$  – смещение координат  $i$ -й клетки относительно источника  $\Omega_3$ ;  $T_{2,i}$  – угловое направление (в градусной мере) расположения  $i$ -й клетки;  $T_{3,i}$  – координатное расстояние (вес ребра)  $i$ -й клетки.

### Алгоритм моделирования

При разработке алгоритма применен эмпирико-статистический подход к задаче имитационного моделирования диффузии, основанный на модификации поля расстояний  $S_x$  с учетом углового направления ветрового массопереноса. Карта расстояний от источника загрязнения, формируемая на основе метеорологических данных о скорости и направлении ветра, составляет основу расчета ОЗЗ с использованием существующих алгоритмов преобразования поля  $S_x$  в поле концентраций  $Y_x$ . Для оценки верхних пределов концентраций АХОВ выбран алгоритм SUDC (The Simple Urban Dispersion correlation) [16] с функцией преобразования

$$Y_x = \frac{QK(S_x)^2}{U}, \quad (1)$$

где  $Q$  – интенсивность выброса;  $K$  – коэффициент плотности застройки;  $U$  – средняя скорость ветрового массопереноса.

Для учета изменений поля расстояний ( $T_{3,i}$ ) в зависимости от углового направления переноса  $x_c = T_{2,i}$  использована эмпирическая модифицирующая функция  $g^*$ , основанная на гипотезе о нормальности закона ветрового распределения (функции Гаусса):

$$g^* = k_1 \times \sigma^* \times (\sin(k_2 \times (x_c - m^* + \varphi)) + 1) + 1, \quad (2)$$

где  $m^*$  – математическое ожидание полярного угла оси выброса или основного направления ветра (град.);  $\sigma^*$  – среднеквадратическое отклонение (рад.), характеризующее устойчивость ветра и турбулентную диффузию АХОВ;  $k_1$  – коэффициент согласования;  $k_2 = \pi/180^\circ$  – коэффициент перевода в радианную меру;  $\varphi$  – начальная фаза.

График функции  $g^*$  приведен в описании алгоритма. Модель Гаусса предпочтительнее использовать в случае турбулентного характера выброса АХОВ, поскольку в ней игнорируются гравитационные эффекты рассеивания примеси.

Схема разработанного алгоритма (рис. 2) представлена следующими блоками: ввод ин-

формации, инициализация модели, синхронизация, разрешение расчета, расчет расстояния, преобразование и вывод информации. Детализируем схему обработки информации.

**1. Блок ввода.** Входные данные и параметры алгоритма:  $x_0, y_0$  – координаты источника,  $\Omega_4$  – множество адресов ячеек преград,  $sF$  – поле дисперсии ветра,  $mF$  – поле направлений ветра,  $Q$  – мощность выброса ( $\text{кг с}^{-1}$ ),  $K$  – безразмерный коэффициент плотности застройки,  $U$  – средняя скорость ветра ( $\text{м с}^{-1}$ ),  $T_i$  – окрестность 16-точечного шаблона, соответствующая расположению  $i$ -й клетки (рис. 1).

**2. Блок инициализации модели.** По заданным ранее координатам источника выброса  $x = (y_0, x_0)$  в массив расстояний  $S_{new}$  заносится начальное значение, соответствующее минимальному расстоянию в шаблоне соседства (рис. 1). На основе окрестности фон Неймана вокруг ячейки источника (с адресом  $x$ ) формируется множество адресов  $\Omega_{new,5}$ , разрешенных для обработки опорных клеток, для которых будет произведен расчет поля расстояний. Индикатор  $new$  учитывает общую последовательность алгоритмических вычислений.

**3. Блок синхронизации.** Индикатор  $prev$  характеризует результаты, полученные на предыдущем шаге вычислений ( $\Omega_{prev,5} := \Omega_{new,5}$ ;  $\Omega_{new,5} := \emptyset$ ). Введен запрет на обработку адреса источника  $(y_0, x_0) \notin \Omega_{prev,5}$  с минимальным на поле  $S_x$  координатным расстоянием, поскольку в  $T_x$ -окрестности отсутствуют опорные для его расчета клетки.

**4. Блок разрешения.** Если новое расчетное значение  $S_{prev,x} > S_{new,x}$ , то запускается процедура отбора адресов клеток  $\Omega_{prev,5}$ , которые будут обработаны на следующем шаге ( $step + 1$ ). Процедура отбора позволила устранить артефакты разрыва поля, связанные с расчетом граничных значений концентрации. В идеале при встречных атмосферных потоках результирующая концентрация загрязнителя должна суммироваться, однако в рассматриваемом случае для устранения разрыва поля использовано значение максимальной концентрации вещества.

Основные правила процедуры отбора опорной клетки (с адресом  $xn$ ): отсутствие преграды ( $xn \notin \Omega_4$ ); выполнение условия  $S_{prev,xn} > S_{prev,x}$ , иначе нарушается требование минимального расстояния до источника и величина  $S_{new,x}$  далее не будет рассчитана; если адрес клетки еще не обработан (выполнено условие  $S_{prev,xn} = 0$ ) и клетка принадлежит окрестности фон Неймана ( $i \bmod 4 = 0$ ), то она подлежит отбору. Окрест-

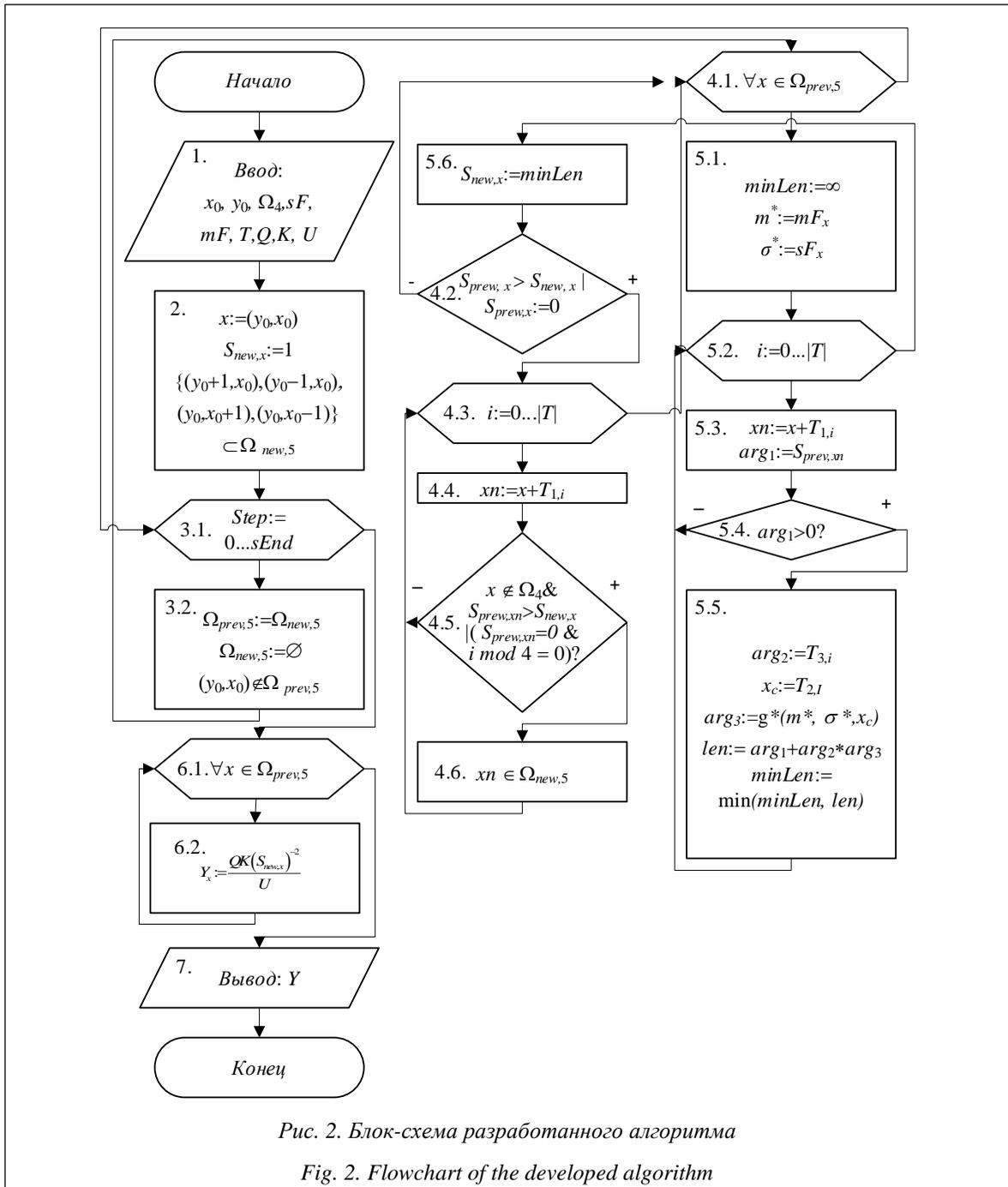


Рис. 2. Блок-схема разработанного алгоритма

Fig. 2. Flowchart of the developed algorithm

ность фон Неймана устраняет алгоритмическую неопределенность (при наличии преград и т.п.) и ограничивает множество опорных клеток, разрешенных для обработки в блоке расчета расстояний.

**5. Блок расчета расстояния.** Для каждой ячейки  $T_x$ -окрестности, образованной вокруг опорной клетки, рассчитывается расстояние  $len$  до источника выброса. Из множества окрестных выбирается ячейка с минимальным расстоянием до источника  $minLen := \min (minLen,$

$len)$ , которое ставится в соответствие заданной опорной точке. Процедура применима только для клеток с разрешенными адресами ( $\Omega_{prev, 5}$ ). Для расчета расстояния  $len$  использовано соотношение

$$len = arg_1 + arg_2 * arg_3, \tag{3}$$

в котором первая составляющая  $arg_1$  учитывает отклонение  $S_{prev, xn}$  координат  $xn$ -й опорной клетки от координат источника выброса ( $arg_1 = S_{prev, xn}$ ). При выполнении условия  $arg_1 > 0$  анализируется  $T_x$ -окрестность опорной клетки.

Рассчитывается расстояние  $arg_2 = T_{3,i}$  каждой  $i$ -й ячейки окрестности и определяется угловое направление  $x_c = T_{2,i}$  ее расположения в схеме шаблона (рис. 1). На основе графика модифицирующей функции  $g^*(x_c)$ , соответствующего заданному набору значений  $(m^*, \sigma^*)$ , по фиксированному угловому направлению  $x_c$  формируется величина корректирующего коэффициента  $arg_3$ , используемая для расчета расстояния  $len$  в соотношении (3). В направлении  $x_c = m^*$  поле расстояний искажается только на величину  $\Delta = k_1 \times \sigma^* + 1$ .

Семейство кривых искажения  $g^*(x_c)$  поля расстояний  $S_x$  (при  $k_1 = 1, \varphi = 90$ ) представлено на рисунке 3. Каждой кривой соответствует набор значений  $(m^*$  (град.),  $\sigma^*$  (рад.)), отображенный в легенде диаграммы.

Таким образом, корректирующий коэффициент  $arg_3$  является основным компонентом симуляции турбулентной диффузии выброса и учитывает искажение поля расстояний в зависимости от углового направления  $x_c$ . Для всех разрешенных опорных клеток по соотношению (3) рассчитывается массив минимальных значений  $minLen$  и формируется промежуточная карта расстояний. Пример карты расстояний  $S_{new}$ , полученный для набора значений  $(m^* = 45^\circ; \sigma^* = 1,0$  рад.), приведен на рисунке 4. На рисунке 5 представлены диаграммы расстояний  $S_{new}$  вблизи источника в ортогональном к выбросу направлении.

Необходимо указать на некоторые недостатки алгоритма по отношению к ранее разработанным решениям. В частности, из рисунка 5 следует, что профиль величин, поперечных ос-

новному направлению выброса вблизи источника, не описывает сигмоиду, а является линейно убывающим. Графики, построенные по результатам эксперимента, демонстрируют определенное подобие реальной картине продолженного выброса АХОВ, но вопрос является открытым и его разрешение требует дополнительных исследований.

**6. Блок преобразования.** Сформированная карта расстояний  $S_{new}$  преобразуется в поле концентраций  $Y_x$  для дальнейшей визуализации ОЗЗ и интерпретации оперативной ситуации. Для реализации процедуры целесообразно использовать стандартные алгоритмы преобразования, которые не учитывают данные метеорологической обстановки. Как было отмечено ранее, для расчета концентраций АХОВ применен алгоритм SUDC.

**7. Блок вывода.** После получения результирующих данных о размере и границах ОЗЗ пользователь может проанализировать отклонения фактических и прогнозных значений концентраций АХОВ в местах наблюдений и оценить возможности дальнейшей параметрической настройки модели по данным мониторинга. Сканирование значений параметров, отличных от  $m^*$  и  $\sigma^*$ , не потребует обязательного перезапуска имитационной модели.

При расчете значений  $sF$  и  $mF$  использованы данные распределения поля ветра, полученные из блока метеорологической модели. Эта модель является упрощенной, поскольку в ней не учитываются многие существенные параметры окружающей среды (температура, давление, влажность и т.д.). Поэтому практиче-

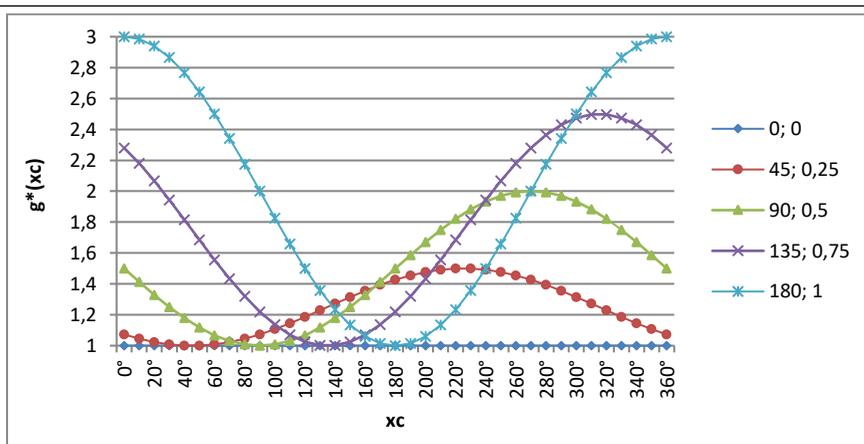


Рис. 3. Семейство кривых искажения  $g^*(x_c)$  поля расстояний в  $T_x$ -окрестности опорной клетки для заданного набора значений  $(m^*, \sigma^*)$

Fig. 3. Family of distortion curves  $g^*(x_c)$  of the distance field in the  $T_x$  neighborhood of the reference cell for a given set of values  $(m^*, \sigma^*)$

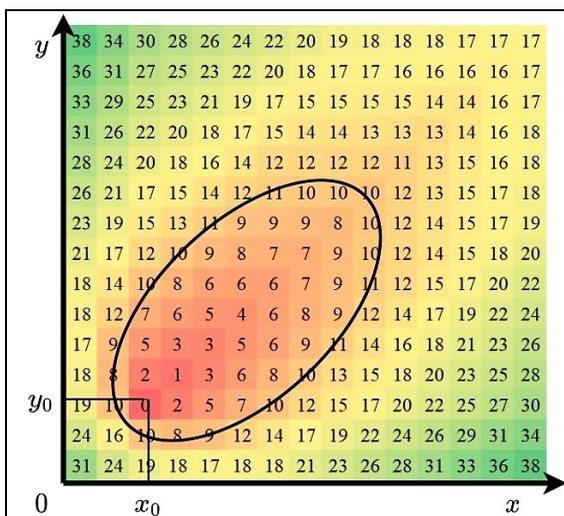


Рис. 4. Поле расстояний  $S_{new}$  для случая ( $m^* = 45^\circ$  и  $\sigma^* = 1,0$  рад.)

Fig. 4.  $S_{new}$  distance field for case ( $m^* = 45^\circ$  and  $\sigma^* = 1,0$  rad)

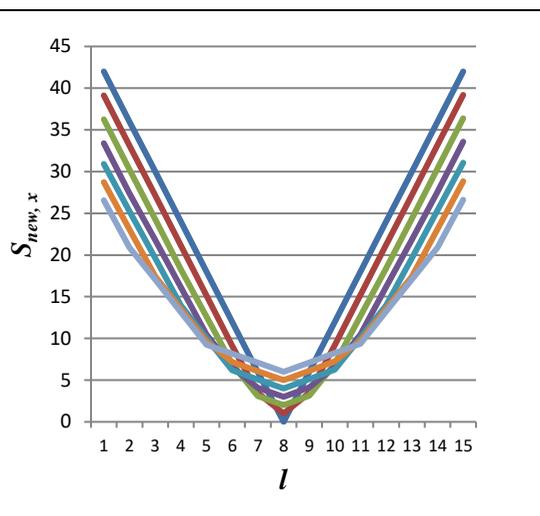


Рис. 5. Диаграммы ортогональных расстояний  $S_{new,x}$ ;  $l$  – удаление от оси выброса (в секторах)

Fig. 5.  $S_{new}$  orthogonal distance diagrams;  $l$  – distance from the emission axis (sectors)

ская реализация разработанного алгоритма обладает рядом ограничений и допущений, а результирующие данные имеют приблизительный характер. Вместе с тем на этапе оперативного реагирования такие данные могут быть полезными при первичной оценке обстановки и планировании мероприятий в условиях дефицита времени и отсутствия достоверной информации.

Особенности расчета значений  $sF$  и  $mF$ : для решения аэродинамических уравнений применен метод последовательной релаксации, обеспечивший высокую скорость сходимости итерационных процедур; для имитационного моделирования процессов адвекции использован полулагранжевый метод решения, позволивший уменьшить численную диффузию и повысить точность результатов. В качестве основного поставщика картографической информации выбрана ГИС OpenStreetMap (OSM), которая предоставляет пользователю бесплатный доступ к актуальным и хорошо масштабируемым цифровым картам местности. Функционал системы обеспечивает возможность эффективного обмена данными с потребителями услуг на основе упрощенного взаимодействия со сторонними приложениями посредством открытых стандартов и API.

### Результаты и обсуждение

На рисунке 6 отображен пример визуализации ОЗЗ, иллюстрирующий результаты контрольного испытания алгоритма. Для примера

использованы данные и схема карты местности с контурами зданий, соответствующие описанию эксперимента. Схема карты местности является условной и приведена с демонстрационной целью.

Для проведения имитационных экспериментов использован программный макет АСППР [2], в состав которого включен дополнительный функциональный модуль анализа и визуализации данных, реализованный на языке программирования С++ с использованием библиотек boost. Модуль представлен двумя компонен-

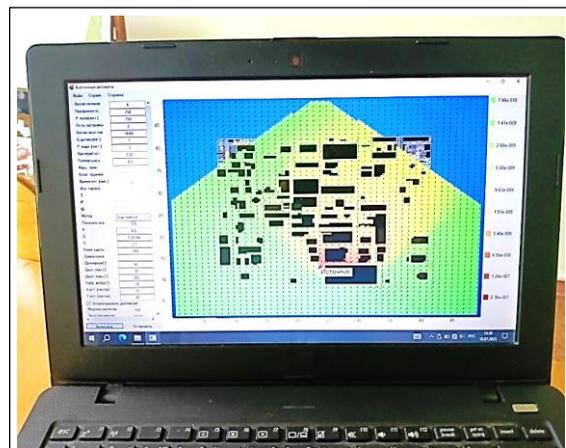


Рис. 6. Пример компьютерной визуализации ОЗЗ на основе предлагаемого подхода

Fig. 6. An example of the computer-aided serious pollution zone visualization based on the proposed approach

тами: блоком фронтального моделирования с программной реализацией разработанного алгоритма и менеджером экспериментов, обеспечивающим решение задач управления потоками и обработки промежуточных данных.

Ранее отмечено, что для разработки алгоритма применен эмпирико-статистический подход к моделированию последствий выброса пассивных АХОВ при локальном масштабе аварии. Переход к расчетам, основанным на модификации поля расстояний  $S_x$  в зависимости от характеристик ( $m^*$ ,  $\sigma^*$ ) углового распределения поля ветра, обуславливает возможность использования детерминированных алгоритмов поиска информации в процедурах параметрического оценивания имитационной модели. Результирующие данные формируются в зависимости от задач исследования: определение границ ОЗЗ, в которой зафиксировано превышение критического уровня концентрации АХОВ; расчет концентрации токсического вещества в заданной пользователем области аварийного выброса. Сокращение процедур, имитирующих полет частицы, привело к снижению временных затрат на поиск опорного решения и обеспечило представленную на рисунке 7 линейную зависимость времени вычислений от размера области моделирования. Обработка результатов производилась на мобильном процессоре Intel(R) Core i5 – 6200U CPU @ 2.30GHz (два ядра, четыре логических процессора).

Для ускорения процедур поиска опорного решения, а также пространственного моделирования последствий выброса целесообразно использовать возможности графического процессора и алгоритмы параллельных вычислений. При этом разрешается проблема разделения расчетного поля  $\Omega$  на отдельные потоки. Полный доступ к разделяемой среде таким потокам не предоставляется: каждый поток вносит изменения только в независимые ячейки поля расстояний  $S_x$  в соответствии с правилами

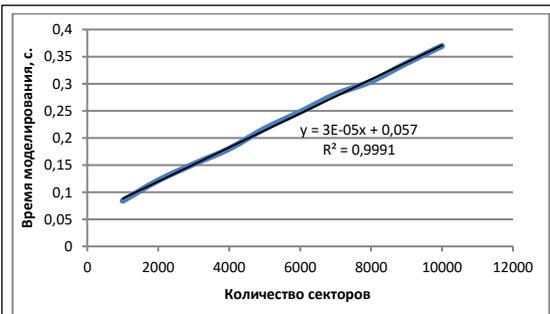


Рис. 7. Диаграмма зависимости времени вычислений от размера области моделирования

Fig. 7. Diagram of calculation time depending on modeling area size

формирования шаблона  $T_x$ -окрестности назначенной для него опорной клетки; потоки могут считывать данные из окрестных ячеек соседних потоков. Эти данные всегда актуальны, поскольку алгоритм принадлежит к классу синхронных клеточных автоматов.

### Заключение

Подход к расчету концентраций АХОВ на основе модификации поля расстояний демонстрирует возможности использования алгоритма фронтального моделирования в контуре параметрической настройки модели по данным мониторинга. Алгоритм обеспечил высокую скорость сходимости итерационных процедур. Результирующие данные алгоритма могут быть полезными при первичной оценке обстановки в условиях дефицита времени и априорной неопределенности информации. Определены проблемы, требующие дальнейшего решения. Приведенные в статье результаты исследований могут быть практически использованы в качестве дополнения к стандартным методикам и сертифицированным программным средствам.

### Список литературы

1. Асадов Х.Г., Маммадли Р.Ш. Метод условной пространственной интерполяции для обнаружения минимально загрязненных зон при точечных аэрозольных выбросах в городскую атмосферу // Радиопромышленность. 2020. Т. 30. № 3. С. 57–66. doi: 10.21778/2413-9599-2020-30-3-57-66.
2. Чернышев Л.О., Матвеев Ю.Н. Автоматизированная система поддержки принятия решений для прогнозирования процессов рассеивания химически опасных веществ // Программные продукты и системы. 2021. Т. 34. № 2. С. 307–315. doi: 10.15827/0236-235X.134.307-315.
3. Shan S., Yan Q. Emergency Response Decision Support System. Singapore, Springer Publ., 2017, 82 p.
4. Панарин В.М., Маслова А.А., Савинкова С.А. Автоматизированный мониторинг загрязнения атмосферного воздуха промышленно развитых территорий. Тула: изд-во ТулГУ, 2021. 219 с.
5. Kadaverugu R., Sharma A., Matli Ch., Biniwale R. High resolution urban air quality modeling by coupling CFD and mesoscale models: A review. Asia-Pacific J. Atmos. Sci., 2019, vol. 55, pp. 539–556. doi: 10.1007/s13143-019-00110-3.

6. Мензелинцева Н.В., Богомолов С.А., Дьякова С.Б., Проценко О.В., Богдалова О.В. Математические модели рассеивания вредных веществ в атмосфере // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности: мат. VI Всерос. конф. 2019. С. 268–270.
7. Сысоева Е.В., Гельманова М.О. Методы расчета рассеивания загрязняющих веществ в городской атмосфере // Вестн. МГСУ. 2022. Т. 17. № 8. С. 1027–1045. doi: 10.22227/1997-0935.2022.8.1027-1045.
8. Wu Z., Liu N., Li G., Liu X., Wang Y., Zhang L. Learning adaptive probabilistic models for uncertainty-aware air pollution prediction. *IEEE Access*, 2023, vol. 11, pp. 24971–24985. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3247956.
9. Олишевский А.Т., Московская И.В., Попко Р.Е. Обзор методических подходов к моделированию загрязнения атмосферы промышленными объектами на примере США, стран ЕС и России // Новые научные исследования: сб. ст. VI Междунар. науч.-практич. конф. 2021. С. 46–51.
10. Седнев В.А., Немцов В.М. Научно-методический подход обеспечения защиты окружающей среды при аварии на химически опасном объекте // Экологический императив технологического развития России: мат. Междунар. науч.-практич. конф. 2019. С. 155–160.
11. Lotrecchiano N., Sofia D., Giuliano A., Barletta D., Poletto M. Spatial interpolation techniques for innovative air quality monitoring systems. *CEt*, 2021, vol. 86, pp. 391–396.
12. Beck Y., Ljubić I., Schmidt M. A survey on bilevel optimization under uncertainty. *EJOR*, 2023, vol. 311, no. 2, pp. 401–426. doi: 10.1016/j.ejor.2023.01.008.
13. Чернышев Л.О., Матвеев Ю.Н. Алгоритм фронтального моделирования в системе анализа и визуализации последствий аварийных выбросов // Вестн. ТвГТУ. Сер.: Технич. науки. 2022. № 3. С. 81–91. doi: 10.46573/2658-5030-2022-3-81-91.
14. Michalcová V., Kotrasová K. The numerical diffusion effect on the CFD simulation accuracy of velocity and temperature field for the application of sustainable architecture methodology. *Sustainability*, 2020, vol. 12, no. 23, art. 10173. doi: 10.3390/su122310173.
15. Kirik E., Vitova T., Malyshev A. Turns of different angles and discrete-continuous pedestrian dynamics model. *Natural Computing*, 2019, vol. 18, pp. 875–884. doi: 10.1007/s11047-019-09764-4.
16. Matthews J.C., Wright M.D., Martin D. et al. Urban tracer dispersion and infiltration into buildings over a 2-km scale. *Boundary-Layer Meteorology*, 2020, vol. 175, pp. 113–134. doi: 10.1007/s10546-019-00498-5.

Software &amp; Systems

doi: 10.15827/0236-235X.142.095-104

2024, 37(1), pp. 95–104

### Modifying the algorithm for frontal modeling of accidental release consequences based on the empirical and statistical approach

Leonid O. Chernyshev <sup>1</sup>✉, Yury N. Matveev <sup>1</sup><sup>1</sup> Tver State Technical University, Tver, 170026, Russian Federation

#### For citation

Chernyshev, L.O., Matveev, Yu.N. (2024) 'Modifying the algorithm for frontal modeling of accidental release consequences based on the empirical and statistical approach', *Software & Systems*, 37(1), pp. 95–104 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.142.095-104

#### Article info

Received: 21.07.2023

After revision: 11.09.2023

Accepted: 25.09.2023

**Abstract.** The paper examines an empirical-statistical approach to constructing a cellular model for visualizing the consequences of toxic substances being released into the atmosphere in case of a local accident. It is shown that under conditions of a priori uncertainty of input data, the computing core of the supervisory system, which reproduces accidental release consequences, should implement a two-loop information processing scheme. The effectiveness of parametric estimation of a model in the outer loop of such scheme largely depends on the speed and accuracy of model computations implemented by algorithms in the inner loop of modeling and visualizing release consequences. The paper analyzes features of parametric estimation procedures under conditions of information deficit for a continued release of toxic substances. It forms requirements for an alternative modification of the modeling algorithm taking into account the advantages of the empirical-statistical approach. There is a brief description of the developed algorithm: the choice of a sixteen-point modeling template is substantiated; the features of an empirical function modifying a field of distances depending on the angular direction of wind mass transfer are considered; a detailed algorithm block diagram and the main relations forming the distance map calculation basis with the subsequent assessment of the upper limits of pollutant concentration are disclosed. The paper identifies the advantages and disadvantages of the practical implementation of the algorithm. There are results of testing the algorithm while processing actual experimental data on a conditional model of a terrain map. The proposed approach will increase the performance of the frontal modeling algorithm and reduce the time spent on searching for a reference solution in a two-loop information processing scheme. The paper materials can be used to improve the functionality of supervisory decision support systems in eliminating the consequences of accidental releases.

**Keywords:** accidental release, operational response, frontal modeling, empirical-statistical approach, distance field, visualization

## References

1. Asadov, Kh.G., Mammadli, R.Sh. (2020) 'Conditional spatial interpolation method for detecting minimally polluted areas with selective aerosol emissions to the city atmosphere', *Radio Industry*, 30(3), pp. 57–66 (in Russ.). doi: 10.21778/2413-9599-2020-30-3-57-66.
2. Chernyshev, L.O., Matveev, Yu.N. (2021) 'Automated decision support system for predicting the dispersion of chemically dangerous substances', *Software & Systems*, 34(2), pp. 307–315 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.134.307-315.
3. Shan, S., Yan, Q. (2017) *Emergency Response Decision Support System*. Singapore: Springer Publ., 82 p.
4. Panarin, V.M., Maslova, A.A., Savinkova, S.A. (2021) *Automated Monitoring of Air Pollution in Industrially Developed Territories*. Tula, 219 p. (in Russ.).
5. Kadaverugu, R., Sharma, A., Matli, Ch., Biniwale, R. (2019) 'High resolution urban air quality modeling by coupling CFD and mesoscale models: A review', *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 55, pp. 539–556. doi: 10.1007/s13143-019-00110-3.
6. Menzelintseva, N.V., Bogomolov, S.A., Dyakova, S.B., Protsenko, O.V., Bogdalova, O.V. (2019) 'Mathematical models of pollutant dispersion in the atmosphere', *Proc. 6th All-Russ. Conf. Current Issues of Construction, Housing and Communal Services, and Technospheric Safety*, pp. 268–270 (in Russ.).
7. Sysoeva, E.V., Gelmanova, M.O. (2022) 'Methods for calculating the pollutants dispersion in the urban atmosphere', *Vestn. MGSU*, 17(8), pp. 1027–1045 (in Russ.). doi: 10.22227/1997-0935.2022.8.1027-1045.
8. Wu, Z., Liu, N., Li, G., Liu, X., Wang, Y., Zhang, L. (2023) 'Learning adaptive probabilistic models for uncertainty-aware air pollution prediction', *IEEE Access*, 11, pp. 24971–24985. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3247956.
9. Olishvskiy, A.T., Moskovaya, I.V., Popko, R.E. (2021) 'Review of methodological approaches to simulation of atmospheric pollution by industrial facilities on the example of the USA, EU countries and Russia', *Proc. VI Int. Sci.-Pract. Conf. New Sci. Research*, pp. 46–51 (in Russ.).
10. Sednev, V.A., Nemtsov, V.M. (2019) 'Scientific and methodological approach to ensuring environmental protection in case of an accident at a chemically hazardous facility', *Proc. Int. Sci.-Pract. Conf. Ecological imperative of technological development of Russia*, pp. 155–160 (in Russ.).
11. Lotrecchiano, N., Sofia, D., Giuliano, A., Barletta, D., Poletto, M. (2021) 'Spatial interpolation techniques for innovative air quality monitoring systems', *CET*, 86, pp. 391–396.
12. Beck, Y., Ljubić, I., Schmidt, M. (2023) 'A survey on bilevel optimization under uncertainty', *EJOR*, 311(2), pp. 401–426. doi: 10.1016/j.ejor.2023.01.008.
13. Chernyshev, L.O., Matveev, Yu.N. (2022) 'Algorithm for frontal simulation in emergency release analysis and visualization system', *Bull. of TvSTU. Ser. Tech. Sci.*, (3), pp. 81–91 (in Russ.). doi: 10.46573/2658-5030-2022-3-81-91.
14. Michalcová, V., Kotrasová, K. (2020) 'The numerical diffusion effect on the CFD simulation accuracy of velocity and temperature field for the application of sustainable architecture methodology', *Sustainability*, 12(23), art. 10173. doi: 10.3390/su122310173.
15. Kirik, E., Vitova, T., Malyshev, A. (2019) 'Turns of different angles and discrete-continuous pedestrian dynamics model', *Natural Computing*, 18, pp. 875–884. doi: 10.1007/s11047-019-09764-4.
16. Matthews, J.C., Wright, M.D., Martin, D. et al. (2020) 'Urban tracer dispersion and infiltration into buildings over a 2-km scale', *Boundary-Layer Meteorology*, 175, pp. 113–134. doi: 10.1007/s10546-019-00498-5.

## Авторы

**Чернышев Леонид Олегович**<sup>1</sup>,  
аспирант, ассистент кафедры, plumber63@mail.ru  
**Матвеев Юрий Николаевич**<sup>1</sup>, д.т.н.,  
профессор, matveev4700@mail.ru

## Authors

**Leonid O. Chernyshev**<sup>1</sup>, Postgraduate Student,  
Teaching Assistant, plumber63@mail.ru  
**Yury N. Matveev**<sup>1</sup>, Dr.Sc. (Engineering),  
Professor, matveev4700@mail.ru

<sup>1</sup> Тверской государственный технический университет, г. Тверь, 170026, Россия

<sup>1</sup> Tver State Technical University, Tver, 170026, Russian Federation