

АЛГОРИТМ ФРОНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СИСТЕМЕ АНАЛИЗА И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ

Ю.Н. МАТВЕЕВ, д-р техн. наук, Л.О. ЧЕРНЫШЕВ, аспирант

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: plumber63@mail.ru

© Матвеев Ю.Н., Чернышев Л.О., 2022

Рассмотрен фронтальный подход к построению клеточной модели для оперативного реагирования на локальные выбросы аварийно-опасных химических веществ в атмосферу. Кратко описан алгоритм фронтального моделирования на основе гексагонального шаблона двумерной сетки и предложены решения по обеспечению стабильности результата прогноза. В целевой функции поиска решения применена максиминная свертка частных критериев. Рассмотрены примеры оценки параметров модели на основе решений уравнения Гаусса, а также данных полевых наблюдений. Приведены графики временных затрат на поиск решения при изменении уровня детализации зоны загрязнения.

Ключевые слова: оперативное реагирование, ассимиляция данных, фронтальный алгоритм, клеточная модель, быстроедействие.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-3-81-91

ВВЕДЕНИЕ

Современные подходы [1] к обоснованию мероприятий при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций связаны с разработкой автоматизированных систем принятия решений, предоставляющих оператору супервизорные оценки масштаба и степени заражения местности при выбросах вредных веществ. В функционале таких систем должна быть предусмотрена возможность корректировки параметров прогнозной модели по данным оперативного мониторинга состояния прилегающей территории, основанная на «усвоении» или ассимиляции результатов полевых наблюдений.

Процедура определения параметров модели, при которых достигается минимальное координатное отклонение от воспроизводимой изолинии до точки замера концентрации, связана с обработкой результатов целой серии имитационных экспериментов и способна привести к существенным временным затратам на формирование оценочных данных о размерах зоны поражения, а также снизить эффективность оперативного реагирования. В связи с этим весьма актуальна задача повышения скорости модельных вычислений в системе визуализации и анализа последствий выбросов с возможностью ассимиляции фактических данных химического заражения местности.

К основным способам увеличения быстрогодействия автоматизированных систем принятия решений следует отнести внедрение скоростных алгоритмов моделирования области выброса в вычислительное ядро системы, а также разделение моделируемой среды на потоки с обеспечением параллельных вычислений в схеме обработки информации.

В работе [2] кратко описаны свойства наиболее известных классов моделей распространения примесей при ограниченном масштабе загрязнения. Показано, что аналитические модели Гаусса не учитывают эффекты взаимодействия выброса с препятствиями. Вычислительные модели гидроаэродинамики (CFD-модели) требуют привлечения значительных вычислительных ресурсов, что может существенно снизить быстродействие автоматизированных систем принятия решений. Авторами предложена эффективная модель распространения примеси, основанная на клеточно-автоматном подходе [3] к симуляции полета частиц с учетом правил обхода препятствий.

Клеточная модель демонстрирует устойчивые результаты при ограниченном количестве результирующих секторов, формирующих санитарную защитную зону. Поскольку повышение уровня детализации зоны загрязнения приводило к существенному росту затрат процессорного времени на обработку информации в условиях сложной конфигурации преград, в схеме обработки данных наблюдений [4] были использованы алгоритмы «грубого» приближения к опорному решению.

Глобальные алгоритмы поиска [5] диктуют жесткие требования к скорости модельных вычислений, выполнение которых сложно обеспечить при значительных затратах вычислительных ресурсов ЭВМ на симуляцию «блуждания» частиц по карте с контурами препятствий (особенно в случае большого разброса параметров модели). Анализ эмпирических допущений показал, что проблема быстродействия клеточной модели может быть разрешена при фронтальном описании облака выброса. В модифицированном подходе зона загрязнения на цифровой карте местности представлена фронтом концентрации примеси, который в ходе выброса достигает и охватывает преграды, с сохранением условий, формирующих эллипс рассеивания, а также гипотезы о нормальности закона распределения, задающего угловое направление фронтального расширения. Фронтальный подход позволил в значительной степени ускорить модельные вычисления и снизить затраты процессорного времени при расчете зоны загрязнения в случае сложной конфигурации преград. Основными недостатками фронтального подхода являются некоторое снижение стабильности результатов моделирования и ограничение возможности симуляции пристеночного ветра.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Описание фронтального алгоритма. Для воспроизведения фронта облака на основе прямого перебора всех ячеек двумерной расчетной сетки необходимы значительные вычислительные мощности, поэтому авторами предложен альтернативный способ вычислений, основанный на последовательной обработке множества возможных направлений перехода частиц или списков направлений. Область выброса представлена множеством Ω квадратных клеток поверхности, структура которого охватывает внутренние клетки среды, а также клетки источника, границ и препятствий. Каждая клетка характеризуется парой $(u, x) \in A \times M$, где $u \in A = \{0, 1\}$ – булев индикатор присутствия примеси; $x \in X$ – индекс имени, задающий место расположения клетки на множестве имен $X = \{(i, j): i, j = 1, \dots, N\}$. Множеству ячеек Ω ставится в соответствие массив состояния клеток $U = \{u(i, j): i, j = 1, \dots, N\}$, состоящий из пустых U_1 и заполненных клеток U_2 : $U = U_1 \cup U_2$.

Центральная клетка с окрестностью фон Неймана имеет шаблон соседства $T(i, j) = \{(i, j), (i, j + 1), (i + 1, j), (i, j - 1), (i - 1, j)\}$ с локальной конфигурацией $S(i, j) = \{u_0(i, j), u_1(i, j + 1), u_2(i + 1, j), u_3(i, j - 1), u_4(i - 1, j)\}$, которая охватывает окрестность из пяти ячеек и формирует четыре направления углового перехода частицы для каждого имени $x \in M$.

Таким образом, мощность nm множества $PL = \{p_1, p_2, \dots, p_{nm}\}$ направлений перехода зависит от количества ячеек, взаимодействующих в шаблоне соседства центральной клетки. Для формирования списка направлений $P = (X, r)$ использован «указатель» r , характеризующий угловое направление перехода: $r = k/nm$, где k – индекс перехода.

Фронтальный алгоритм основан на клеточно-автоматном подходе, поэтому величина nm зависит от шаблона соседства центральной ячейки [6, 7]. Например, окрестности фон Неймана соответствует число $nm = 4$, окрестности Мура $nm = 8$. Анализ показал, что при малых величинах дисперсии рассеивания фронтальные алгоритмы на основе окрестности фон Неймана приводят к искажению формы облака. В алгоритмах с окрестностью Мура необходимо разрешить проблему неравных расстояний в шаблоне соседства. Поэтому в дальнейших расчетах использован гексагональный шаблон двумерной сетки с числом $nm = 6$ и угловым интервалом $\Delta\varphi = 60^\circ$ (рис. 1).

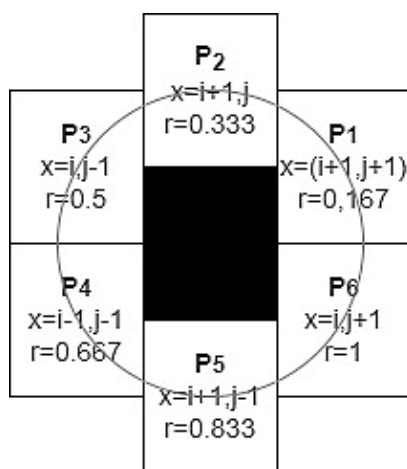


Рис. 1. Списки направлений PL в гексагональном шаблоне ($nm = 6$)

Рассмотрим обобщенную схему работы фронтального алгоритма (рис. 2):

1. Формирование списка направлений (переходов). Для построения исходного списка PS использовано расчетное соотношение

$$PS = \{(X, r) \in PL \mid r = \frac{\lfloor \text{normDistrVal} * nm \rfloor + 1}{nm}\}, \quad (1)$$

где normDistrVal – случайное число нормального закона распределения, задающее угловое направление перехода.

2. Выбор элемента списка. Процедура поиска индекса (ссылки) заполняемой ячейки в массиве элементов списка реализована на основе генератора случайных чисел, равномерно распределенных в единичном интервале.

3. Заполнение ячейки. Изменение состояния (переход) результирующей ячейки с последующим расширением области выброса.

4. Расширение и корректировка списка направлений. После заполнения ячейки в списки по направлениям гексагонального шаблона добавляются новые ссылки на соседние ячейки. Исключение составляют ячейки окрестности, которые были заполнены ранее или соответствуют преградам.

Поскольку функционирование алгоритма невозможно без регулярной «очистки» списка направлений от ссылок на заполненные ячейки, в схеме обработки реализован

функционал счетчика «подряд сделанных промахов». При обнаружении двух и более промахов алгоритма в схеме обработки предусмотрен вызов процедур поиска и удаления таких ссылок из массива элементов списка. Для повышения стабильности результатов фронтального моделирования могут быть использованы следующие решения:

увеличение размерности серии экспериментов, составляющих одну глобальную итерацию;

представление результатов моделирования в виде «семейства» изолиний, основанного на обработке ограниченного массива расчетных ячеек (число ячеек, формирующих каждую изолинию концентрации, зависит от выраженной в секторах площади опасной зоны загрязнения);

повышение уровня детализации (разрешения) карты и, следовательно, увеличение количества ячеек в облаке.

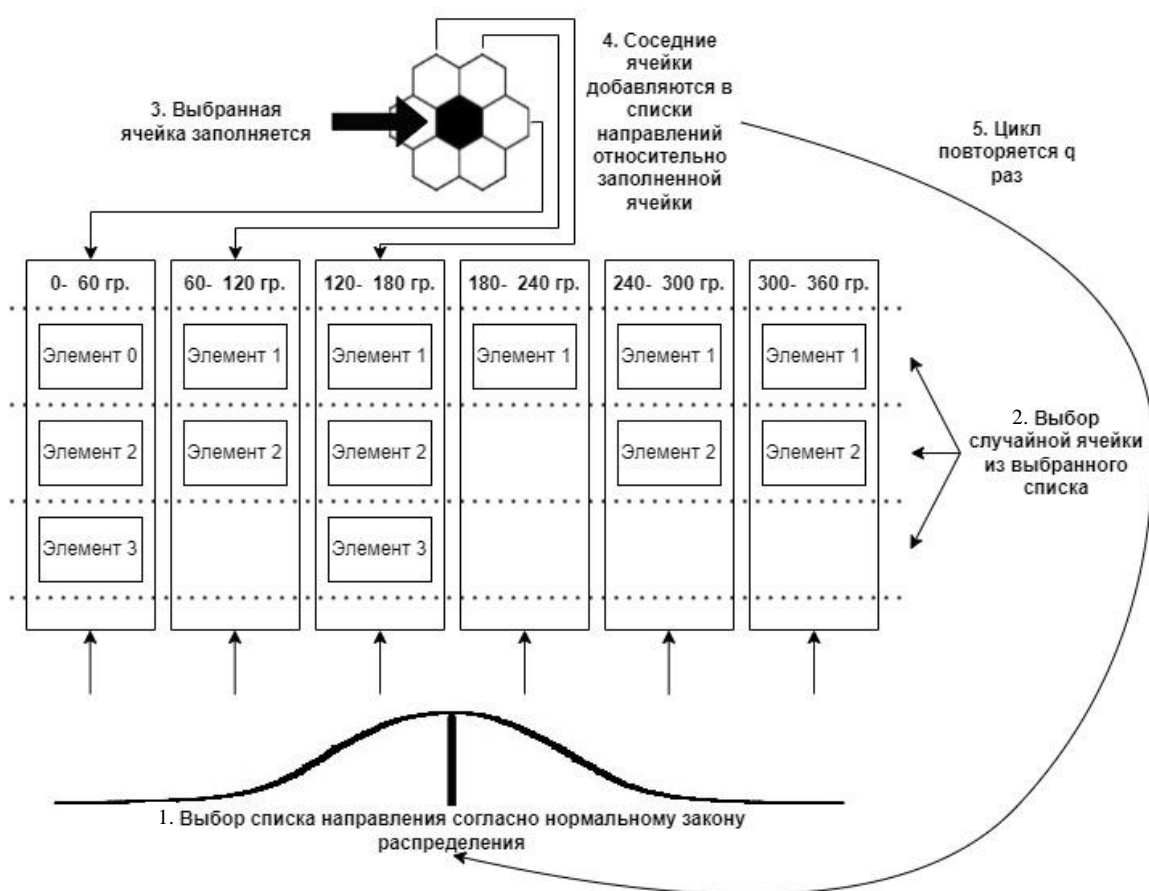


Рис. 2. Обобщенная схема фронтального алгоритма

На рис. 3 приведены примеры воспроизведения изолиний концентрации с использованием разработанного алгоритма. Результаты моделирования демонстрируют работоспособность алгоритма при больших разбросах углового направления перехода частиц.

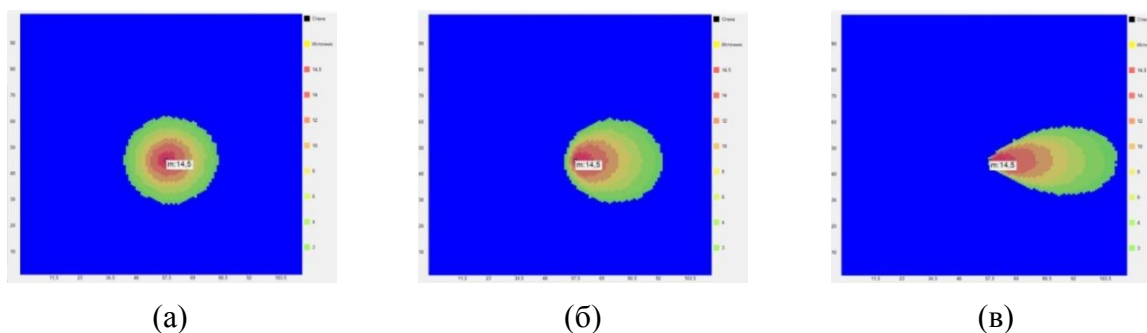


Рис. 3. Результаты фронтального моделирования выброса, где σ^* – стандартное отклонение при нормальном распределении частиц по угловым направлениям перехода (для 1 000 прогонов модели): $\sigma^* = 130^\circ$ (а); $\sigma^* = 60^\circ$ (б); $\sigma^* = 30^\circ$ (в)

Расчет изолинии основан на последовательной обработке специального массива значений, формируемого для каждого уровня концентрации. На этапе инициализации модели начальные индексы (или адреса элементов) во всех массивах совпадают. На этапе формирования эллипса рассеивания, после генерации и обработки переходов n^* частиц примеси, из массива значений, соответствующего некоторому значению c^* концентрации примеси, исключаются элементы с меньшим уровнем концентрации ($c < c^*$). Результирующий массив характеризует границу зоны опасного загрязнения, воспроизводимую в виде изолинии концентрации c^* .

Алгоритм поиска решения. Разработка фронтального алгоритма обусловила переход к глобальным алгоритмам упорядоченного поиска опорного решения в схеме ассимиляции наблюдений. Рассмотрим один из эффективных методов случайного поиска оптимального решения для большого класса задач [9] – алгоритм поиска на основе модификации метода отжига Adaptive Simulated Annealing [8]. Реализация алгоритма характеризуется малым объемом сопутствующих вычислений, что обеспечивает возможность поиска решения, близкого к глобальному, даже в случае дефицита вычислительных ресурсов.

Схема обработки данных, детально описанная в предыдущей публикации авторов [2], содержит алгоритм волновой трассировки, учитывающий эффекты взаимодействия с препятствиями. В целевую функцию поиска решения включены штрафные коэффициенты, гарантирующие выбор пессимистического сценария моделирования. Наилучшему решению соответствуют расчетные параметры модели, при которых достигается минимальное координатное расстояние от воспроизводимой изолинии до точки замера концентрации. Результаты экспериментов показали, что классическая аддитивная свертка способна отдавать предпочтение одним частным критериям в ущерб остальным. Поэтому в целевой функции применено максиминное правило, агрегирующее наибольшее отклонение прогнозных значений от фактических данных. Функционал Δ_0 позволил определить решение, компромиссное для всех замеров концентрации:

$$\Delta_0 = \max_{i \in N} |F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_n, x_i) - c_i| \rightarrow \min, \quad (2)$$

где i – номер датчика; N – общее количество датчиков концентрации; функция F характеризует фронтальную клеточную модель x_i – координаты расположения i -го датчика на карте местности; c_i – показание измерения i -го датчика.

Однако критериальная оценка Δ_0 ограничена выбором только одного варианта из множества возможных частных критериев, что приводит к потере информации о расстоянии до каждого замера.

Для первичной оценки параметров модели целесообразно использовать результаты моделирования, полученные на основе аналитического решения уравнения Гаусса [10] (при непрерывном точечном выбросе и постоянной скорости ветра) без учета эффектов взаимодействия с препятствиями. После загрузки карты местности с контурами препятствий и ввода данных мониторинга оценки параметров итерационно уточняются в схеме глобального поиска опорного решения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ниже приведены результаты оценки параметров фронтальной модели на основе частных решений уравнения Гаусса (пример 1), а также данных полевых наблюдений с учетом эффектов взаимодействия с препятствиями (пример 2). Для решения задач имитационного моделирования авторами использовался программный макет СППР, реализованный в программной среде C++/CLI на аппаратной платформе двудядерного процессора Intel(R) Pentium(R) CPU G3240@ 3.10GHz с оперативной памятью 8,00 ГБ.

Пример 1

Условия эксперимента:

область моделирования – массив 100x100 клеток;

эталонная модель – Гауссова модель с параметрами: мощность выброса 30 г/с, скорость ветра 2 м/с, коэффициент шероховатости $z_0 = 3,7$, устойчивость атмосферы $p = 0,5$;

метод поиска – алгоритм Нелдера – Мида;

целевая функция задана функционалом Δ_0 ;

состоит из 100 имитационных экспериментов;

размер ячейки 1 м.

На рис. 4 представлены результаты визуализации области выброса после подбора параметров модели: семейство изолиний отображает частные решения Гауссовой модели; цветная схема с палитрой концентрации (в мг) характеризует результаты прогона фронтальной модели. Расчетные профили концентраций приведены на рис. 5, 6.

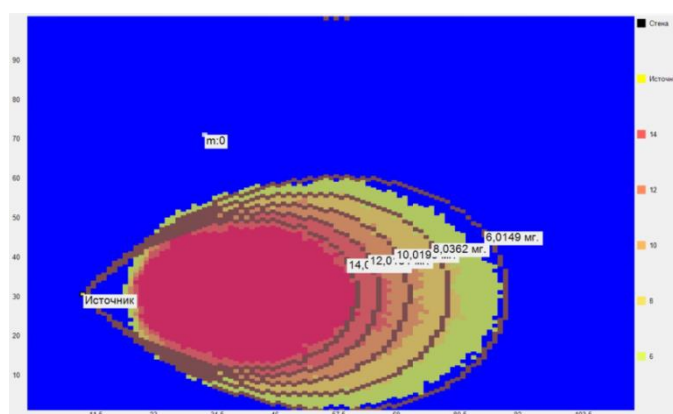


Рис. 4. Результаты визуализации области выброса с использованием модели Гаусса

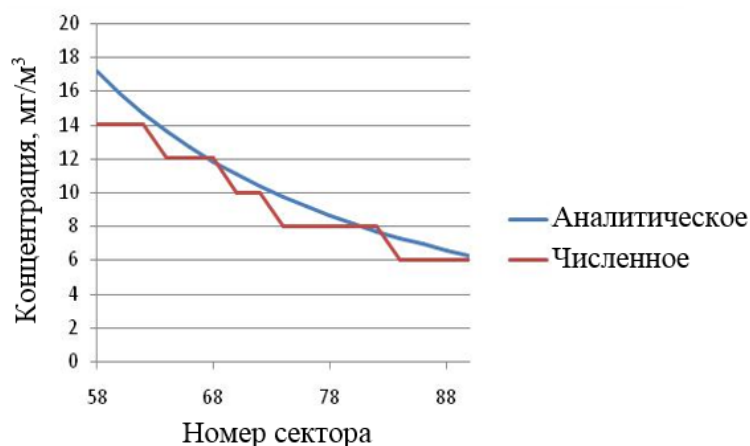


Рис. 5. Профиль концентрации вдоль оси выброса (31-й сектор по оси ou)

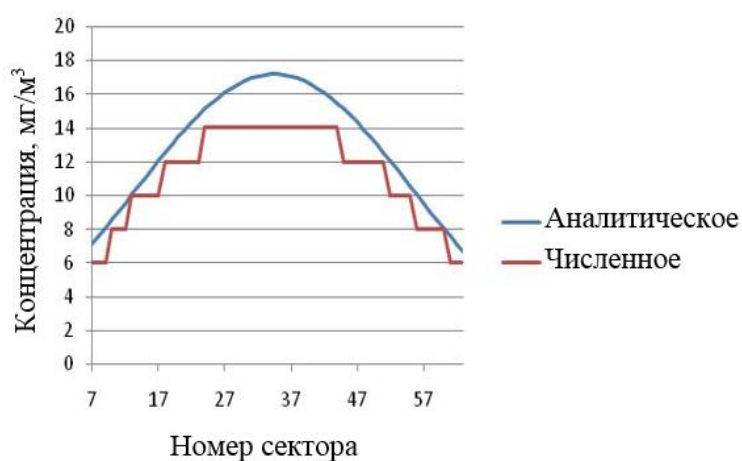


Рис. 6. Профиль концентрации перпендикулярно оси выброса (58-й сектор по оси ox)

Пример 2

Использованы полевые наблюдения в условиях застройки местности [11]. Схема размещения датчиков приведена на рис. 7.

Условия эксперимента:

размер площади моделирования 200×200 секторов;

метод поиска – имитация отжига (начальная температура отжига $t = 5$ °С, коэффициенты $p = 1$ и $q = 1$);

целевая функция – функционал Δ_0 ;

модель на основе фронтального алгоритма с формированием списка направлений;

направление ветра юго-восточное.

Выполнена и обработана выборка из пяти вариантов ($l = 5$) поиска опорного решения, в каждом варианте реализована серия из 100 прогонов имитационной модели. На рис. 7 представлены сводные результаты визуализации области выброса с использованием данных полевых наблюдений. Временные графики изменения целевой функции Δ_0 в ходе подбора параметров модели и суммарные временные затраты на поиск решения приведены на рис. 8, 9.

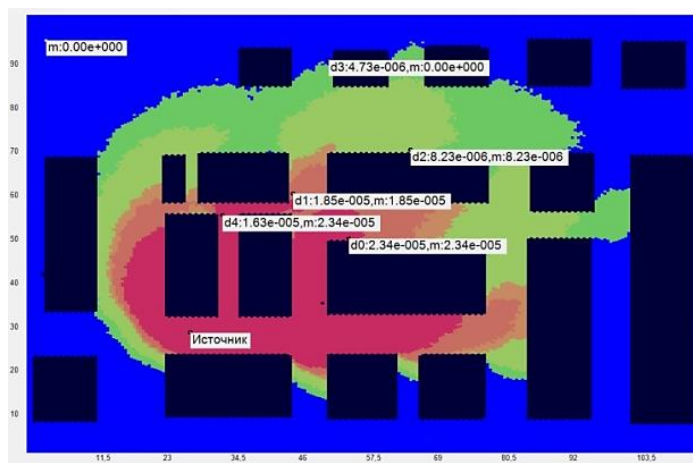


Рис. 7. Результаты прогона фронтальной модели с учетом полевых наблюдений

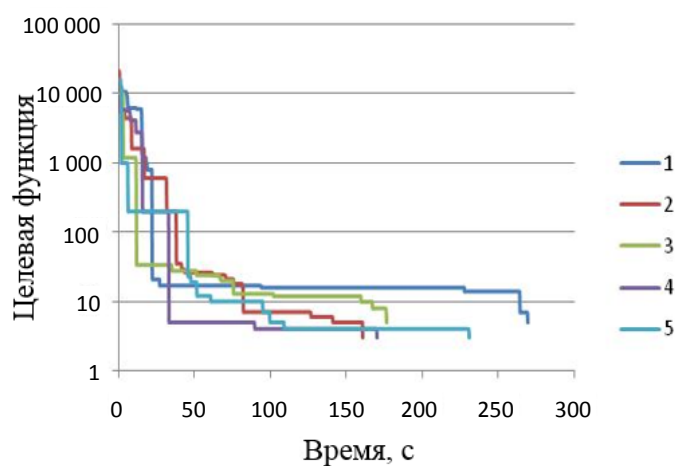


Рис. 8. Графики изменения целевой функции Δ_0 при подборе параметров модели

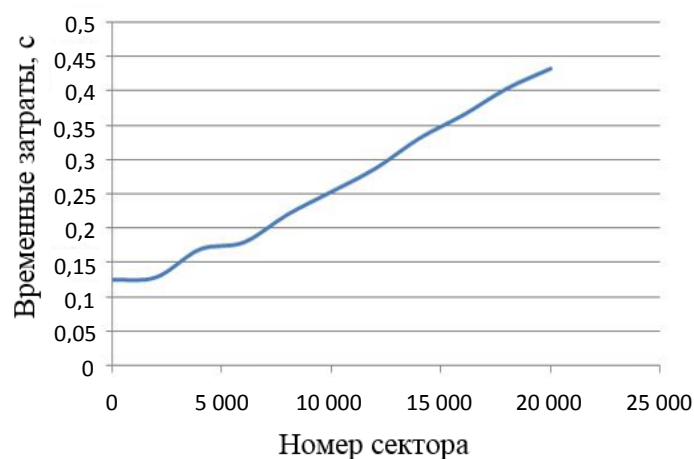


Рис. 9. Сводная зависимость временных затрат на поиск решения от числа смоделированных секторов выброса (выборка из пяти вариантов поиска)

Средний (по выборке) показатель временных затрат на поиск решения с погрешностью отклонения $\Delta_0 \leq 6$ секторов составляет 200 с, со стандартным отклонением результата $\sigma = 47$ с. Дальнейшее снижение затрат может быть получено при более «тонкой» настройке алгоритма имитации отжига (уточнении параметров t , p и q). Представленная на рис. 9 зависимость временных затрат на поиск решения имеет близкий к линейному характер изменения, что свидетельствует об эффективной работе фронтального алгоритма при повышении уровня детализации зоны загрязнения.

Ограничения симуляции пристеночного ветра, обусловленные отсутствием элементов в одном или нескольких списках, могут быть преодолены с использованием «моделей воздушных потоков» [12]. Такая модификация фронтального алгоритма будет представлена в последующих статьях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В системе анализа и визуализации последствий аварийных выбросов возможны значительные затраты вычислительных ресурсов, связанные с имитацией полета частицы в условиях застройки местности, особенно при высоком уровне детализации зоны загрязнения. Для увеличения производительности системы использован фронтальный подход к описанию облака выброса и разработан алгоритм клеточной модели, который учитывает эффекты взаимодействия с препятствиями. Результаты моделирования показали, что алгоритм может быть применен в комплексе со стандартными верифицированными методиками для расчета параметров и визуализации опасной зоны загрязнения при локальном масштабе аварии. Для уточнения прогнозов супервизорной поддержки необходимо дальнейшее развитие фронтального подхода на основе моделей воздушных потоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mazzola T., Hanna S., Chang J., Bradley S., Meris R., Simpson S., Ek N. Results of comparisons of the predictions of 17 dense gas dispersion models with observations from the Jack Rabbit II chlorine field experiment // *Atmospheric Environment*. 2021. V. 244. P. 1–14.
2. Чернышев Л.О., Матвеев Ю.Н. Компьютерная система визуализации анализа последствий аварийных выбросов в условиях промышленной застройки местности // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2022. № 2. С. 60–63.
3. Матюшкин И.В., Заплетина М.А. Обзор по тематике клеточных автоматов на базе современных отечественных публикаций // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2019. Т. 11. № 1. С. 9–57.
4. 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.
5. Мину М. Математическое программирование. Теория и алгоритмы. М.: Наука, 1990. 488 с.
6. Бандман О.Л. Клеточно-автоматные модели пространственной динамики. *Системная информатика: сборник трудов; под ред. А.Г. Марчука*. Новосибирск: СО РАН, 2006. С. 59–113.
7. Bandman O.L. Invariants of cellular automata models for reaction-diffusion processes // *Applied Discrete Mathematics*. 2012. № 3. P. 108–118.
8. Ingber L. Adaptive simulated annealing (ASA): Lessons learned // *Journal Control and Cybernetics*. 1996. № 25. P. 33–54.
9. Лопатин А. С. Метод отжига // *Стохастическая оптимизация в информатике*. 2005. Т. 1. № 1. С. 133–139.

10. Newman J.P., Maier H.R., Riddell G.A., Zecchin A.C., Daniell J.E., Schaefer A.M., Newland C.P. Review of literature on decision support systems for natural hazard risk reduction: Current status and future research directions // *Environmental Modelling & Software*. 2017. V. 96. P. 378–409.

11. Martin D., Nickless G., Price C.S., Britter R.E., Neophytou M.K., Cheng H., Shallcross D.E. Urban tracer dispersion experiment in London (DAPPLE) 2003: field study and comparison with empirical prediction // *Atmospheric Science Letters*. 2010. V. 11. № 4. P. 241–248.

12. Finardi S., Morselli M. G., Jeannet P. Wind flow models over complex terrain for dispersion calculations // *Cost Action*. 1997. V. 710. P. 51.

Для цитирования: Матвеев Ю.Н., Чернышев Л.О. Алгоритм фронтального моделирования в системе анализа и визуализации последствий аварийных выбросов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2022. № 3 (15). С. 81–91.

ALGORITHM FOR FRONTAL SIMULATION IN EMERGENCY RELEASE ANALYSIS AND VISUALIZATION SYSTEM

Yu.N. MATVEEV, Dr. Sc., L.O. CHERNYSHEV, Postgraduate

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: plumber63@mail.ru

The article considers a frontal approach to building a cell model for prompt response to local releases of hazardous chemical substances into the atmosphere. A front modeling algorithm based on a hexagonal pattern of a two-dimensional grid is briefly described and solutions are proposed to ensure stability of the forecast result. In the objective function of solution search, the maximal convolution of partial criteria is applied. Examples of estimating model parameters based on Gaussian equation solutions as well as data from field observations are considered. The time plots for finding a solution when changing the level of detail of the contamination zone are given.

Keywords: operational response, data assimilation, frontal algorithm, cell model, performance.

REFERENCES

1. Mazzola T., Hanna S., Chang J., Bradley S., Meris R., Simpson S., Ek N. Results of comparisons of the predictions of 17 dense gas dispersion models with observations from the Jack Rabbit II chlorine field experiment. *Atmospheric Environment*. 2021. V. 244, pp. 1–14.

2. Chernyshev L.O., Matveev Y.N. Computer system for visualization and analysis of the consequences of accidental emissions in the conditions of industrial development of the terrain. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzhya*. 2022. No 2, pp. 60–63. (In Russian).

3. Matyushkin I.V., Zapletina M.A. Review of cellular automata on the basis of modern domestic publications. *Kompyuternye issledovaniya i modelirovanie*. 2019. V. 11. No 1, pp. 9–57. (In Russian).

4. Chernyshev L.O., Matveev Y.N. Automated decision support system for predicting chemical dispersion processes. *Programmnye produkty i sistemy*. 2021. V. 34. No 2, pp. 307–315. (In Russian).

5. Minu M. Matematicheskoe programmirovaniye. Teoriya i algoritmy [Mathematical programming. Theory and algorithms]. Moscow: Nauka, 1990. 488 p.

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 3 (15), 2022*

6. Bandman O.L. Cell-automatic models of spatial dynamics. *System informatics. Collection of works edited by A.G. Marchuk*. Novosibirsk: SB RAS. 2006, pp. 59–113. (In Russian).
7. Bandman O.L. Invariants of cellular automata models for reaction-diffusion processes. *Applied Discrete Mathematics*. 2012. No 3, pp. 108–118.
8. Ingber L. Adaptive simulated annealing (ASA): Lessons learned. *Journal Control and Cybernetics*. 1995. No 25, pp. 33–54.
9. Lopatin A.S. The method of agitation. *Stochastic optimization in computer science*. 2005. V. 1. No 1, pp. 133–139. (In Russian).
10. Newman J.P. Maier H.R., Riddell G.A., Zecchin A.C., Daniell J.E., Schaefer A.M., Newland C.P. Review of literature on decision support systems for natural hazard risk reduction: Current status and future research directions. *Environmental Modelling & Software*. 2017. V. 96, pp. 378–409.
11. Martin D., Nickless G., Price C.S., Britter R.E., Neophytou M.K., Cheng H., Shallcross D.E. Urban tracer dispersion experiment in London (DAPPLE) 2003: field study and comparison with empirical prediction. *Atmospheric Science Letters*. 2010. V. 11. No 4, pp. 241–248.
12. Finardi S., Morselli M. G., Jeannet P. Wind flow models over complex terrain for dispersion calculations. *Cost Action*. 1997. V. 710, pp. 51.

Поступила в редакцию/received: 29.04.2022; после рецензирования/revised: 11.05.2022;
принята/accepted: 16.06.2022

УДК 658.588.2

СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ПРОГАРЕ ФУРМЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

М.Ю. РЯБЧИКОВ, канд. техн. наук, Е.С. РЯБЧИКОВА, канд. техн. наук,
Е.С. МУХИНА, ст. препод., М.А. ТАРАСОВ, студ.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38, e-mail: mr_mgn@mail.ru

© Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Мухина Е.С., Тарасов М.А., 2022

Статья посвящена совершенствованию существующих способов прогноза прогара фурмы с применением хорошо известного технологического параметра, характеризующего перепад расхода охлаждающей воды на входе и выходе фурмы. Отличительной чертой предложенной системы является двухуровневый прогноз в виде сигнала тревоги и предупреждения о прогаре. Прогноз выполняется на основе автоматизированного анализа по ретроспективным данным статистических свойств перепада расхода охлаждающей воды. Приведены примеры динамики изменения перепада расхода охлаждающей воды на фурме перед прогаром и непосредственно при прогаре. Представлена структура системы предупреждения, а также показаны примеры ее работы в ситуациях, когда прогар развивается постепенно и лавинообразно.

Ключевые слова: прогар фурмы, доменная печь, прогноз, диспетчерское управление, обработка ретроспективных данных.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-3-91-103

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 3 (15), 2022*