

Безопасность объектов строительства (2.1.15. технические науки)

Научная статья
УДК 004.942
doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2023.74.74.013

Автоматизация решения задачи прогнозирования распространения атмосферных загрязнений с учетом окружающего ландшафта и застройки

*Ирина Николаевна Пожаркова¹
Арина Викторовна Гапоненко
Иван Юрьевич Сергеев²*

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия

¹<https://orcid.org/0000-0003-1153-350X>

²<https://orcid.org/0000-0003-0705-0978>

Автор ответственный за переписку: Ирина Николаевна Пожаркова, pozharikova@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрена задача прогнозирования распространения атмосферных загрязнений с учетом окружающего ландшафта и застройки на основе сеточных моделей вычислительной гидродинамики. Представлена функциональная модель решения данной задачи. Обоснована целесообразность автоматизации этапов построения геометрической модели исследуемой местности, расчетной сетки, определения начальных условий, а также обработки полученных результатов для снижения трудоемкости их выполнения. Приведен пример использования разработанного в рамках исследования, которому посвящена данная статья, программного обеспечения для автоматизированного решения задачи прогнозирования распространения атмосферных загрязнений. Проведен сравнительный анализ выполнения автоматизируемых операций с использованием представленного программного обеспечения и без него.

Ключевые слова: прогнозирование чрезвычайных ситуаций, атмосферные загрязнения, вычислительная гидродинамика, автоматизация, трехмерная геометрическая модель, расчетная сетка

Для цитирования: Пожаркова И.Н., Гапоненко А.В., Сергеев И.Ю. Автоматизация решения задачи прогнозирования распространения атмосферных загрязнений с учетом окружающего ландшафта и застройки // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2023. № 1 (28). С. 8-15. <http://10.34987/vestnik.sibpsa.2023.74.74.013>.

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке «Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности» в рамках реализации научного проекта № 2022091208870 «Разработка программного обеспечения для прогнозирования распространения выбросов ТЭЦ с учетом окружающего ландшафта и застройки».

Automation of solving the problem of atmospheric pollution spread forecasting taking into account the surrounding landscape and buildings

Irina N. Pozharkova¹
Arina V. Gaponenko
Ivan U. Sergeev²

Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia

¹<https://orcid.org/0000-0003-1153-350X>

³<https://orcid.org/0000-0003-0705-0978>

Corresponding author: *Irina N. Pozharkova, pozharkova@mail.ru*

Abstract. The article considers the problem of atmospheric pollution forecasting spread taking into account the surrounding landscape and development based on mesh models of computational fluid dynamics. A functional model for solving this problem is presented. The feasibility of automating the stages of the investigated area geometric model and the computational mesh constructing, determining the initial conditions, as well as processing the obtained results to reduce the labor intensity of their implementation is justified. Usage example of software developed in the framework of the study, to which this article is devoted, for an automated solution to the problem of atmospheric pollution spread forecasting is given. A comparative analysis of automated operations using the presented software and without it was carried out.

Keywords: forecasting of emergency situations, atmospheric pollution, computational fluid dynamics, automation, three-dimensional geometric model, computational mesh

For citation: Pozharkova I.N., Gaponenko A.V., Sergeev I.U. Automation of solving the problem of atmospheric pollution spread forecasting, taking into account the surrounding landscape and buildings // Siberian Fire and Rescue Bulletin 2023. № 1 (28). С. 8-15. (In Russ.) <http://10.34987/vestnik.sibpsa.2023.74.74.013>.

Acknowledgments: the research was carried out with the financial support of the Krasnoyarsk Regional Fund for the Support of Scientific and Scientific-Technical Activities within the framework of the scientific project No. 2022091208870 "Development of software for predicting the spread of CHP emissions taking into account the surrounding landscape and development".

Эффективность решений, вырабатываемых для предотвращения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, во многом определяется точностью получаемой информации о текущем, а также прогнозируемом состоянии объектов наблюдения. В частности, прогнозирование распространения атмосферных загрязнений, в том числе при авариях, на различных объектах позволяет оценить их динамику и оперативно принять соответствующие меры, направленные на предотвращение и ликвидацию последствий чрезвычайных ситуаций.

Для решения подобных задач в настоящее время существует множество программных средств, реализующих различные вычислительные методы прогнозирования распространения атмосферных загрязнений. Многие из них используют математические модели Гаусса [1] и Лагранжа [2], которые применительно к рассматриваемой задаче обладают относительно невысокой вычислительной сложностью, поэтому позволяют спрогнозировать распространение атмосферного загрязнения на большой территории за малое количество времени даже при использовании персональных компьютеров с невысокой вычислительной мощностью. Однако недостаток подобных решений заключается в том, что они имеют ограниченные возможности по учету влияния рельефа местности, а также крупных зданий и сооружений на траекторию движения выбросов, и, чем выше геометрическая сложность моделируемого пространства, тем ниже точность прогноза [3].

Методы вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics – CFD), основанные на численном решении уравнений, описывающих газо/гидродинамику потоков (уравнения сохранения энергии, импульса, неразрывности, состояния и т.д.), позволяют с высокой точностью моделировать соответствующие процессы на объектах различной

геометрической сложности, в том числе и с учетом рельефа местности на открытых пространствах, при решении задач в различных прикладных областях. В частности, программные средства на базе CFD широко применяются для исследования динамики пожаров, взрывов, распространения атмосферных загрязнений при аварийных выбросах, эффективности противопожарных средств [4] и т.д. В [5] представлен пример существенного отличия результатов моделирования атмосферного загрязнения с использованием моделей Гаусса и CFD при одинаковых атмосферных условиях. На рис. 1 представлена функциональная диаграмма IDEF0 прогнозирования распространения атмосферных загрязнений с использованием сеточных моделей вычислительной гидродинамики [7].

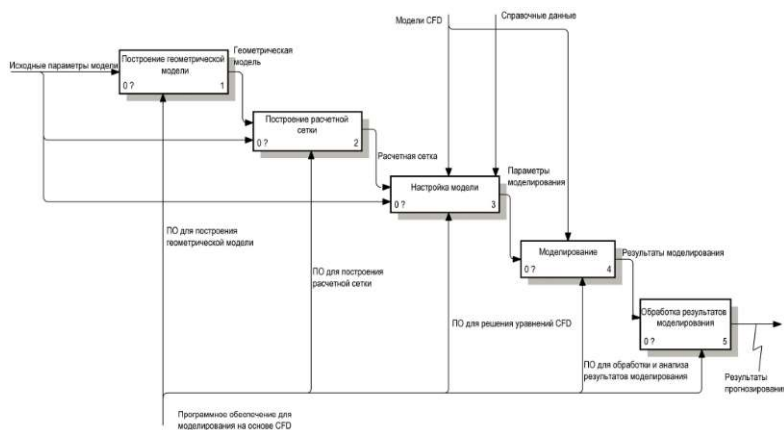


Рис. 1. Функциональная диаграмма IDEF0 прогнозирования распространения атмосферных загрязнений с использованием моделей вычислительной гидродинамики

В настоящее время существует множество платных и свободно распространяемых программных продуктов [8], позволяющих проводить численное моделирование на основе решения уравнений CFD. Многие из них имеют встроенные модули, предназначенные для выполнения каждого из этапов, представленных на рис. 1, а также позволяют импортировать и экспортировать промежуточные результаты (геометрические модели, расчетные сетки и т.д.) через файлы соответствующего формата. Кроме того, существуют отдельные программные продукты, а также библиотеки под различные языки программирования [9], реализующие только модели вычислительной гидродинамики, т.е. решение задач настройки модели и последующего моделирования (рис. 1). При этом, построение геометрической модели и расчетной сетки, а также обработка полученных результатов осуществляются при помощи соответствующих внешних модулей. Большинство описанных выше программных систем универсально, т.е. предназначено для решения широкого спектра проблем вычислительной гидродинамики, а потому не имеет встроенной поддержки узкоспециализированных задач, например, моделирования распространения атмосферных загрязнений, трудоемкость выполнения подготовительных и заключительных этапов которых довольно высока, а именно:

- Построение геометрической модели исследуемой местности с учетом рельефа, зданий и сооружений при помощи встроенных или внешних программных средств трехмерного моделирования.
- Построение расчетной сетки с учетом геометрических особенностей исследуемой местности (малый размер ячеек в окрестности источника выброса, зданий и сооружений, которые могут оказать влияние на распространение атмосферного загрязнения, и большой – на значительном расстоянии от них).
- Расчет начальных условий (параметров выбросов): состав, концентрация, скорость, температура и т.д., например, на основе [10].
- Обработка результатов моделирования, например, расчет концентраций загрязняющих веществ в различных точках исследуемого пространства, построение соответствующих полей, зон превышения ПДК и т.д.

Решение данных задач осложняется тем, что при исследовании различных сценариев чрезвычайных ситуаций или выбросов, связанных с технологическими процессами, для одного объекта может потребоваться существенное изменение исходной геометрической модели для каждого из них. В частности, для моделирования распространения атмосферного загрязнения при заданном ветре расчетная сетка формируется так, чтобы боковые вертикальные плоскости, ограничивающие соответствующую область пространства были параллельны вектору его направления, а плоскости, через которые он проходит – ортогональны [5]. Такой подход позволяет упростить формирование граничных условий, однако при изменении исследуемого направления ветра потребуются соответствующая перестройка геометрической модели и расчетной сетки моделируемого пространства, что также повышает трудоемкость решения перечисленных выше задач.

Для решения данной проблемы целесообразно использовать автоматизацию соответствующих этапов. На рис. 2 представлена функциональная диаграмма IDEF0 прогнозирования распространения атмосферных загрязнений с использованием уравнений CFD, а также разработанного в рамках исследования, которому посвящена данная статья, программного обеспечения, позволяющего автоматизировать решение задач построения геометрической модели, расчетной сетки, настройки модели и обработки результатов моделирования [11].

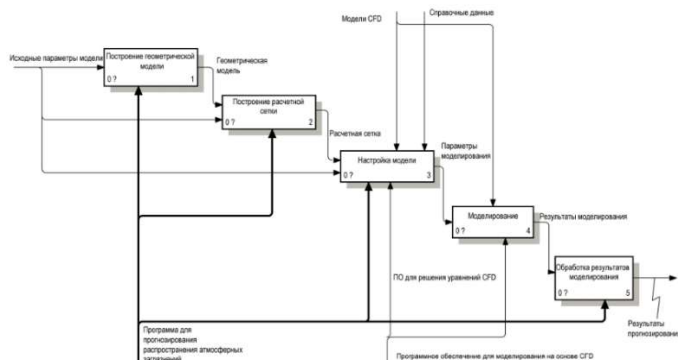


Рис. 2. Функциональная диаграмма IDEF0 прогнозирования распространения атмосферных загрязнений с использованием моделей вычислительной гидродинамики и разработанного программного обеспечения

На рис. 3 представлена функциональная диаграмма IDEF0 автоматизированного построения геометрической модели. В качестве исходных данных для решения этой задачи используются:

- Массив высот для заданной прямоугольной географической области пространства, например, в представленном в свободном доступе формате Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) [12].
- Географические координаты и геометрические размеры зданий и сооружений, находящихся в исследуемой области пространства.
- Высоты границ геометрического пространства.

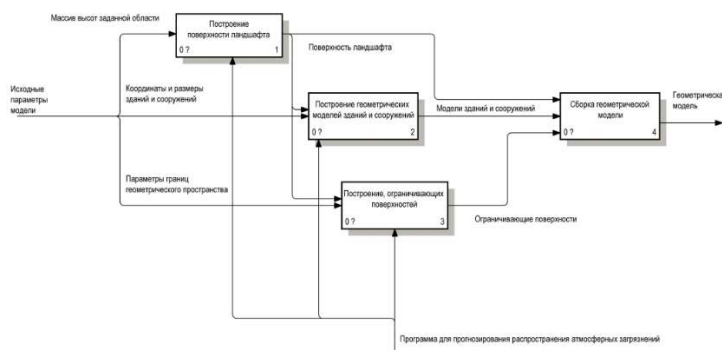


Рис. 3. Функциональная диаграмма IDEF0 автоматизированного построения геометрической модели

На основе геометрической модели производится автоматическое построение расчетной сетки с уменьшением размера ячеек в областях пространства, находящихся вблизи источника выброса, а также зданий и сооружений, которые могут оказать влияние на распространение атмосферного загрязнения. Такой подход используется для повышения точности и сходимости численного моделирования. На рис. 4 представлена визуализация внешних поверхностей расчетной сетки, построенной с использованием данного программного обеспечения [11] для исследования распространения выбросов Красноярской ТЭЦ-2 при южном ветре (геометрические размеры пространства 2000 м x 500 м x 600 м).

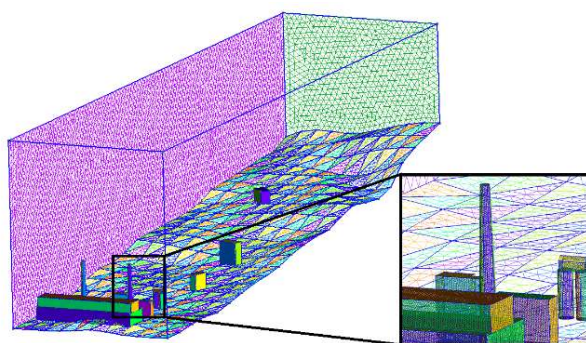


Рис. 4. Визуализация внешних поверхностей расчетной сетки

По результатам решения данных задач формируются выходные файлы с геометрической моделью и расчетной сеткой в форматах (в частности, *.step и *.stl или *.msh, соответственно), которые поддерживаются большинством программных систем и библиотек, предназначенных для моделирования на основе уравнений вычислительной гидродинамики. На рис. 5 представлена визуализация результатов расчета распространения выбросов угарного газа (источник – левая труба) и оксида серы (источник – правая труба) с использованием расчетной сетки, построенной на основе разработанного программного обеспечения. Обработка полученных результатов для представленного примера заключалась в перерасчете полученных концентраций в $\text{мг}/\text{м}^3$, сопоставлении с ПДК и построении соответствующих полей.

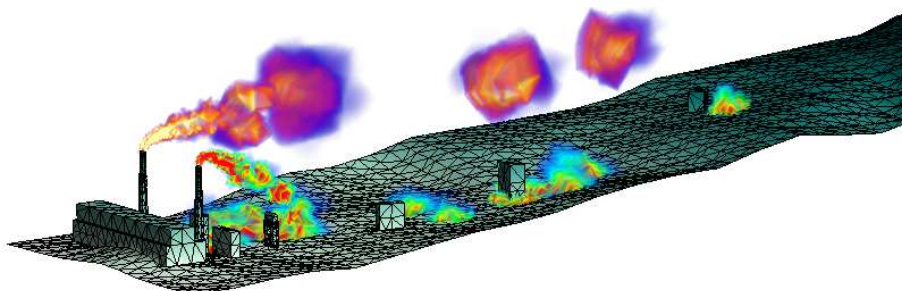


Рис. 5. Визуализация результатов расчета распространения выбросов Красноярской ТЭЦ-2 при южном ветре

По результатам решения задачи прогнозирования распространения атмосферных загрязнений для различных объектов и сценариев был проведен сравнительный анализ среднего времени (с округлением до минуты) выполнения автоматизируемых операций с решением соответствующих задач вручную, а также с использованием разработанного программного обеспечения [11] (таблица).

Таблица. Сравнительный анализ среднего времени выполнения различных операций при решении задачи прогнозирования распространения атмосферных загрязнений

№ п/п	Наименование операции	Среднее время выполнения вручную, мин	Среднее время выполнения с использованием автоматизации, мин
1	Построение геометрической модели исследуемой местности (исходной/при смене направления ветра)	68 / 54	12 / 2
2	Построение расчетной сетки	8	2
3	Расчет начальных условий (параметров выбросов)	21	2
4	Обработка результатов моделирования	12	2

Как видно, использование автоматизации при прогнозировании распространения атмосферных загрязнений с учетом окружающего ландшафта и застройки на основе сеточных моделей вычислительной гидродинамики позволяет значительно повысить скорость выполнения соответствующих операций, что при достаточно большом количестве исследуемых сценариев может существенно снизить трудоемкость решения задач, связанных с подготовкой расчетной модели и обработкой полученных результатов.

Список источников

1. Mao S., Lang J., Chen T., Cheng S., Wang C., Zhang J., Hu F. Impacts of typical atmospheric dispersion schemes on source inversion // *Atmospheric environment*. – 2020. – Т. 232. – с. 117572.
2. Pisso I., Sollum E., Grythe H., Kristiansen N. I., Cassiani M., Eckhardt S., Stohl A. The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 10.4 // *Geoscientific Model Development*. – 2019. – Т. 12. – №. 12. – с. 4955-4997.
3. Vervecken L., Camps J., Meyers J. Accounting for wind-direction fluctuations in Reynolds-averaged simulation of near-range atmospheric dispersion // *Atmospheric Environment*. – 2013. – Т. 72. – с. 142-150.
4. Pozharkova I., Aljarbough A., Azizam S.H., Mohamed A.P., Rabbi F., Tsarev R. A Simulation Modeling Method for Cooling Building Structures by Fire Robots // *Artificial Intelligence Trends in Systems: Proceedings of 11th Computer Science On-line Conference 2022, Vol. 2*. – Cham : Springer International Publishing, 2022. – с. 504-511.
5. Labovský J., Jelemenský L. CFD-based atmospheric dispersion modeling in real urban environments // *Chemical Papers*. – 2013. – Т. 67. – с. 1495-1503.
6. ГОСТ Р 50.1.028-2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 54 с.
7. ГОСТ Р 57700.14-2018. Численное моделирование физических процессов. Верификация получаемых сеточными методами численных решений задач механики сплошной среды. – М.: Стандартинформ, 2018. – 12 с.
8. Shen R., Jiao Z., Parker T., Sun Y., Wang Q. Recent application of Computational Fluid Dynamics (CFD) in process safety and loss prevention: A review // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2020. – Т. 67. – с. 104252.
9. Alnaes M., Blechta J., Hake J., Johansson A., Kehlet B., Logg A., Wells G.N. The FEniCS project version 1.5 // *Archive of Numerical Software*. – 2015. – Т. 3. – №. 100.
10. Распоряжение Минприроды России от 26.12.2022 № 38-р. Актуализирован Перечень методик расчета выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух стационарными источниками.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023615784 Российская Федерация. Программа для прогнозирования распространения выбросов ТЭЦ

с учетом окружающего ландшафта и застройки: заявка № 2023614978/69 от 20.03.2023 / Пожаркова И.Н., Гапоненко А.В.

12. Van Zyl J. J. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography //Acta astronautica. – 2001. – Т. 48. – №. 5-12. – с. 559-565.

List of sources

1. Mao S., Lang J., Chen T., Cheng S., Wang C., Zhang J., Hu F. Impacts of typical atmospheric dispersion schemes on source inversion //Atmospheric environment. – 2020. – Т. 232. – p. 117572.

2. Pisso I., Sollum E., Grythe H., Kristiansen N. I., Cassiani M., Eckhardt S., Stohl A. The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 10.4 //Geoscientific Model Development. – 2019. – Т. 12. – №. 12. – p. 4955-4997.

3. Vervecken L., Camps J., Meyers J. Accounting for wind-direction fluctuations in Reynolds-averaged simulation of near-range atmospheric dispersion //Atmospheric Environment. – 2013. – Т. 72. – p. 142-150.

4. Pozharkova I., Aljarbouh A., Azizam S.H., Mohamed A.P., Rabbi F., Tsarev R. A Simulation Modeling Method for Cooling Building Structures by Fire Robots //Artificial Intelligence Trends in Systems: Proceedings of 11th Computer Science On-line Conference 2022, Vol. 2. – Cham: Springer International Publishing, 2022. – p. 504-511.

5. Labovský J., Jelemenský E. CFD-based atmospheric dispersion modeling in real urban environments //Chemical Papers. – 2013. – Т. 67. – p. 1495-1503.

6. GOST R 50.1.028-2001. Information technologies for product lifecycle support. Methodology of functional modeling. – М.: ИПК Издательство стандарты, 2003. – 54 p.

7. GOST R 57700.14-2018. Numerical modeling of physical processes. Verification of numerical solutions of continuum mechanics problems obtained by grid methods. – М.: Standartinform, 2018. – 12 p.

8. Shen R., Jiao Z., Parker T., Sun Y., Wang Q. Recent application of Computational Fluid Dynamics (CFD) in process safety and loss prevention: A review //Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2020. – Т. 67. – p. 104252.

9. Alnaes M., Blechta J., Hake J., Johansson A., Kehlet B., Logg A., Wells G.N. The FEniCS project version 1.5 //Archive of Numerical Software. – 2015. – Т. 3. – №. 100.

10. Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation №38-r dated 26.12.2022. The list of methods for calculating emissions of harmful (polluting) substances into the atmospheric air by stationary sources has been updated.

11. Certificate of state registration of the computer program № 2023615784 Russian Federation. A program for forecasting the spread of CHP emissions taking into account the surrounding landscape and development: application № 2023614978/69 of 20.03.2023 / Pozharkova I.N., Gaponenko A.V.

12. Van Zyl J. J. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography //Acta astronautica. – 2001. – Т. 48. – №. 5-12. – p. 559-565.

Информация об авторах

И.Н. Пожаркова - кандидат технических наук, доцент

И.Ю. Сергеев - кандидат технических наук

Information about the author

I.N. Pozharkova - Ph.D. of Engineering Sciences, Docent

I.U. Sergeev - Ph.D. of Engineering Sciences

Вклад авторов

Пожаркова И.Н. – научное руководство; концепция исследования; разработка математических моделей; написание исходного текста; итоговые выводы.

Гапоненко А.В. – программная реализация методики.

Сергеев И.Ю. – апробация программного обеспечения.

Contribution of the authors

Pozharkova I.N. - scientific leadership; research concept; development of mathematical models; writing the original text; final conclusions.

Gaponenko A.V. - software implementation of the methodology.

Sergeev I.U. - software testing.

Статья поступила в редакция 20.02.2023; одобрена после рецензирования 19.03.2023; принята к публикации 21.03.2023.

The article was submitted 20.02.2023, approved after reviewing 19.03.2023, accepted for publication 21.03.2023.