

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

CONSTRUCTION AND URBAN ECOLOGICAL SECURITY

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 4. С. 274–288.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28(4): 274–288.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 504.054

<https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-4-274-288>



EDN: YZRTCE

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ

Олег Сергеевич Горячевский, Елизавета Юрьевна Липовцева

Национальный исследовательский

Московский государственный строительный университет,

г. Москва, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Неблагоприятная экологическая обстановка в промышленных регионах требует развития прикладных методов оценки воздействия промышленных выбросов на окружающую среду.

Цель. Разработка методики численного моделирования распространения загрязняющих веществ в городской застройке.

Методы. Численное моделирование проводилось в ПК ANSYS Fluent в стационарной постановке с использованием модели переноса химических веществ Species Transport, реализующей смешивание и перенос химических веществ за счет решения уравнений переноса концентрации вещества по гипотезе градиентной диффузии. Валидация модели проводилась на классической задаче о перемешивании веществ в трубе в двумерной и трехмерной постановках.

Результаты. Разработана методика численного моделирования распространения загрязняющих веществ в городской среде. Методика апробирована на задаче исследования рассеивания выбросов диоксида азота (NO₂) и диоксида серы (SO₂) из труб цементного завода для пяти направлений ветра. Продемонстрированы практические возможности разработанной методики, включающие: визуализацию характера рассеивания загрязняющих веществ от места их выброса, оценку уровня концентрации каждого вещества в выбранной области и выявление областей превышения предельно допустимых концентраций (ПДК). В данной постановке характер рассеивания веществ представлял собой по-

лосы, расширяющиеся по мере удаления от источников выбросов. При заданных массовых долях и объемах выбросов превышения ПДК для NO_2 и SO_2 составили 7,9 и 8,9 раза соответственно.

Выводы. Разработанная численная методика в среде ANSYS Fluent показала свою эффективность и информативность при анализе экологической обстановки в городской застройке. Для повышения достоверности результатов необходимы точные, официально подтвержденные данные о качественном и количественном составе выбросов промышленного предприятия, а также учет большего числа факторов, влияющих на концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе.

Ключевые слова: численное моделирование, вычислительная аэродинамика, валидация, загрязняющие вещества, предельно допустимая концентрация

Для цитирования: Горячевский, О.С., Липовцева, Е.Ю. Численное моделирование распространения загрязняющих веществ в городской среде // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 4. С. 274–288. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-4-274-288>. EDN: YZRTCE

ORIGINAL ARTICLE

NUMERICAL SIMULATION OF POLLUTANT DISTRIBUTION IN URBAN ENVIRONMENT

Oleg S. Goryachevsky, Elizaveta Yu. Lipovtseva

*National Research Moscow State University of Civil Engineering,
Moscow, Russia*

Abstract. The complex environmental situation in industrial regions requires the development of applied methods to assess the impact of industrial emissions on the environment.

Purpose: Development of numerical simulation methods of pollutant distribution in urban environment.

Methodology: Steady-state numerical simulation is performed in Ansys Fluent using the Species Transport model, which simulates mixing and transport of chemical substances by solving equations of concentration transport under the gradient diffusion hypothesis. The model is validated against classic 2D and 3D cases of substances mixing in a pipe.

Research findings: Numerical simulation methods for the pollutant distribution in urban environment is developed and applied to nitrogen dioxide (NO_2) and sulphur dioxide (SO_2) emissions from chimneys of a cement plant in five wind directions. Practical capabilities of the developed methods are demonstrated, including clear visualization of the nature of the pollutant distribution from the point of emission, the concentration level of each substance in a selected area, and areas with exceeded maximum permissible concentrations. In this study, the distribution of substances resembles bands, which widen with increasing distance from emission sources. For the given mass fractions and emission volumes, maximum permissible concentrations for NO_2 and SO_2 exceed 7.9 and 8.9 times, respectively.

Conclusions: The developed numerical simulation method of the pollutant distribution used in Ansys Fluent, are effective and informative for analysing the environmental situation in urban environment. However, for greater reliability, accurate, officially verified data on the qualitative and quantitative composition of emissions from industrial facilities is required, as well as the consideration of a greater number of factors influencing the concentration of harmful substances in the atmosphere.

Keywords: numerical simulation, computational fluid dynamics, validation, pollutant, maximum permissible concentration

For citation: Goryachevskii, O.S., Lipovtseva, E.Yu. Numerical Simulation of Pollutant Distribution in Urban Environment. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28(4): 274–288. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-4-274-288>. EDN: YZRTCE

Введение

Выбросы промышленных предприятий оказывают негативное влияние на окружающую среду. При этом воздействию подвергаются не только работники объекта – источника загрязнения, но и люди, живущие в пределах зоны рассеивания вредных для здоровья веществ. Поэтому возникает необходимость исследования процесса рассеивания для последующей разработки мер по снижению уровня негативного влияния выбросов на здоровье населения.

Среди методов расчета распространения загрязняющих веществ (ЗВ) можно выделить модели на основе распределения Гаусса, имитационные модели, модели с уравнениями в частных производных, статистические модели [1]. Экспериментальные методы (в том числе в аэродинамических трубах) в основном применяются для разработки и совершенствования расчетных моделей.

В работе [2] Н. Равшанов предлагает расширенную 3D-модель Эйлера для расчета пространственно-временной эволюции концентрации ЗВ. Модель включает в себя учет адвекции, диффузии, эмиссии, химических реакций, осадконакопления, вымывания и рельефа. Полученные дифференциальные уравнения решаются численно методом конечных разностей с использованием схем Upwind и QUICK. В заключении авторы утверждают, что модель подходит для оценки риска промышленных выбросов и применения в городском планировании.

Методы вычислительной гидрогазодинамики (CFD) [3] позволяют решить уравнения Навье – Стокса и дополнительные модели распространения веществ, а также рассмотреть большое количество сценариев, что дает возможность, в частности, определить наиболее значимые факторы, влияющие на концентрацию вредных веществ в воздухе или предсказать характер их рассеивания и оседания. Современный уровень развития вычислительной техники более не ограничивает соответствующие подходы. При высокой точности численные эксперименты экономичны и безопасны для здоровья человека и окружающей среды.

Особый интерес может представлять исследование группы авторов [4], основанное на эксперименте в аэродинамической трубе [5]. В программном комплексе (ПК) Ansys Fluent исследуется рассеивание ЗВ вблизи 10-этажного жилого здания в зависимости от местоположения источника рассеивания. Итогом работы стала математическая модель для оценки концентрации ЗВ в зависимости от расстояния выброса и угла его расположения.

Еще одним примером использования численного моделирования для решения экологических задач является работа П.В. Амосова [6], выполненная при помощи ПК Comsol. В ней проводится моделирование процесса пыления (распространения мелкодисперсной пыли) от хвостохранилища АНОФ-2 в г. Апатиты с варьированием таких параметров, как скорость ветра и площадь пыления.

Существуют также специализированные расчетные комплексы, например AERMOD, разработанный Агентством по охране окружающей среды

США. Этот комплекс позволяет моделировать выбросы от различных типов источников (точечные, площадные, линейные и объемные), учитывает рельеф, метеорологические параметры (скорость ветра, температура) и осаднение. В работе [7] Sandeep и Preeti Zade с помощью AERMOD исследовали влияние угледобывающего предприятия на близлежащие к нему деревни в индийском штате Махараштра. Авторы пришли к выводу, что концентрации загрязняющих веществ находятся в пределах нормы и влияние на близлежащие населенные пункты минимально.

Отечественным примером специализированного расчетного комплекса является унифицированная программа расчета загрязнения атмосферы (УПРЗА) «Эколог». В этой программе реализованы методики расчета концентрации вредных веществ, содержащихся в выбросах промышленных предприятий, в атмосферном воздухе. Комплекс использовал Д.К. Князев, исследуя выбросы цементного завода [8]. В работе изучались их химический состав, характер рассеивания и оседания, а также влияние зеленых насаждений на эти процессы. Среди результатов была представлена карта зон превышения предельно допустимой концентрации (ПДК) диоксида кремния или кварца (SiO_2).

При этом Д.А. Володина в работе [9] приводит результаты анализа уровня накопления химических элементов и форм их нахождения в составе твердых частиц, осевших в снеговом покрове в окрестностях цементного завода г. Искитима. Из данных анализа следует, что доля кварца в твердой фазе снегового покрова меньше, чем доля остальных минералов. Рассматривая выбросы, источником которых является цементный завод, Д.А. Володина отмечает, что на процесс обжига клинкера приходится наибольшая доля от всего объема выбросов и основными загрязнителями являются пыль, оксиды азота (NO_x) и диоксид серы (SO_2) [10].

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

- в большинстве случаев для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха используют простейшие и недостаточно точные методы: эмпирические формулы или статистические методы, в то время как более сложные модели требуют применения численных подходов;
- наиболее перспективные методы основаны на численном моделировании процессов распространения ЗВ в атмосферном воздухе (используются как специализированные ПК, так промышленные ПК общего назначения, основанные на решении уравнений гидрогазодинамики);
- производство строительных материалов, в частности цемента и его промежуточных продуктов, оказывает значительное негативное воздействие на окружающую среду, а большую долю выбросов в атмосферный воздух составляют пыль, NO_x и SO_2 .

Целью настоящей статьи является разработка CFD-подхода и демонстрация его широких прикладных возможностей для оценки уровня загрязнения воздуха городской среды от промышленных предприятий.

Для этого решены следующие задачи:

- 1) анализ возможностей ПК ANSYS Fluent для решения задач о переносе веществ в воздушном потоке;

2) проверка достоверности результатов численного моделирования распространения веществ (валидация) на примере модельной задачи, имеющей экспериментальное решение;

3) разработка методики и апробация на примере распространения ЗВ в городской застройке от цементного завода [8].

Математические модели

Математическая основа методики – решение осредненных во времени (по Рейнольдсу) уравнений Навье – Стокса (1), неразрывности (2), уравнений переноса турбулентных характеристик и уравнений конвективно-диффузионного переноса примесей (3):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{p} + \frac{2}{3} \rho k \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\omega}_A}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{\omega}_A}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left((D + D_t) \frac{\partial \bar{\omega}_A}{\partial x_i} \right), \quad (3)$$

где ρ – плотность газа; μ – динамическая вязкость газа; $\bar{u}_i$ – среднее значение скорости потока; $\bar{p}$ – давление; k – кинетическая энергия турбулентности; μ_t – турбулентная вязкость; $\bar{\omega}_A$ – среднее значение концентрации вещества A ; D – коэффициент диффузии; D_t – коэффициент турбулентной диффузии.

В стационарной постановке (RANS), применяемой в данной работе, производные по времени в (1), (3) принимаются равными 0.

Валидация модели

Непосредственная валидация методики на задаче распространения загрязняющих веществ в городской застройке затруднена из-за отсутствия подходящих экспериментальных данных. В связи с этим для валидации математической модели была использована классическая задача о перемешивании веществ в соосных потоках [11]. Задача решалась в трехмерной и упрощенной двумерной осесимметричной постановках.

Постановка задачи и исходные данные

В осесимметричной трубе струя пропана (C_5H_8) выбрасывается сонаправленно в поток воздуха (O_2 и N_2), где происходит перемешивание веществ. Газы считаются идеальными несжимаемыми, их вязкость принимается равной $\eta = 1,72 \cdot 10^{-5}$ кг/м·с. Скорость воздуха на входе (inlet O_2 и N_2) задается постоянной $v = 9,2$ м/с (рис. 1), а скорость пропана задается по экспериментально измеренному профилю.

На рис. 2 показана конечнообъемная сетка осесимметричной плоскости трубы. Сетка сгущается к inlet и интересующей нас области вблизи оси симметрии.

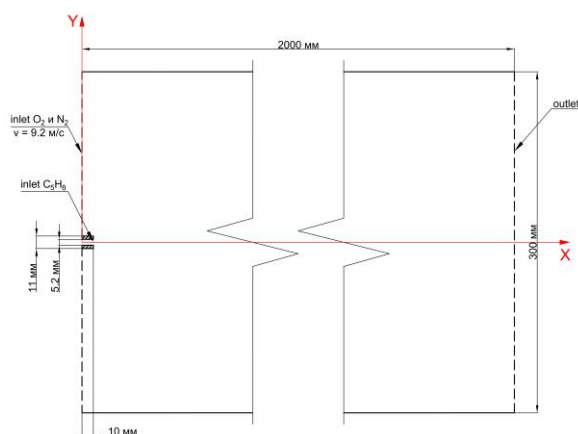


Рис. 1. Исходные данные для задачи о перемешивании веществ в соосных потоках: геометрия расчетной области с размерами, ее расположение по отношению к координатным осям X и Y , обозначение частей (inlet – вход в расчетную область, outlet – выход из расчетной области) и веществ, поступающих в расчетную область

Fig. 1. Initial data for the problem of mixing substances in coaxial flows: geometry of the computational domain with dimensions, its location in relation to the coordinate axes X and Y , and its boundary conditions (inlet is an entrance to the computational domain, outlet in an exit from the computational domain) and substances entering the computational domain

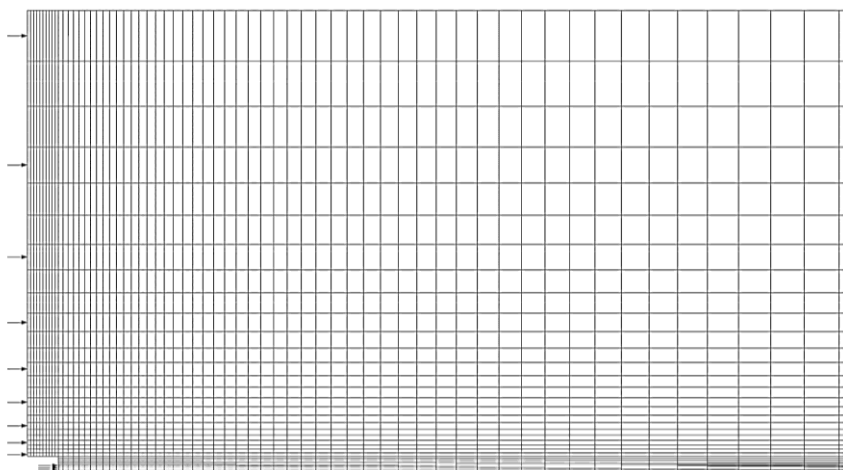


Рис. 2. Конечнообъемная сетка половины расчетной области вблизи inlet в разрезе для задачи о перемешивании веществ в соосных потоках

Fig. 2. Finite-volume mesh section of the half of the computation domain near the inlet for the problem of mixing substances in coaxial flows

Промежуточные результаты

На рис. 3 представлен график зависимости массовой доли пропана от координаты вдоль оси симметрии: красным цветом изображены результаты эксперимента, голубым – результаты численного моделирования задачи в двумерной постановке, зеленым – в трехмерной постановке.

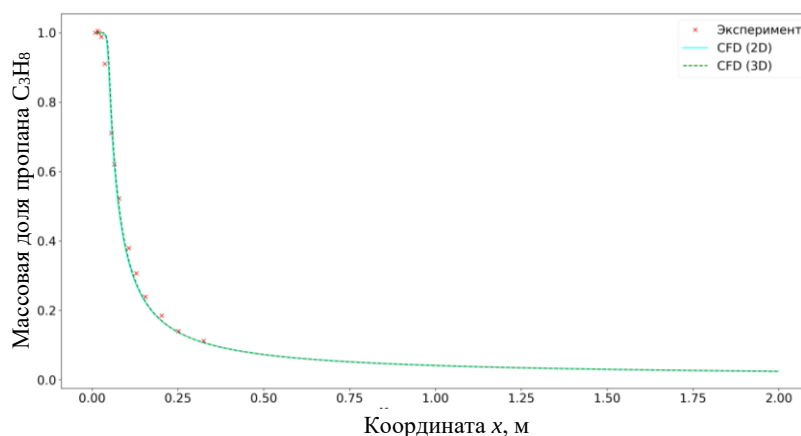


Рис. 3. График сопоставления численных результатов для двумерной и трехмерной постановок задачи о перемешивании веществ в соосных потоках с результатами эксперимента
Fig. 3. Comparison of numerical results for two- and three-dimensional formulations of the problem of mixing substances in coaxial flows with experimental results

Результаты численного решения как в трехмерной, так и в осесимметричной постановках идеально согласуются с экспериментальными данными. Можно заключить, что математические модели (1) – (3) и соответствующие численные методы, реализованные в ANSYS Fluent, позволяют достоверно моделировать распространение загрязняющих веществ.

Апробация методики

Для апробации выбрана задача анализа распространения загрязняющих веществ от цементного завода, расположенного на окраине г. Михайловки Волгоградской области (рис. 4).



Рис. 4. Территория завода с обозначением источников выбросов – труб (вид со спутника по данным сервиса «Яндекс карты»)
Fig. 4. The plant territory with emission sources (chimneys) marked (satellite view based on Yandex Maps data)

Описание задачи. Геометрическая модель расчетной области задачи (рис. 5) формировалась на основе открытых спутниковых данных. Учитывался участок $3,3 \times 2,6$ км.



Рис. 5. Геометрическая модель района области исследования в г. Михайловке с обозначением области расположения труб цементного завода

Fig. 5. Geometric model of the studied area in the city of Mikhaylovka. The area of the cement plant pipes is circled red

Расчетная область представляет собой прямоугольный параллелепипед с вращающейся (для смены направлений ветра) центральной цилиндрической частью, содержащей моделируемый район города и завод. Высота расчетной области равна 100 м, остальные ее размеры представлены на рис. 6.

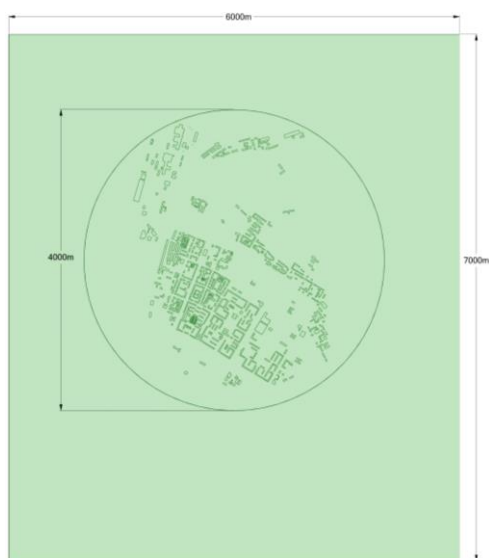


Рис. 6. Вид расчетной области сверху с обозначением ее размеров

Fig. 6. Top view of the computational domain with indicated dimensions

Размер конечных объемов (КО) варьировался от 0,5 до 8 м (рис. 7). Вблизи поверхностей земли и зданий пограничный слой дискретизировался тремя тонкими призматическими рядами КО. Общее количество КО ~14 млн.

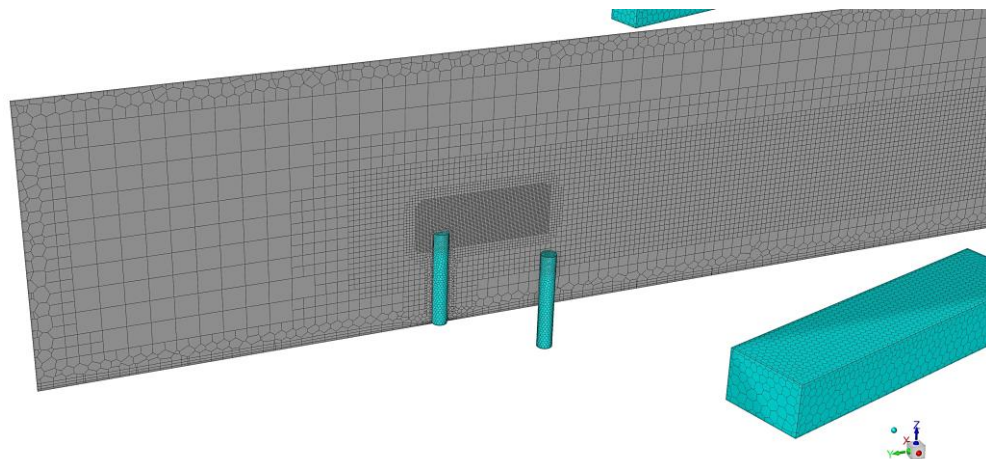


Рис. 7. Вид конечнообъемной сетки в разрезе по центру одной из труб завода
Fig. 7. Finite-volume mesh cross-csction at the center of one of the pipes

В настоящей работе принято, что газы идеальные и несжимаемые, а их температура постоянная и равна 300 К, поскольку, преодолевая расстояние порядка 1,5 км, газ, выходящий из труб, будет остывать до температуры окружающего атмосферного воздуха.

Состав выходящей из труб смеси, ее масса и массовые доли компонентов смеси вычислялись по данным из открытых источников. В ИТС 6-2024 [12] был указан объем и масса смеси газов, образующихся вследствие производства 1 т цементного клинкера – твердого материала, получаемого при производстве портландцемента в качестве промежуточного продукта. В среднем объем выбрасываемых газов составляет 2300 м³ на тонну производимого клинкера. Заявленная мощность производства клинкера рассматриваемого цементного завода – 3 млн т в год [13]. Формулу для массового расхода одной трубы определим как

$$Q = \frac{V_v \cdot N \cdot \rho_v}{n}, \quad (4)$$

где V_v – объем выбрасываемых газов; N – мощность производства по клинкеру; ρ_v – плотность воздуха при температуре 300 К; $n = 4$ – количество труб завода.

Тогда массовый расход для одной трубы составит 64,5 кг/с.

Для каждой трубы заданы массовый расход Q и массовые доли веществ, которые были определены на основании данных [12]: $\omega_{N_2} = 0,2818$, $\omega_{H_2O} = 0,1127$, $\omega_{O_2} = 0,0094$, $\omega_{CO_2} = 0,2192$, $\omega_{SO_2} = 0,0009$, $\omega_{NO_x} = 0,0003$, $\omega_B = 0,3757$. Массовая доля оксидов азота указана в пересчете на диоксид азота NO_2 .

Сами вещества были импортированы из базы данных Fluent с физическими характеристиками по умолчанию. В состав смеси вошли следующие ве-

щества: азот (N_2), водяные пары (H_2O), углекислый газ (CO_2), кислород (O_2), диоксид серы (SO_2), диоксид азота (NO_2) и газовая смесь «воздух», являющаяся в ANSYS Fluent аналогом обычного атмосферного воздуха. Она заменяет остальные вещества, явно неуказанные в [12].

На входной границе (inlet) расчетной области задан профиль ветра согласно СТО «Численное моделирование ветровых и снеговых воздействий» (СТО 02066523-089-1-2024). Средняя скорость ветра на высоте 10 м принята 5 м/с^1 , а тип местности – В согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» с изм. № 5.

Результаты

При анализе результатов сравнивались концентрации вредных веществ (диоксида азота и диоксида серы) с ПДК, установленными СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

Исследовались характерные пять направлений ветра с шагом в 10° , для которых облако выбросов из труб завода охватывает весь исследуемый район жилой застройки. На рис. 8 представлены изополя средних скоростей ветра на характерной пешеходной высоте 1,5 м. Изополя концентраций диоксида азота (NO_2) и диоксида серы (SO_2) представлены на рис. 9, 10, а выявленные зоны превышения максимально разовых ПДК ($0,2 \text{ мг/м}^3$ для NO_2 и $0,5 \text{ мг/м}^3$ для SO_2) показаны на рис. 11, 12.

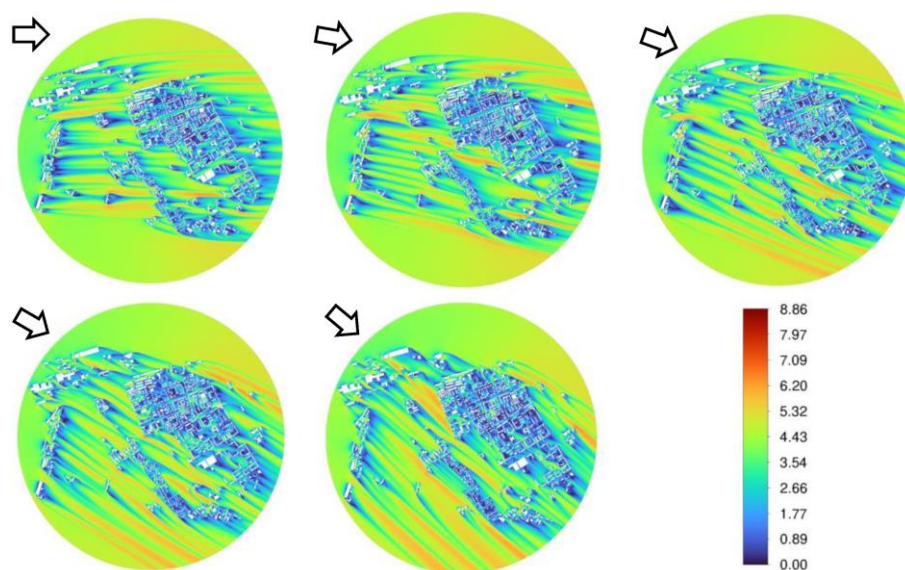


Рис. 8. Средние скорости ветра на высоте 1,5 м для исследуемых направлений (0, 10, 20, 30 и 40°), показанных стрелками, м/с

Fig. 8. Average wind speed at a height of 1.5 m for different directions (0, 10, 20, 30 and 40°), shown by arrows, m/s

¹ Архив погоды в Михайловке // Погода и климат URL: <https://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=34352> (дата обращения: 15.04.2024).

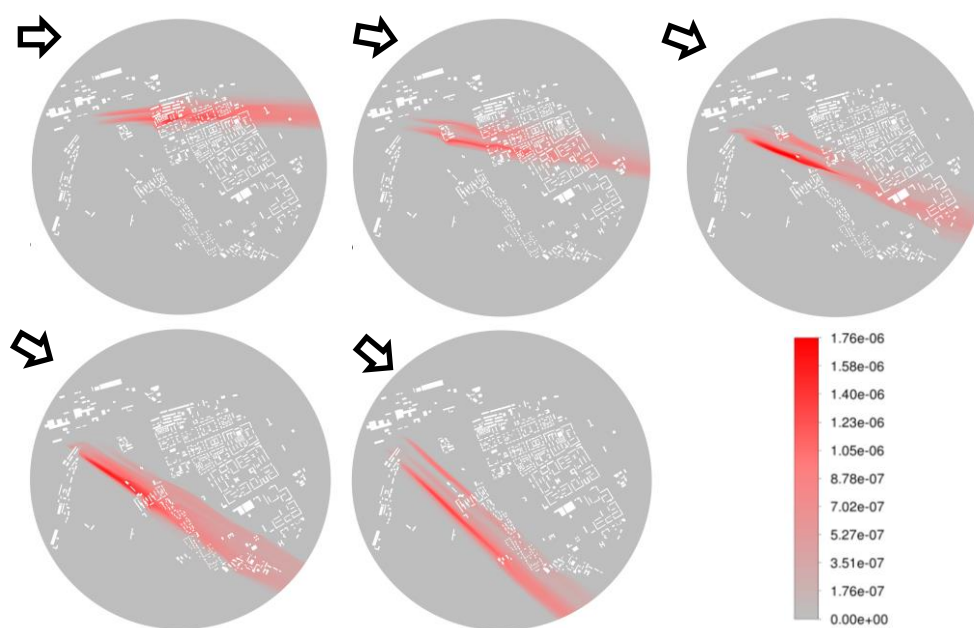


Рис. 9. Концентрация NO_2 на высоте 1,5 м для исследуемых направлений ветра (0, 10, 20, 30 и 40°), показанных стрелками, кг/м³

Fig. 9. NO_2 concentration at 1.5 m height for the different directions (0, 10, 20, 30 and 40 degrees), shown by arrows, kg/m³

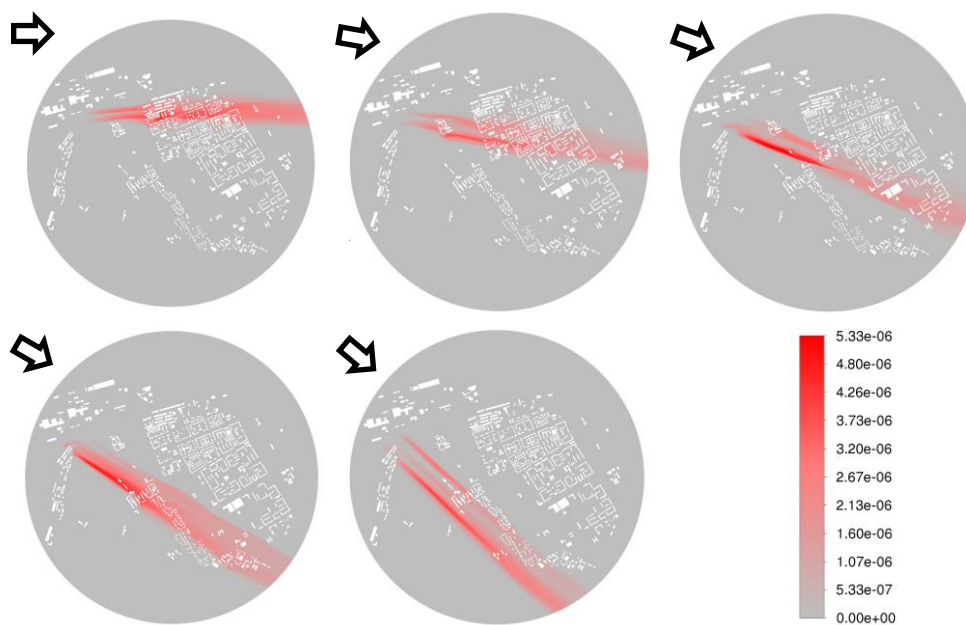


Рис. 10. Концентрация SO_2 на высоте 1,5 м для исследуемых направлений ветра (0, 10, 20, 30 и 40°), показанных стрелками, кг/м³

Fig. 10. SO_2 concentration at 1.5 m height for the different directions (0, 10, 20, 30 and 40 degrees), shown by arrows, kg/m³

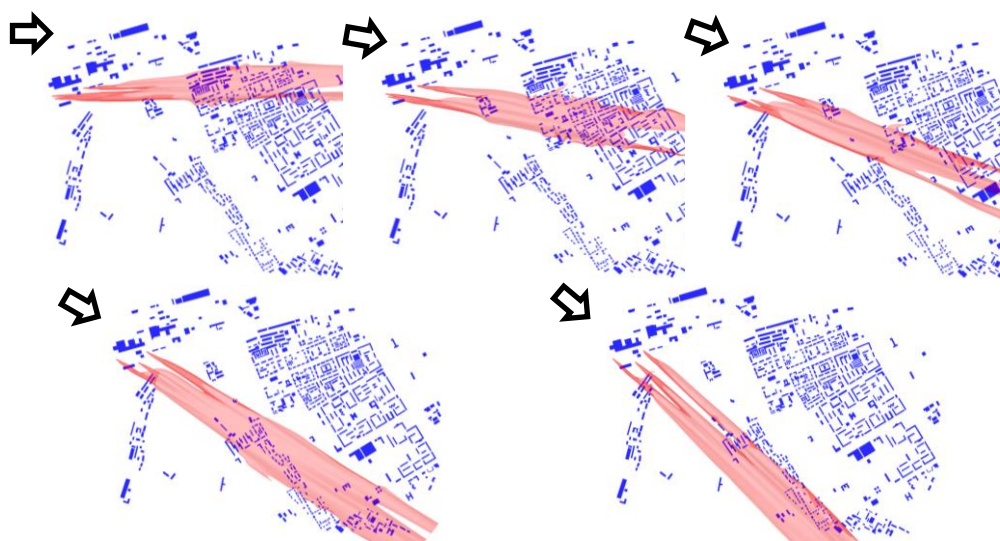


Рис. 11. Зоны превышения ПДК для NO_2 для исследуемых направлений ветра (0, 10, 20, 30 и 40°), показанных стрелками

Fig. 11. TLV exceedance zones for NO_2 for the different wind directions (0, 10, 20, 30 and 40 degrees), shown by arrows

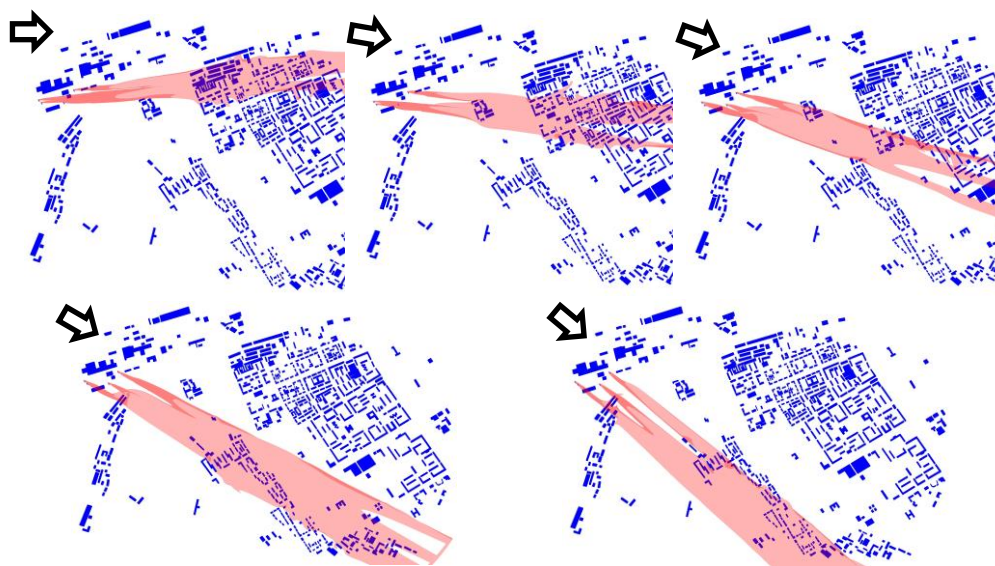


Рис. 12. Зоны превышения ПДК для SO_2 для исследуемых направлений ветра (0, 10, 20, 30 и 40°), показанных стрелками

Fig. 12. TLV exceedance zones for SO_2 for the different wind directions (0, 10, 20, 30 and 40 degrees), shown by arrows

Анализ полученных результатов моделирования показывает:

1. Максимальные значения концентраций NO_2 и SO_2 выявлены при угле атаки ветра 20° и составили 1,76 и 5,33 мг/м^3 соответственно. Средние среди

всех направлений ветра максимальные значения концентраций NO_2 и SO_2 составили соответственно 1,556 и 4,466 мг/м^3 .

2. При среднегодовой скорости ветра (5 м/с на высоте 10 м) вредные вещества распространяются расширяющейся полосой с углами $14,4^\circ$ для NO_2 и $19,2^\circ$ для SO_2 .

3. Максимальная концентрация NO_2 превышает свою предельно допустимую в среднем в 7,9 раза, а для SO_2 эта величина превышает допустимую в 8,9 раза.

4. Отметим, что полученные значительные концентрации загрязняющих веществ не следует воспринимать как наблюдаемые в действительности. Используемый в исследовании массовый расход был рассчитан исходя из максимального годового количества клинкера, который может быть произведен заводом, а не фактических объемов производства. Объем выбрасываемой смеси газов и массовые доли ее компонентов рассчитывались на основе данных из открытых источников, которые не учитывают применение пылегазоочистных установок и других экологических мероприятий. Целью данного этапа исследования являлась проверка возможностей методов вычислительной аэродинамики для анализа распространения загрязняющих веществ.

5. Согласно данным розы ветров для данной местности, выбранные для моделирования направления не являются преобладающими. В течение большей части года ветровые потоки уносят загрязняющие вещества в противоположную от города сторону.

Заключение

По результатам выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. На примере задачи распространения вредных веществ от цементного завода были продемонстрированы практические возможности по анализу загрязнения воздуха вокруг промышленных предприятий.

2. Разработанная методика позволяет визуализировать и анализировать распределение концентраций ЗВ в зависимости от направлений ветра и характера застройки, а также показать зоны превышения ПДК.

3. Для получения более достоверной экологической картины необходимо использование информации о точном объеме выбросов производственного предприятия, качественного и количественного состава выбрасываемых веществ, которые в рамках настоящего исследования принимались по данным из открытых источников.

4. Методика имеет перспективу широкого практического применения, поскольку позволяет комплексно учитывать городскую застройку, рельеф местности и химические реакции, а уровень развития современной вычислительной техники делает доступным проведение таких расчетов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сысоева, Е.В., Гельманова, М.О. Методы расчета рассеивания загрязняющих веществ в городской атмосфере // Вестник МГСУ. 2022. №8. С. 1027–1045. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.8.1027-1045. EDN: DZWYQY

2. Равшианов, Н., Журабоева, О., Боборахимов, Б., Шарипов, Х. Моделирование распространения загрязняющих веществ в атмосфере с учетом рельефа и метеорологических условий // Проблемы вычислительной и прикладной математики. 2025. № 4 (68). С. 38–46. https://doi.org/10.71310/pcam.4_68.2025.01
3. Белостоцкий, А.М., Акимов, П.А., Афанасьева, И.Н. Вычислительная аэродинамика в задачах строительства. Москва : Изд-во АСВ, 2017. 720 с.
4. Keshavarzian, E, Jin, R., Dong, K., Kwok, K.C.S., Zhang, Y., Zhao, M. Effect of pollutant source location on air pollutant dispersion around a high-rise building // *Applied Mathematical Modelling*. 2020. № 81. P. 582–602. DOI: 10.1016/j.apm.2020.01.019. EDN: GSMKWI
5. Liu, X.P., Niu, J.L., Kwok, K.C.S., Wang, J.H., Li, B.Z. Investigation of indoor air pollutant dispersion and cross-contamination around a typical high-rise residential building: Wind tunnel tests // *Building and environment*. 2010. № 45 (8). С. 1769–1778. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.02.003
6. Амосов, П.В., Бакланов, А.А., Макаров, Д.В., Маслобоев, В.А. Численное моделирование загрязнения атмосферы в подходах случайного выбора дискретных участков пыления и поинтервального распределения размера пыли // Вестник МГТУ. 2022. № 25. С. 61–73. DOI: 10.21443/1560-9278-2022-25-1-61-73. EDN: YBINJK
7. Zade, S., Zade, P. Dispersion modelling to assess ambient air quality impact due to carbon industry // *International journal of innovative research in technology*. 2025. № 12(3). P. 3774–3783.
8. Князев, Д.К. Проблема загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов Волгоградской области выбросами предприятий строительной отрасли // Вестник МГСУ. 2017. № 2 (101). С. 193–200. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2.193-200. EDN: YGJDYX
9. Володина, Д.А., Таловская, А.В., Язиков, Е.Г., Девятова, А.Ю., Еделев, А.В. Оценка пыле-аэрозольного загрязнения в зоне влияния цементного завода на основе изучения снегового покрова (Новосибирская область) // Известия Томского политехнического университета. 2022. № 333 (10). С. 69–85. DOI: 10.18799/24131830/2022/10/3704. EDN: FVOHDL
10. Володина, Д.А. Цементный завод как источник пылеаэрозольного загрязнения атмосферы // Творчество юных – Шаг в успешное будущее : материалы VIII Всероссийской научной студенческой конференции с элементами научной школы имени профессора М.К. Коровина, Томск, 23–27 ноября 2015 г. Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), 2015. С. 135–137.
11. Schefer, R.W., Dibble, R.W. Simultaneous measurements of velocity and density in a turbulent non-premixed flame // *AIAA Journal*. 1985. № 23 (7). С. 1070–1078. <https://doi.org/10.2514/3.9039>
12. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям «ИТС 6-2024 Производство цемента». Москва : Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт), 2024. 298 с.
13. Завод в цифрах // Себряковцемент. URL: <https://sebcement.ru/proizvodstvo/zavod-v-cifrakh/> (дата обращения: 15.04.2024).

REFERENCES

1. Sysoeva, E.V., Gelmanova, M.O. Methods for Calculating the Pollutants Dispersion in Urban Atmosphere. *Vestnik MGSU*. 2022; 8: 1027–1045. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.8.1027-1045 (In Russian)
2. Ravshanov, N., Juraboeva, O., Boborakhimov, B., Sharipov, Kh. Modeling the Pollutant Distribution in the Atmosphere, Accounting for Terrain and Meteorological Conditions. *Problems of Computational and Applied Mathematics*. 2025; 4(68): 38–46. DOI: 10.71310/pcam.4_68.2025.01 (In Russian)
3. Belostotsky, A.M., Akimov, P.A., Afanasyeva, I.N. Computational Fluid Dynamics in Construction Tasks. Moscow: ASV, 2017. 720 p. (In Russian)
4. Keshavarzian, E, Jin, R., Dong, K., Kwok, K.C.S., Zhang, Y., Zhao, M. Effect of Pollutant Source Location on Air Pollutant Dispersion Around a High-rise Building. *Applied Mathematical Modelling*. 2020; 81: 582–602.
5. Liu, X.P., Niu, J.L., Kwok, K.C.S., Wang, J.H., Li, B.Z. Investigation of Indoor Air Pollutant Dispersion and Cross-contamination Around a Typical High-rise Residential Building: Wind Tunnel Tests. *Building and Environment*. 2010; 45(8): 1769–1778.
6. Amosov, P.V., Baklanov, A.A., Makarov, D.V., Masloboev, V.A. Numerical Simulation of Atmospheric Pollution in Random Selection of Discrete Dusting Sites and Interval Distribution of

- Dust Size. *Vestnik of MSTU*. 2022; 25: 61–73. DOI: 10.21443/1560-9278-2022-25-1-61-73 (In Russian)
7. Sandeep, Z., Preeti, Z. Dispersion Simulation to Assess Ambient Air Quality Impact Due to Carbon Industry. *International Journal of Innovative Research in Technology*. 2025; 12(3): 3774–3783.
 8. Knyazev, D.K. Problems of Atmospheric Air Pollution in Inhabited Localities of the Volgograd Region by Emissions of Construction Industry Enterprises. *Vestnik MGSU*. 2017; 2(101): 193–200. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2.193-200 (In Russian)
 9. Volodina, D.A., Talovskaya, A.V., Yazikov, E.G., Devyatova, A.Yu., Edelev, A.V. Assessment of Dust-Aerosol Pollution in the Area of Cement Plant Influence Based on the Snow Cover (Novosibirsk Region). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2022; 333(10): 69–85. DOI: 10.18799/24131830/2022/10/3704 (In Russian)
 10. Volodina, D.A. Cement Plant as a Source of Dust-aerosol Pollution of the Atmosphere. In: *Proc. 8th All-Russ. Sci. Conf. 'Young Creativity – A Step to a Successful Future'*, Tomsk, 2015. Pp. 135–137. (In Russian)
 11. Schefer, R.W., Dibbl, R.W. Simultaneous Measurements of Velocity and Density in a Turbulent Non-premixed Flame. *AIAA Journal*. 1985; 23(7): 1070–1078.
 12. Information and Technical Directory on Best Available Techniques "ITS 6-2024 Manufacture of cement" N 2231, 16.09.2024. Federal Agency on Technical Regulating and Metrology (Rosstandart). 2024. 298 p. (In Russian)
 13. The plant in numbers. Available: <https://sebcement.ru/proizvodstvo/zavod-v-cifrah/> (accessed April 15, 2024) (In Russian)

Сведения об авторах

Горячевский Олег Сергеевич, канд. техн. наук, заместитель директора НОЦ КМ им. А.Б. Золотова, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, osgoryachevskij@mail.ru

Липовцева Елизавета Юрьевна, студентка, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, elizaveta.lipovtseva@yandex.ru

Authors Details

Oleg S. Goryachevsky, PhD, A/Professor, Deputy Director at A.B. Zolotov REC CM, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoye Road, 129337, Moscow, Russia, osgoryachevskij@mail.ru

Elizaveta Y. Lipovtseva, Student, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoye Road, 129337, Moscow, Russia, elizaveta.lipovtseva@yandex.ru

Вклад авторов

Горячевский О.С. – постановка цели и задач исследования, анализ и обобщение результатов.

Липовцева Е.Ю. – анализ литературы, проведение численных исследований, анализ результатов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

Oleg S. Goryachevsky: defining the research goals and objectives, data curation.

Elizaveta Y. Lipovtseva: numerical investigation, data curation.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 16.01.2026
Одобрена после рецензирования 23.04.2026
Принята к публикации 06.08.2026

Submitted for publication 16.01.2026
Approved after review 23.04.2026
Accepted for publication 06.08.2026