

УДК 536.2  
PACS 02.60.Cb; 44.25.+f

## Конвективный перенос условной примеси в пределах городской геометрии

А. В. Евграфова<sup>1\*</sup>, А. Н. Сухановский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

<sup>2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

\* eav@icmm.ru

В статье рассмотрен процесс распространения тяжелой примеси в условиях городской агломерации. В качестве объекта исследования использован трехмерный макет части г. Пермь, который воспроизводит высоту и расположение зданий, а также особенности рельефа местности на площади около 5 км<sup>2</sup>. Макет помещался в герметичный контейнер с водой, в качестве примеси использованы водные растворы поваренной соли. Параметры эксперимента подбирались для качественного моделирования процесса распространения смеси диоксида углерода/воздух в атмосфере. Эксперименты были выполнены для локализованного и протяженного источников примеси. Показано, что существенную роль в процессе распространения играет рельеф местности. Относительно тяжелая примесь стремится заполнить наиболее низкие области рельефа. Показано, что наличие зданий препятствует переносу примеси. В некоторых случаях это может приводить к формированию застойных зон с высоким содержанием примеси.

**Ключевые слова:** гравитационная конвекция; примесь; городская агломерация

*Поступила в редакцию 17.03.2023; после рецензии 13.04.2023; принята к опубликованию 13.04.2023*

## Convective transfer of a conditional admixture within urban geometry

A. V. Evgrafova<sup>1\*</sup>, A. N. Sukhanovskii<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia

<sup>2</sup> Perm State University, Perm, Russia

\* eav@icmm.ru

The paper studies the process of a heavy impurity propagation in urban geometry. As an object of research, a three-dimensional layout of a part of the city of Perm was used. It reproduces the height and location of buildings as well as terrain features on an area of about 5 km<sup>2</sup>. The model was placed in a container with water; aqueous solutions of NaCl were used as an impurity. The experimental parameters were selected based on the approximation of turbulent characteristics and qualitatively describe the process of propagation of the carbon dioxide/air mixture. Experiments were performed for localized and extended impurity sources. It is shown that the terrain plays an essential role in the process of impurity propagation. The admixture tends to fill the lowest areas of the relief. The presence of buildings prevents the movement of impurities. In some cases, this can lead to the formation of stagnant zones with a high impurity content.

**Keywords:** gravitational convection; impurity; urban agglomeration

*Received 17 March 2023; revised 13 April 2023; accepted 13 April 2023*

doi: 10.17072/1994-3598-2023-2-14-21

© Евграфова А. В., Сухановский А. Н., 2023



распространяется на условиях лицензии  
Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

## 1. Введение

В настоящее время процесс урбанизации приобрел глобальный характер. Увеличение численности населения в городах приводит к повышению спроса на жилое пространство, поэтому строительные компании все чаще разрабатывают предложения в виде «компактных» строений преимущественно многоэтажного типа. Таким образом, городская застройка постепенно уплотняется и вытягивается вертикально, что, в свою очередь, оказывает существенное влияние на микроклимат внутри городской среды. Сложная геометрия зданий изменяет ветровые потоки, оказывая влияние на распределение температуры и концентрации вредных примесей.

Известно, что при обтекании одиночных зданий воздушным потоком происходит регулярный срыв вихрей с боковых поверхностей [1–3]. Размер вихрей, динамика их срыва, а также взаимодействие вихрей между собой зависят от аспектного отношения препятствия и характеристик набегающего ветра. Расчет характеристик обтекания необходим для определения зон загрязнения выбросами вредных веществ технологических и вентиляционных систем, прогнозирования разрушения фасадных конструкций зданий. При обтекании ветром группы зданий, зоны обтекания влияют друг на друга, и аэродинамика обтекания усложняется.

Обтекание группы регулярно расположенных однотипных препятствий было рассмотрено в [4–6]. Обнаружено возникновение зон рециркуляции воздуха с подветренной стороны зданий. Интенсивность рециркуляции растет с увеличением плотности расположения препятствий. При этом замечено, что именно в зонах рециркуляции наблюдается скопление вредных примесей. Наибольшая скорость ветра наблюдается между зданиями, что очевидно, вызвано поджатием ветрового потока.

В реальности городская среда имеет сильную неоднородность по высоте зданий, их геометрической форме и взаимному расположению. Таким образом, для оценки комфортных и безопасных для жизни условий необходимо рассматривать геометрию, максимально приближенную к реальным городам. Так, в [7] изучено влияние морфологии модельной застройки на процесс обтекания группы зданий. Было показано, что помимо неоднородности высоты зданий, другие морфологические особенности (соотношение сторон зданий, угол взаимного расположения, наличие/отсутствие высотных зданий) оказались важным фактором при формировании потока. Обтекание реальной геометрии группы зданий г. Красноярск было рассмотрено в [8]. Анализ ветровых потоков позволил определить зоны экологической комфортности, расположение которых существенно зависит от

особенности геометрического расположения зданий. В [9] показано распространение примеси в части г. Пекин. Задача решалась экспериментально и численно для детализированной модели городской застройки. Ключевым моментом работы стал вывод о необходимости учитывать неоднородность высоты застройки для параметризации существующих метеорологических моделей.

Несмотря на то, что число работ по исследованию реальных городских ландшафтов увеличивается с каждым годом, используемые методы, как экспериментальные, так и численные, характеризуются рядом ограничений. Поэтому важно разрабатывать и реализовывать новые методы и подходы к анализу микроклимата городов. Так, в [10] был реализован новый экспериментальный подход к исследованию температуры поверхности города после продолжительного нагревания инфракрасным излучением. В качестве объекта исследования использован детализированный макет части г. Пермь, который учитывает рельеф местности, а также высоту и расположение зданий. В данной работе предлагается использовать подход, описанный в [10], для анализа распространения примеси от различных локализованных и протяженных источников загрязнений при отсутствии внешней циркуляции.

## 2. Экспериментальная установка

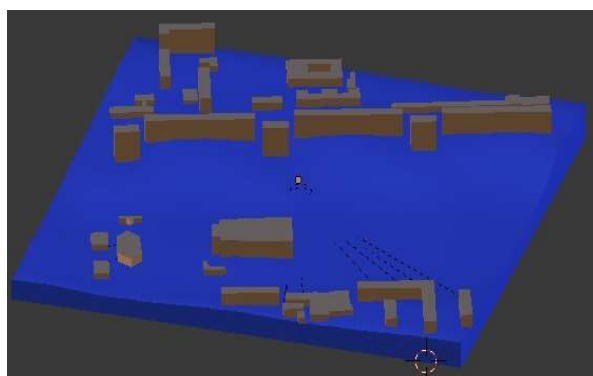
В качестве объекта исследований использована модель центрального района г. Пермь. Модель создана из ABS пластика на 3D принтере Picaso. Модель качественно воспроизводит особенности рельефа местности, расположение и высоту зданий на территории почти 5 км<sup>2</sup> (масштаб печати 1:4000). Масштаб выбран с учетом характерных значений коэффициентов турбулентной вязкости в приземном атмосферном слое (1–5 м<sup>2</sup>/с) для того, чтобы управляющие параметры в лабораторном эксперименте и эффективные управляющие параметры в реальных условиях были сравнимы. В качестве основы были использованы данные из некоммерческого веб-картографического проекта OpenStreetMap. Для повышения контраста при исследовании движения примеси модель покрыта матовой белой краской. На рис. 1 представлены изображения части макета, повторяющего местность размером 500×500 м.

Проведена оценка применимости данного подхода для моделирования процессов переноса примесей в районе населенных пунктов. В качестве примера был рассмотрен случай распространения углекислого газа. На сегодняшний день диоксид углерода является основным химическим загрязнителем атмосферного воздуха. Большая часть диоксида углерода планеты естественного происхождения. Однако в крупных городах существенными источниками CO<sub>2</sub> являются про-

мышленные предприятия и транспорт, которые обеспечивают выброс в атмосферу углекислого газа искусственного происхождения. Приемлемая концентрация углекислого газа на открытом воздухе – 0.06 % [11].



(a)

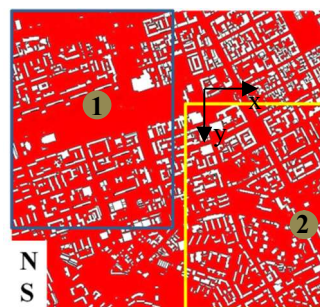


(б)

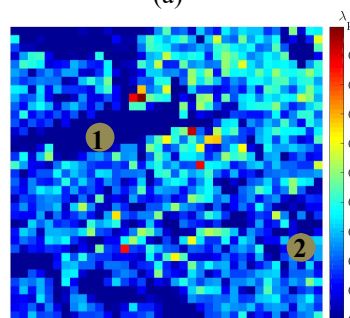


(в)

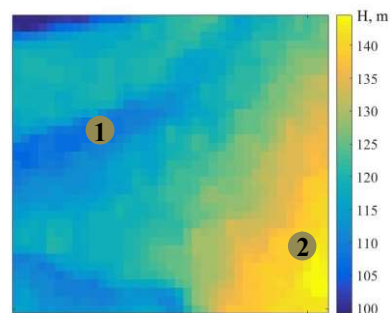
**Рис. 1.** Изображение части макета: а – OpenStreetMap; б – трехмерная модель для печати; в – готовая модель из ABS пластика



(a)



(б)



(в)

**Рис. 2.** Макет: а – карта; б – распределение плотности застройки  $\lambda_p$ ; в – высота поверхности макета без учета зданий

В лабораторных условиях процесс распространения примеси исследован в пределах макета части г. Пермь. Макет помещен в герметичный контейнер, заполненный дистиллированной водой. Диоксид углерода является тяжелой примесью, поэтому влияние толщины слоя жидкости на процесс распространения не рассматривается. Максимальная толщина слоя жидкости над поверхностью макета составляла 35 мм, что с учетом масштаба модели соответствует слою атмосферы высотой 140 м.

Эксперименты были проведены для локализованного и протяженного источников примеси. Для случая локализованного источника примеси были рассмотрены два положения источника. Первое положение соответствует центральной площади города (городской эспланаде), которая характеризуется низкой высотой поверхности и отсутствием зданий. Второе положение источника соответствует практически наивысшей точке макета – скверу внутри нового квартала высотных домов. На рис. 2 представлены карта исследуемой области и распо-

ложение системы координат (рис. 2, а), распределение плотности застройки  $\lambda p$  (рис. 2, б) и высоты поверхности  $H$  без учета высоты зданий (рис. 2, в). Плотность застройки  $\lambda p$  представляет собой отношение застроенной площади поверхности к общей площади рассматриваемой области, высота поверхности  $H$  измеряется от уровня моря. Области источника примеси на рис. 2 схематично обозначены кругами, цветными маркерами указана рассматриваемая область распространения. Высота рельефа местности для источника 1 – 108 м, для источника 2 – 138 м. Детализация плотности и высоты зданий – 60 м в реальном масштабе, размер всей области 2.2×2.1 км.

В случае протяженного источника примеси моделировалось распространение выхлопных газов при автомобильной пробке. Выхлопные газы – это неоднородная смесь различных газообразных веществ, большинство из которых токсичны [12]. Одним из основных компонентов выхлопных газов является диоксид углерода. При этом плотная застройка вблизи основных транспортных узлов и торговых центров образует глубокие каналы, которые ограничивает вентиляцию воздуха и удаление загрязняющих веществ. Правильное проектирование городских улиц может существенно улучшить процесс рассеивания выбросов. Для уже существующих улиц широко распространенной стратегией для улучшения качества воздуха является создание ограждений [13]. Введение одностороннего трафика также может улучшить экологическую ситуацию на дорогах [14]. В данной работе мы рассмотрели распространение тяжелой примеси от протяженного источника в условиях сложного рельефа местности. Протяженный источник примеси расположен вдоль основной автомобильной магистрали г. Пермь – Комсомольского проспекта (рис. 3). Источник представляет собой ПВХ трубку диаметром 5 мм, имеющую ряд отверстий диаметром около половины миллиметра и соединенную с сосудом Мариотта, содержащего примесь. Использование сосуда Мариотта позволяет добиться постоянного расхода примеси из отверстий. Расположение источника примеси указано на рис. 3 серым цветом, черной рамкой обозначена область наблюдений.

В качестве примеси был использован водный раствор NaCl массовой концентрации 20% (моделируется 8%-ная смесь диоксида углерода и воздуха). Для визуализации течения примесь была подкрашена водорастворимым красителем. Процесс распространения примеси снимался на видеокамеру YI LITE, частота съемки 30 кадров в секунду, разрешение 3 рix/мм (в реальном масштабе около 1 рix/м). При локализованном источнике примеси объем вводимого в среду раствора был равен 1 мл, в реальных условиях данный объем примеси заполнит объем 1.6×200×200 м<sup>3</sup>. Примесь вводилась в среду только за счет силы тяжести, без

дополнительного внешнего давления. Оценка управляющих параметров для реальной среды выполнена с использованием турбулентных коэффициентов переноса. Движение примеси в среде происходит за счет процесса диффузии и гравитационной конвекции, которая неизбежно возникает вследствие разницы плотностей. При этом, как правило, диффузионные времена оказываются существенно больше конвективных. В данной работе мы полагаем, что основное движение примеси обусловлено исключительно конвекцией, и в качестве безразмерного параметра используем диффузионное число Грасгофа  $Gr_D$ , которое определяет ее интенсивность:

$$Gr_D = \frac{g\beta_c L^3 \Delta C}{\nu^3},$$

где  $g$  – модуль вектора гравитационного ускорения,  $\beta_c$  – коэффициент изменения плотности за счет концентрации,  $L$  – характерный размер,  $\Delta C$  – перепад концентрации,  $\nu$  – кинематическая вязкость. Для случая распространения примеси в атмосфере вместо кинематической вязкости воздуха был взят ее турбулентный аналог  $\nu_t$ . Значение коэффициента  $\beta_c$  соответствует смеси воздух/диоксид углерода для случая атмосферы и водным растворам NaCl для случая лабораторного эксперимента соответственно. Таблица содержит значения всех перечисленных величин.



Рис. 3. Макет города Пермь, расположение протяженного источника примеси обозначено серым, черным цветом обозначена область наблюдений

Физические параметры модели

Параметр	Эксперимент	Атмосфера
$g$ , м/с <sup>2</sup>	9.8	9.8
$\beta_c$	0.76	0.52
$L$ , м	100	0.025
$\Delta C$ , %	20	0.06-8
$\nu/\nu_t$ , м <sup>2</sup> /с	10 <sup>-6</sup>	1-5
$Gr_D$	0.3·10 <sup>5</sup>	0.006 – 0.8·10 <sup>5</sup>

Для случая протяженного источника примеси раствор подается непрерывно в ходе всего эксперимента. Скорость движения жидкости вблизи источника примеси по всей длине трубки составляет около 1.5 мм/с.

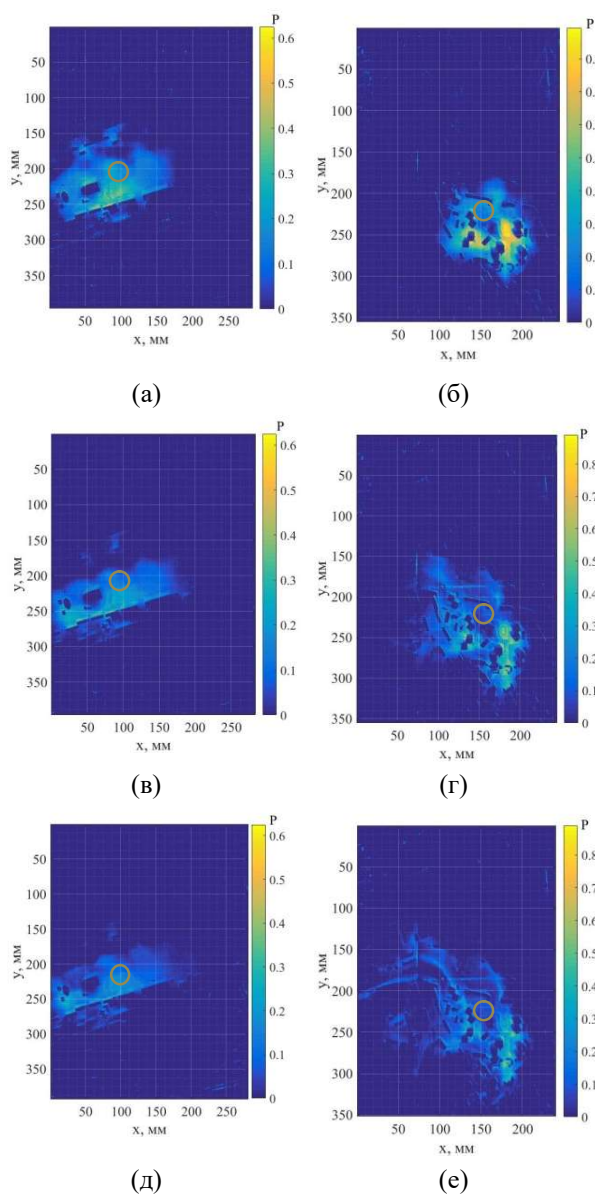


### 3. Результаты

На рис. 4 представлена визуализация течения спустя  $t = 10, 120$  и  $300$  с после введения раствора для локализованных источников примеси. Величина  $P$  является относительной и определяется следующим образом:

$$P = \frac{I_0 - I}{I_0},$$

где  $I_0$  – значение пикселей начального кадра видео в отсутствие примеси,  $I$  – значение пикселей соответствующего кадра видео. Фактически, значения матрицы  $P$  равны доле примеси, приходящуюся на точку области.



**Рис. 4** Визуализация течения спустя: а, б –  $t = 10$  с; в, з –  $t = 120$  с; д, е –  $t = 300$  с после введения раствора; положение источника: а, в, д – 1; б, з, е – 2

Видно, что максимальные значения концентрации примеси отличаются для различных положений источника. Это согласуется с работами [4–6], где показано, что наличие зданий препятствует рассеиванию примеси. Однако, в нашем случае, наибольший вклад в процесс распространения вносит рельеф поверхности. Для открытой местности, расположенной в низине (положение 1), примесь беспрепятственно заполняет свободное пространство. Надо заметить, что концентрация примеси при этом заметно снижается. Мы предполагаем, что это связано с тем, что конвективные течения увлекают жидкость из вышележащих слоев и в ходе перемешивания средняя концентрация примеси уменьшается. Можно заметить, что примесь не проникает в жилые кварталы, расположенные выше источника. Также интересно, что здесь эффект наличия зданий оказывает благоприятный эффект, так как здания дополнительно блокируют примесь от проникновения вглубь.

Второй источник был расположен на возвышении и окружен группой высотных зданий. Примесь движется сверху вниз, при этом наличие препятствий приводит к возникновению преимущественных путей распространения – за зданиями формируются шлейфы примеси, которые тянутся далеко вглубь макета. В области плотной застройки происходит образование застойных зон, в которых доля примеси даже спустя длительное время остается на высоком уровне.

На рис. 5 представлено распределение примеси в случае протяженного источника для различных промежутков времени после начала введения раствора. На рис. 6 представлена зависимость площади поверхности, занимаемой примесью от времени для различной высоты поверхности и плотности застройки. Площадь поверхности была нормирована на общую площадь рассматриваемой области. Кривые получены для областей с высотой поверхности меньшей и большей средней высоты рассматриваемой области, равной 130 м и различной плотности застройки (меньшей или большей 30%). Пространственное разрешение составляло 60 м в реальных масштабах.

В случае протяженного источника примеси, плотность застройки и высота поверхности оказывают комплексное воздействие. В первую очередь, примесь стремится заполнить наиболее низкие участки рельефа, на которых отсутствуют постройки. Плотная застройка ( $\lambda p > 0.3$ ) мешает распространению примеси, что неизбежно приводит к возникновению застойных зон вблизи зданий. Заполнив наиболее «выгодные» положения, распространение примеси замедляется и дальнейшее заполнение происходит только за счет медленных диффузионных процессов.

Можно заметить, что примесь распространяется только по левую сторону от источника загрязнений. Это связано с тем, что часть макета справа расположена на небольшом возвышении, при этом

здания расположены очень плотно, что также способствует блокированию примеси.

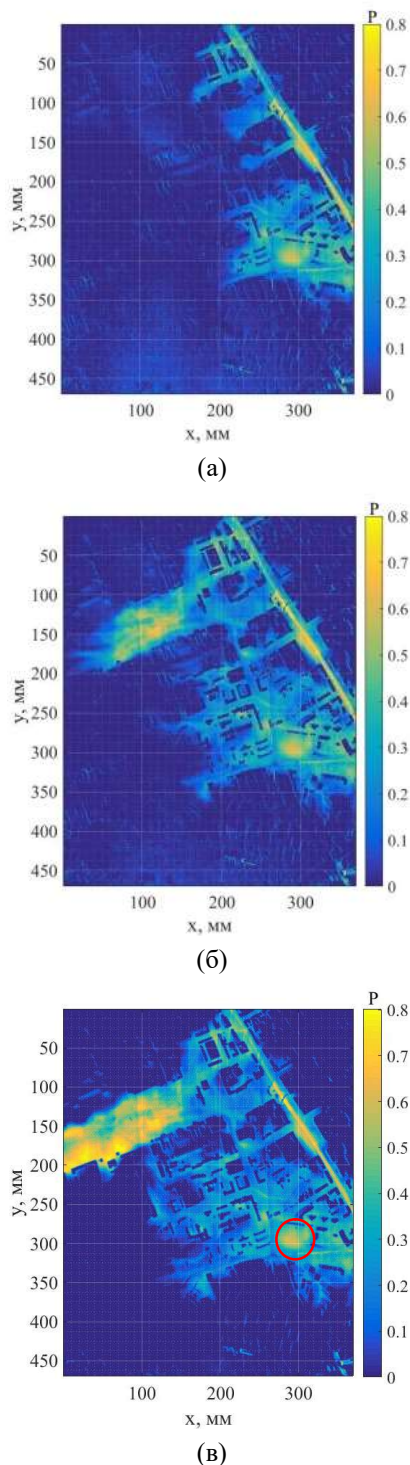


Рис. 5 Визуализация течения спуска: а – 100, б – 200; в – 300 с после начала введения раствора для протяженного источника примеси

Особый интерес представляет область, отмеченная красным маркером. Здесь наблюдается один из максимумов примеси, несмотря на то, что данная область находится на возвышении. Можно

предположить, что, как и в работе [8], особое расположение зданий вблизи данной области приводит к формированию застойной зоны, где накапливается примесь. Данная область соответствует спортивному стадиону «Динамо», который используют не только для проведения различных спортивных соревнований и спортивно-массовых мероприятий, но и для масштабных праздников в любое время года.

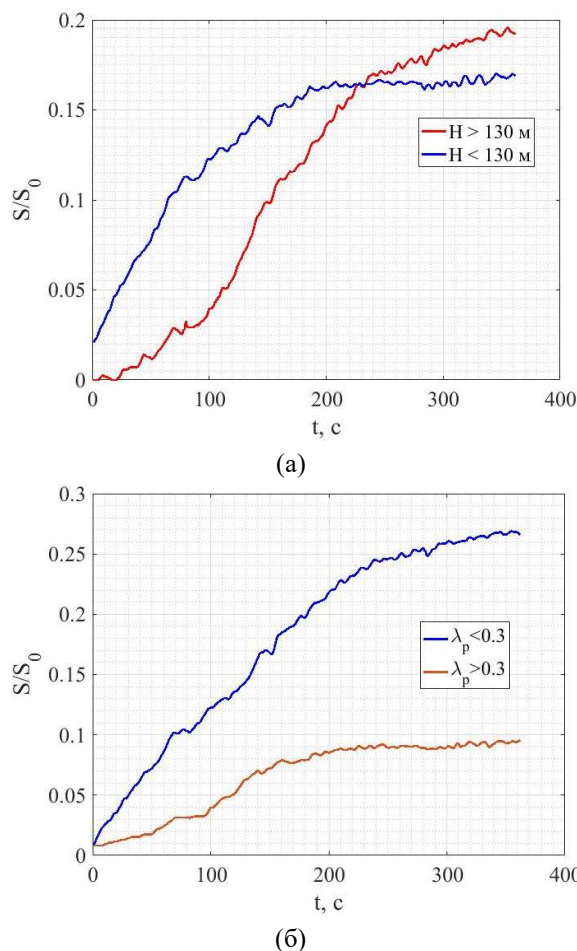


Рис. 6. Зависимость площади, занимаемой примесью, от времени для различной: а – высоты поверхности; б – плотности застройки

#### 4. Заключение

В работе рассмотрено распространение тяжелой примеси от локализованных и протяженных источников загрязнения. В качестве объекта исследования использован макет части г. Пермь. Макет воспроизводит рельеф местности, высоту и расположение зданий на площади около 5 км<sup>2</sup>. Макет помещался в герметичный контейнер, заполненный водой. В качестве примеси использованы водные растворы NaCl. Параметров эксперимента подбирались таким образом, чтобы управляющие параметры в лабораторном экспе-

рименте и эффективные управляющие параметры в реальных условиях были сравнимы.

Для локализованных источников примеси было показано, что рельеф местности играет существенную роль в динамике распространения. Примесь стремится заполнить наиболее низко расположенные участки рельефа. В областях, свободных от зданий, конвективные течения увлекают жидкость из вышележащих слоев и в ходе перемешивания средняя концентрация примеси уменьшается. Наличие зданий приводит к возникновению шлейфов примеси и образованию застойных зон.

В случае протяженного источника примеси обнаружено комплексное воздействие рельефа местности и сложной застройки. Показано, что увеличение плотности застройки влияет на общую площадь фронта примеси. Также обнаружено, что взаимное расположение зданий может приводить к формированию крупномасштабных застойных зон, сравнимых с размером квартала.

Работа выполнена при поддержке программы АААА-А19-119012290101-5 и стипендии президента РФ для аспирантов и молодых ученых (СП-1404.2021.1)

### Список литературы

1. Tanaka S., Murata S. An investigation of the wake structure and aerodynamic characteristics of a finite circular cylinder // *JSME Int. J.* 1999. Vol. 42. N. 2. P. 178–187.
2. Wang H., Zhou Y. The finite-length square cylinder near wake // *J. Fluid Mech.* 2009. Vol. 638. P. 453–490.
3. Wang H., Zhou Y., Chan C., Lam K. S. Effect of initial conditions on interaction between a boundary layer and a wall-mounted finite-length-cylinder wake // *Phys. Fluids*. 2006. Vol. 18. N. 6, 065106.
4. Coceal O., Thomas T. G., Castro I. P., Belcher S. E. Mean flow and turbulence statistics over groups of urban-like cubical obstacles // *Boundary-Layer Meteorology*. 2006. Vol. 121. P. 491–519.
5. Cheng H., Hayden P., Robins A. G., Castro I. P. Flow over cube arrays of different packing densities // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 2007. Vol. 95. P. 715–740.
6. Wangsawijaya D. D., Nicolai C., Ganapathisubramani B. Time-averaged velocity and scalar fields of the flow over and around a group of cylinders: a model experiment for canopy flows // *Flow*. 2022. V. 2, E9.
7. Carpentieri M., Robins A. L. Influence of urban morphology on air flow over building arrays // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 2015. Vol. 145. P. 61–74.
8. Meshkova V. D., Dekterev A. A., Gavrilov A. A., Filimonov S. A., Litvintsev K. Yu. Calculation of

wind flows in residential areas and assessment of their impact on pedestrian comfort // *J. Phys.: Conf. Series*. 2020. Vol. 1677, 012020.

9. Lim H. D., Hertwig D., Grylls T., Gough H., Reeuwijk M. V., Grimmond S., Vanderwel C. Pollutant dispersion by tall buildings: Laboratory experiments and Large-Eddy Simulation // *Exp. Fluids*. 2022. Vol. 63. N. 6, 92.
10. Евграфова А., Сухановский А. Impact of complex relief on heat transfer in urban area // *Urban Climate*. 2022. Vol. 43, 101177.
11. Квашигин И. М., Гурин И. И. К вопросу о нормировании воздухообмена по содержанию CO<sub>2</sub> в наружном и внутреннем воздухе // *АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплотехника*. 2008. Т. 5. С. 34–39.
12. Шаролазов Б. А., Фарафонов М. Ф., Клементьев В. В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. 344 с.
13. Huang Y., Lei C., Liu C. H., Perez P., Forehead H., Kong S., Zhou J. L. A review of strategies for mitigating roadside air pollution in urban street canyons // *Environmental Pollution*. 2021. Vol. 280, 116971.
14. Kastner-Klein P., Fedorovich E., Rotach M. W. A wind tunnel study of organised and turbulent air motions in urban street canyons // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 2001. Vol. 89. N. 9. P. 849–861.

### References

1. Tanaka S., Murata S. An investigation of the wake structure and aerodynamic characteristics of a finite circular cylinder. *JSME Int. J.*, 1999, vol. 42, no. 2, pp. 178–187.
2. Wang H., Zhou Y. The finite-length square cylinder near wake. *J. Fluid Mech.*, 2009, vol. 638, pp. 453–490.
3. Wang H., Zhou Y., Chan C., Lam K. S. Effect of initial conditions on interaction between a boundary layer and a wall-mounted finite-length-cylinder wake. *Phys. Fluids*, 2006, vol. 18, no. 6, 065106.
4. Coceal O., Thomas T. G., Castro I. P., Belcher S. E. Mean flow and turbulence statistics over groups of urban-like cubical obstacles. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, vol. 121, pp. 491–519.
5. Cheng H., Hayden P., Robins A. G., Castro I. P. Flow over cube arrays of different packing densities. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 2007, vol. 95, pp. 715–740.
6. Wangsawijaya D. D., Nicolai C., Ganapathisubramani B. Time-averaged velocity and scalar fields of the flow over and around a group of cylinders: a model experiment for canopy flows. *Flow*, 2022, vol. 2, E9.
7. Carpentieri M., Robins A. L. Influence of urban morphology on air flow over building arrays.

- J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 2015, vol. 145, pp. 61–74.
8. Meshkova V. D., Dekterev A. A., Gavrilov A. A., Filimonov S. A., Litvintsev K. Yu. Calculation of wind flows in residential areas and assessment of their impact on pedestrian comfort. *J. Phys.: Conf. Series*, 2020, vol. 1677, 012020.
  9. Lim H. D., Hertwig D., Grylls T., Gough H., Reeuwijk M. V., Grimmond S., Vanderwel C. Pollutant dispersion by tall buildings: Laboratory experiments and Large-Eddy Simulation. *Exp. Fluids*, 2022, vol. 63, no. 6, 92.
  10. Evgrafova A., Sukhanovskii A. Impact of complex relief on heat transfer in urban area. *Urban Climate*, 2022, vol. 43, 101177.
  11. Kvashnin I. M., Gurin I. I. К вопросу о нормировании воздухообмена по содержанию CO<sub>2</sub> в наружном и внутреннем воздухе [On the problem of normalizing air exchange by CO<sub>2</sub> content in the outdoor and indoor air]. *AVOK: Ventilatsiia, otoplenie, konditsionirovanie vozdukh, teplosnabzhenie i stroitel'naia teplofizika* [Ventilation, Heating, Air Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics], 2008, vol. 5, pp. 34–39 (In Russian).
  12. Sharoglavov B. A. Farafontov M. F., Klement'ev V. V. *Dvigateli vnutrennego sgoraniia: teoriia, modelirovanie i raschet protsessov* [Internal Combustion Engines: Theory, Modeling and Calculation of Processes]. Chelyabinsk: South Ural State University, 2006. 344 p. (In Russian).
  13. Huang Y., Lei C., Liu C. H., Perez P., Forehead H., Kong S., Zhou J. L. A review of strategies for mitigating roadside air pollution in urban street canyons. *Environmental Pollution*, 2021, vol. 280, 116971.
  14. Kastner-Klein P., Fedorovich E., Rotach M. W. A wind tunnel study of organised and turbulent air motions in urban street canyons. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 2001, vol. 89, no. 9, pp. 849–861.

**Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:**

Евграфова А. В., Сухановский А. Н. Конвективный перенос условной примеси в пределах городской геометрии // Вестник Пермского университета. Физика. 2023. № 2. С. 14–21. doi: 10.17072/1994-3598-2023-2-14-21

**Please cite this article in English as:**

Evgrafova A. V., Sukhanovskii A. N. Convective transfer of conditional admixture within urban geometry. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2023, no. 2, pp. 14–21. doi: 10.17072/1994-3598-2023-2-14-21

**Сведения об авторах**

1. Анна Валерьевна Евграфова, канд. физ.-мат. наук, н.с., Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614013.
2. Андрей Николаевич Сухановский, д. физ.-мат. н.; с.н.с., Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614013; профессор кафедры вычислительной и экспериментальной механики, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614990

**Author information**

1. Anna V. Evgrafova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia
2. Andrey N. Sukhanovskii, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia; Professor at the Department of Computational and Experimental Mechanics, Perm State University; 15, Bukireva st., 614990, Perm, Russia