

## Роль городской застройки в формировании “острова тепла”

В. Д. Мешкова<sup>1,\*</sup>, А. А. Дектерев<sup>1,2</sup>, К. Ю. Литвинцев<sup>2</sup>, С. А. Филимонов<sup>1,2</sup>,  
А. А. Гаврилов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет, 660041, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия

\*Контактный автор: Мешкова Виктория Дмитриевна, e-mail: [redel-vd@yandex.ru](mailto:redel-vd@yandex.ru)

Поступила 26 августа 2021 г., доработана 9 сентября 2021 г., принята в печать 20 сентября 2021 г.

Для оценки роли городской застройки в формировании “острова тепла” и исследования его влияния на распространение загрязняющих веществ разработана микромасштабная математическая модель городской среды. В качестве модельной задачи рассматривалось локальное влияние городской застройки микрорайона г. Красноярск. Установлено, что наибольший вклад в формирование “острова тепла” вносят наружные стены зданий и их верхние конструкции — крыши. При учете теплообмена наблюдаются рост средней скорости воздушного потока внутри квартала и уменьшение низкоскоростных областей более чем на 0.5 м/с. Также выявлено, что при учете теплообмена наблюдается заброс загрязняющих веществ, поступающих от дороги, на большую высоту, чем без него. Разработанная математическая модель позволяет комплексно подойти к исследованию гидродинамики и прогнозированию экологической обстановки урбанизированных территорий.

*Ключевые слова:* гидродинамика, аэрационный режим, микроклимат городской среды, численное моделирование, SigmaFlow, конвективное движение, теплообмен.

*Цитирование:* Мешкова В.Д., Дектерев А.А., Литвинцев К.Ю., Филимонов С.А., Гаврилов А.А. Роль городской застройки в формировании “острова тепла”. Вычислительные технологии. 2021; 26(5):4–14. DOI:10.25743/ICT.2021.26.5.002.

### Введение

Сегодня большая часть населения проживает в городских агломерациях. Разрастание городской среды происходит за счет освоения близлежащих территорий, а также путем присоединения сел и деревень, что приводит к росту численности городского населения. В связи с этим возникает потребность в дополнительной площади для жилой застройки, которая не только отвечала бы требованиям безопасности, но и была комфортной. Для решения данной проблемы активизировалась строительная отрасль. Появившееся многообразие строительных технологий позволило на относительно небольших территориях размещать высотные здания и максимально уплотнять застройку.

В результате формирования городов происходит преобразование природного ландшафта и природно-климатических условий территорий. В первую очередь трансформи-

руются естественный аэрационный режим, так как воздушные потоки, проходящие через город, меняют свои направление и скорость. Конфигурация современных микрорайонов приводит к настолько существенному ослаблению силы ветра внутри застройки, что повторяемость штилей возрастает в три раза [1]. В результате формируются застойные участки, где скорость воздушных потоков менее 1 м/с и аккумулируются загрязняющие вещества. Также образуются и зоны с повышенными скоростями ветра (как правило, между высотными зданиями — “эффект Вентури” [2]), приводящие к формированию дискомфортных условий для пребывания людей из-за нежелательного вертикального подъема пыли, а в зимний период — к возникновению локальных снеговых бурь и неблагоприятному снегопереносу. Кроме того, в результате строительства зданий, сооружений и развития инфраструктурных элементов естественная поверхность земли покрывается материалами, активно поглощающими солнечное излучение. На основании этого застройку необходимо рассматривать как дополнительный источник тепла, который также влияет на изменение общего теплового баланса города.

Одновременно с появлением новых жилых микрорайонов развивается инфраструктура города, происходит рост автомобилизации населения. Автомобильный транспорт является главным средством передвижения горожан, следовательно, в жилых районах транспортная инфраструктура очень развита и дает возможность перемещаться практически по всему городу. Поэтому автотранспорт следует рассматривать как основной передвижной источник загрязняющих атмосферу веществ в городской среде. Примечательно, что температура выбрасываемой автомобильным транспортом газовой смеси составляет порядка 760–980 °С и большая часть от всей выделившейся при сжигании углеводородного топлива теплоты поступает в приземный слой атмосферы, что и приводит к ее “тепловому загрязнению” [3, 4].

В конечном итоге, приведенные факторы вызывают трансформацию городской среды, которая сопровождается изменением аэрационного и теплового режима, что в совокупности приводит к формированию неблагоприятных экологических условий для жизнедеятельности населения.

В связи с этим в области градостроительного проектирования возникает потребность в современных методах, которые позволили бы произвести качественный анализ параметров окружающей среды (ОС) для принятия корректных решений по улучшению условий жизни населения.

Широкое применение для решения задач формирования комфортной городской застройки получили методы вычислительной гидродинамики (Computation Fluid Dynamics — CFD). Уникальность CFD-моделей заключается в том, что они позволяют связать теплофизические и пространственные аспекты микроклимата в одной математической модели и осуществить его всесторонний анализ. Появляется возможность получения пространственной информации по динамике полей скорости распространения загрязняющих веществ и их концентрации, а также рассмотрения различных типов застройки для сравнения и оптимизации ветровых ситуаций [5]. Данный метод активно применяется многими исследователями для изучения аэрационного режима в жилых районах и механизмов распространения выбросов от автомобильного транспорта, а также для оценки теплового баланса застройки жилых микрорайонов [6–8].

Настоящая работа посвящена изучению локального влияния городской застройки на распространение загрязняющих веществ и формирование городского “острова тепла” с помощью адаптированного под данный класс задач программного комплекса SigmaFlow [9].

# 1. Описание математической модели и программного комплекса SigmaFlow

## 1.1. Математическая модель

Микромасштабная математическая модель атмосферы города основывается на осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье–Стокса для несжимаемых течений с переменной плотностью. Система уравнений для осредненных метеорологических величин включает:

- уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0, \quad (1)$$

- уравнение движения

$$\rho \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} = -\nabla p + (\rho - \rho_{ref})g + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T)] + \nabla \cdot \mathbf{T}_t, \quad (2)$$

- уравнение сохранения энергии, которое записывается через потенциальную температуру:

$$\rho C_p \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \nabla \cdot \left[ \left( \lambda + \frac{\mu_t}{C_p} \text{Pr} \right) \nabla \Theta \right] + S_\Theta. \quad (3)$$

Здесь  $\partial/\partial t$  — субстанциональная производная;  $p$  — осредненное давление;  $\mathbf{U}$  — вектор скорости;  $\rho_{ref}$  — характерная плотность;  $\Theta$  — потенциальная температура;  $\mu$  — динамическая вязкость;  $\mathbf{T}_t$  — тензор рейнольдсовых напряжений смеси;  $S_\Theta$  — дополнительный тепловой источник (солнечное и тепловое излучение, заданные тепловые источники, обусловленные функционированием города, работой предприятий, тепловых и электрических станций). Связь потенциальной температуры с температурой описывается соотношением

$$\Theta = T \left( \frac{P_0}{P} \right)^{\frac{R}{C_p M}}. \quad (4)$$

Особенность разработанной микромасштабной математической модели заключается в том, что для корректного расчета температуры на поверхности земли реализована модель сопряженного теплообмена, включающая одномерное уравнение теплопроводности для поверхности земли и стен зданий. Из-за малого размера частиц и их низких концентраций, а также отсутствия взаимодействия между ними и слабого влияния на газовый поток реализована диффузионно-инерционная модель движения малоинерционных частиц [10].

Для замыкания уравнений при турбулентном режиме течения использовалась модель  $k - \omega$  SST (модель Ментера SST — Shear Stress Transport [11]). Дискретизация уравнения сохранения выполнена методом контрольного объема [12]. Модель переноса излучения рассматривалась как состоящая из коротковолнового солнечного излучения и длинноволнового излучения атмосферы и земли, которые при расчете рассматриваются независимо друг от друга [13]. В свою очередь, коротковолновое излучение подразделяется на прямое и рассеянное (диффузионное):

$$I_S = I_S^{Dir} + I_S^{Dif}. \quad (5)$$

Поток диффузионного излучения обусловлен рэлеевским рассеянием, рассеянием на аэрозолях прямого солнечного излучения и диффузионным отражением поверхностями

прямого и рассеянного солнечного излучения. Величина потока солнечного излучения зависит от географических координат, времени года и суток, альбедо и ориентации в пространстве принимающей поверхности, метеоусловий [14].

## 1.2. Программный комплекс

Для моделирования использовался некоммерческий универсальный программный комплекс SigmaFlow. Он включает в себя модуль формирования расчетной сетки, модуль задания параметров математической модели и граничных условий, расчетный модуль, модуль анализа результатов моделирования. Программный комплекс позволяет исследовать широкий класс задач, относящихся к гидродинамическим и теплофизическим процессам, поддерживает параллельные вычисления на современных многоядерных процессорах и кластерных системах. SigmaFlow позволяет моделировать стационарные и нестационарные течения жидкости и газа, ламинарные и турбулентные течения с использованием как RANS (Reynolds-averaged Navier – Stokes), так DNS, LES и гибридных моделей турбулентности [15–17].

## 2. Численное моделирование формирования городского “острова тепла” на примере жилого квартала

### 2.1. Постановка задачи

В качестве модельной задачи для изучения локального влияния городской застройки рассматривался микрорайон г. Красноярска с плотной застройкой и полузакрытыми дворовыми территориями, а также с наличием высотного и малоэтажного зданий (рис. 1). В качестве начальных условий для численного моделирования принята ясная безоблачная погода, скорость набегающего потока на высоте 10 м составляла 3 м/с. Рассматривается линейное распределение потенциальной температуры со скоростью нарастания по высоте 3 °С/км. Температура внутри зданий составляла 20 °С.

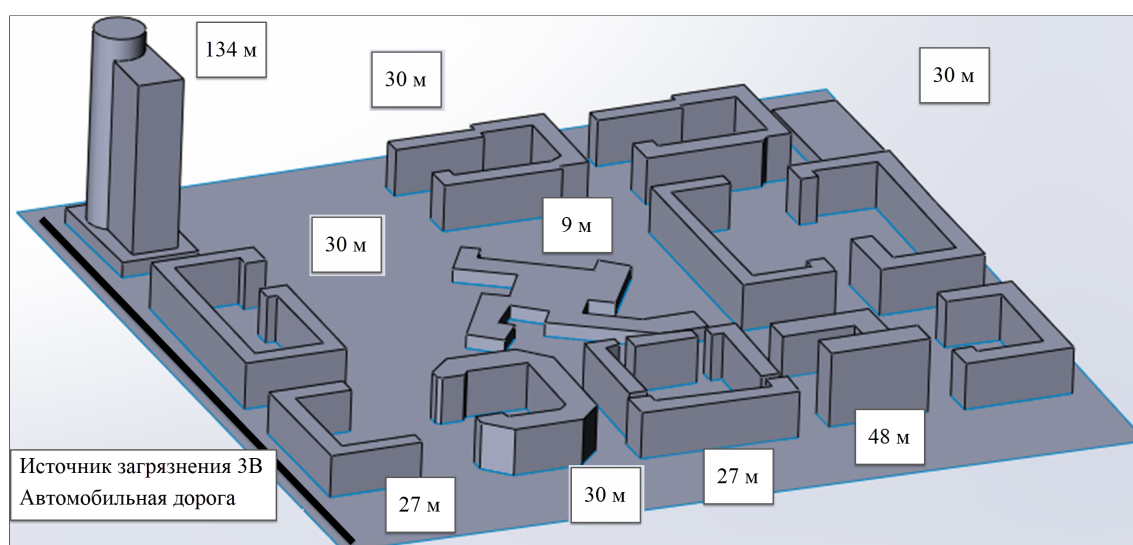


Рис. 1. Геометрия исследуемого района с характерными размерами зданий  
Fig. 1. Geometry of the district under study

Выполнено несколько вариантов расчета:

- вариант 1 — без учета солнечного излучения и теплообмена с поверхностью;
- вариант 2 — с учетом солнечного излучения и теплообмена с поверхностью в летний период времени;
- вариант 3 — с учетом солнечного излучения и теплообмена с поверхностью в осенний период времени;
- вариант 4 — с учетом солнечного излучения и теплообмена с поверхностью в зимний период времени.

В зависимости от времени года изменялись распределение по высоте потенциальной температуры и входящего воздушного потока вблизи поверхности, а также материал подстилающей поверхности (зима — грязный снег, лето — земля). В зимний период значение альбедо поверхности земли больше, чем зданий, в осенний период значения рассматриваемых поверхностей равны, а в летний наоборот.

## 2.2. Анализ результатов численного исследования

Для количественного анализа рассматривался суммарный поток солнечного излучения. На рис. 2 представлены результаты расчета, из которых следует, что максимальное

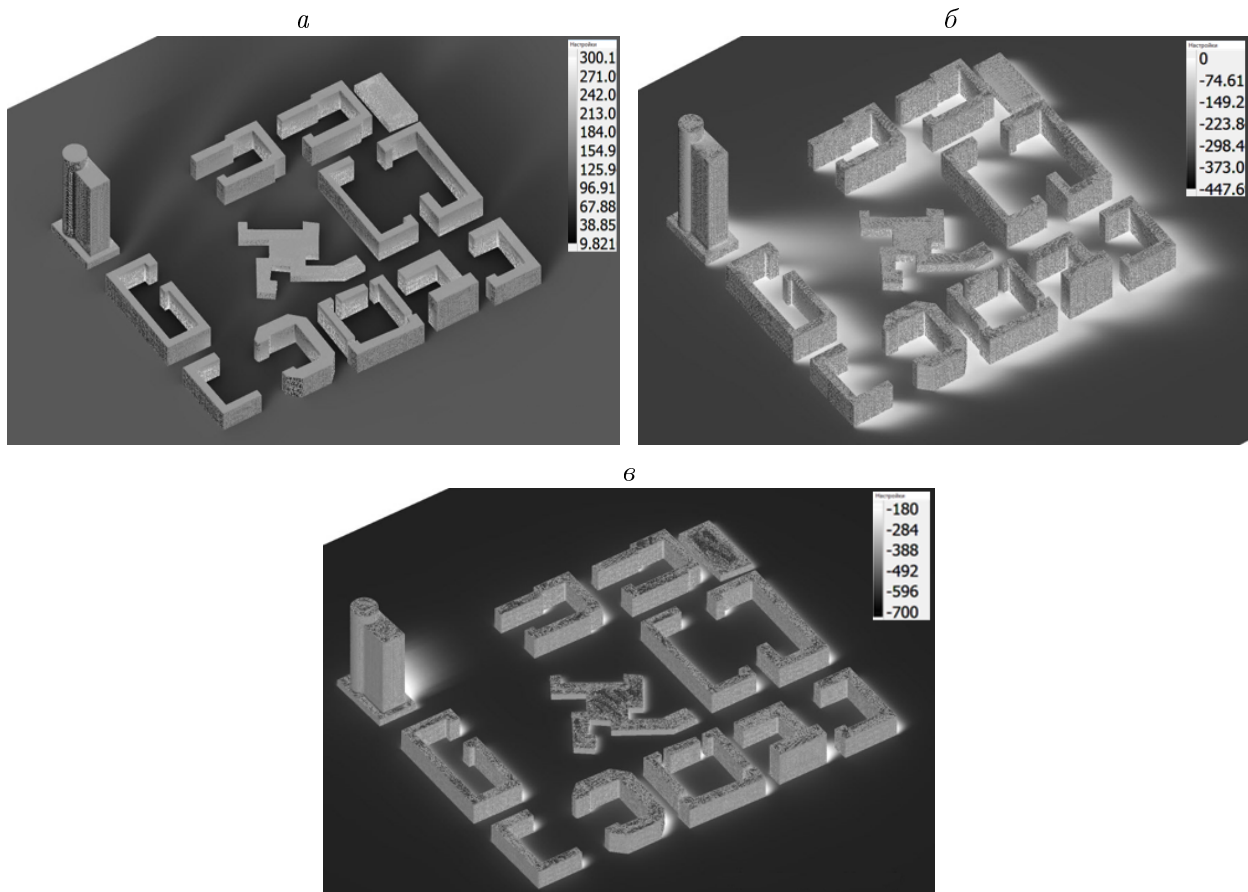


Рис. 2. Поток солнечного излучения в полдень для разных вариантов расчета: *a* — зима (1 февраля); *б* — осень (1 апреля); *в* — лето (20 июня)

Fig. 2. Sunshine flux at noon for various options: *a* — winter (February 1); *б* — autumn (April 1); *в* — summer (June 20)

значение рассматриваемого параметра достигается в летний период, а в зимний оно минимально.

В разные времена года солнце имеет разную высоту расположения на небосклоне. На основании этого наблюдается максимальное прогревание горизонтальной поверхности в полдень осеннего и летнего периодов, а зимой отмечается тот же эффект, но уже на вертикальной поверхности, что в целом сильно влияет на общий теплообмен.

Особый интерес вызывает формирование теплового острова над городом в зимний период, так как в атмосфере появляются дополнительные источники тепла от стен зданий, которые, как правило, воспринимают основной поток солнечного излучения. Из результатов расчета видно, что зимой максимальная температура наблюдается на незатененных поверхностях стен зданий, так как они находятся практически под прямыми солнечными лучами (рис. 2, *а*). Обратная ситуация отмечена в летний и осенний периоды, т. е. основные поверхности, которые воспринимают солнечное излучение, — земная поверхность и крыши зданий (рис. 2, *б, в*), а вклад стен в нагрев атмосферы существенно меньше.

Максимальный прогрев стен наблюдается у первого ряда зданий со стороны набегающего потока и малоэтажного здания (9 м), расположенного в центре района, и составляет порядка 10 °С относительно температуры окружающего воздуха. Этот эффект можно объяснить тем, что в данном месте конвективное охлаждение минимально за счет максимального торможения потока (рис. 2). В то же время перед высотным зданием (134 м) формируется зона более низких температур по отношению к другим. Это связано с тем, что скорость набегающего потока возрастает за счет сужения области движения, происходит поджимание воздушного потока, наблюдается “эффект Вентури”, что в конечном счете приводит к более значительному отводу тепла с поверхности стен.

Стоит отметить, что в зимний период высотное здание отбрасывает протяженную тень и часть квартала, которая расположена за ним, прогревается хуже (рис. 2, *а*). В летний и осенний периоды наблюдаемые эффекты не имеют столь выразительного характера, так как отсутствует существенный перепад температур между источниками воздействия и окружающей средой (рис. 2, *а, б*).

В конечном счете, наличие солнечного излучения приводит к интенсификации свободно конвективного движения, особенно в приземном слое, где увеличение скорости воздушного потока может быть двукратным по сравнению с решением без теплообмена из-за прогрева воздуха более горячими поверхностями земли и зданий.

Структура течения в горизонтальной приземной плоскости рассматриваемой застройки имеет весьма сложный характер. Как за зданиями, так и между ними образуются различные вихревые зоны, и в случае наличия или отсутствия теплообмена их форма, протяженность, интенсивность изменяются. Особенно это заметно на примере формирования рециркуляционной зоны за малоэтажным зданием. При рассмотрении результатов расчета с теплообменом в рассматриваемой зоне отмечается формирование одного устойчивого вихря, в то время как в результате рассмотрения той же зоны без учета теплообмена наблюдается распад одного более крупного вихря на два более мелких.

В целом на высоте роста человека (2 м), если не учитывать теплообмен, застройка выступает в роли гасителя скорости ветра, уменьшая ее относительно скорости набегающего потока, кроме области вблизи высотного здания (134 м), где наблюдается локальное ускорение из-за описанной ранее особенности его обтекания. При учете теплообмена

подобного снижения скорости на рассматриваемой высоте не наблюдается, что особенно хорошо видно при сравнении поля скорости за кварталом. При учете теплообмена наблюдаются рост средней скорости внутри квартала и уменьшение низкоскоростных областей (менее 0.5 м/с) и, соответственно, снижение комфортности для людей. Другое важное различие между рассматриваемыми вариантами заключается в формировании низкоскоростного восходящего потока — городского острова тепла (рис. 3).

Помимо формирования аэрационного режима в городском квартале рассмотрено распространение загрязняющих веществ от прилегающей автомобильной дороги. В качестве загрязняющих веществ приняты взвешенные пылевые частицы диаметром 2.5 мкм. Кроме пылевых частиц в окрестности дороги задавался дополнительный источник тепла, обусловленный работой автомобильного транспорта. На основании выполненных расчетов было выявлено, что формирование городского острова тепла при-

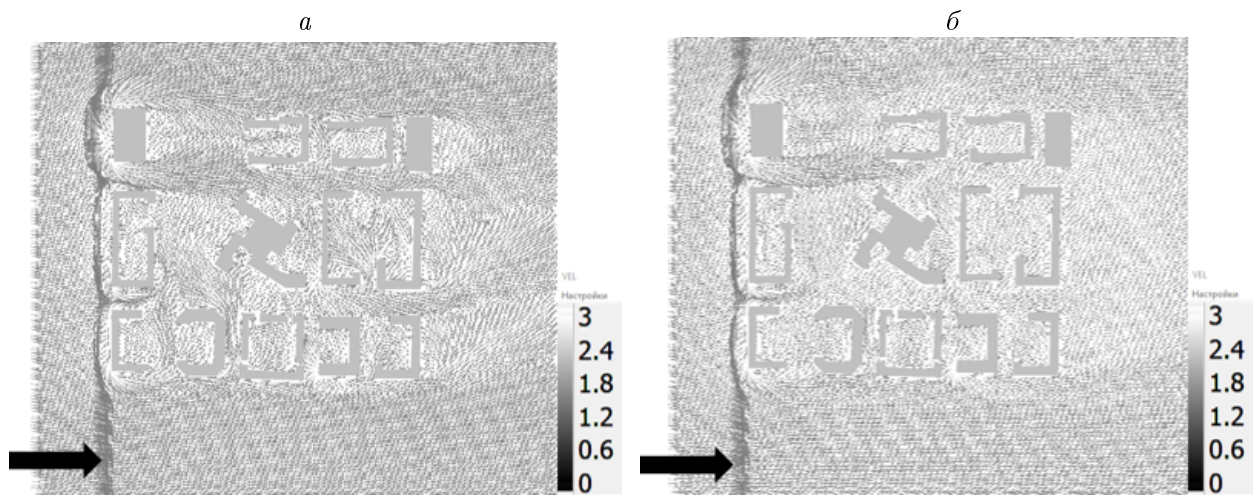


Рис. 3. Векторное поле скорости воздушного потока в горизонтальном сечении на высоте 2 м (м/с): *а* — с учетом теплообмена; *б* — без учета теплообмена

Fig. 3. The vector velocity field in a horizontal section at the height of 2 m (m/s): *a* — heat transfer is taken into account; *b* — excluding heat transfer

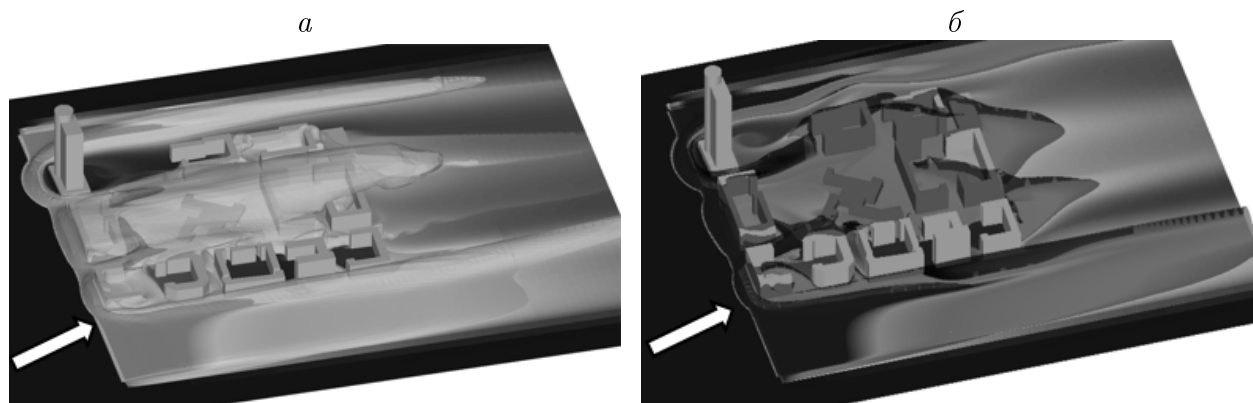


Рис. 4. Поле концентраций взвешенных пылевых частиц 2.5 мкм относительно концентрации на дороге (шкала: 0.0–1.0): *а* — с учетом теплообмена; *б* — без учета теплообмена

Fig. 4. The field of the relative concentration of suspended 2.5 microns solids (0.0–1.0): *a* — heat transfer is taken into account; *b* — excluding heat transfer

водит к забросу загрязняющих веществ, поступающих от дороги, на бóльшую высоту по сравнению с вариантом без учета теплообмена (рис. 4). Данный фактор и более высокие скорости воздушного потока в приземном слое приводят к тому, что уровень загрязнения на высоте 2 м с учетом солнечного излучения в целом меньше.

Необходимо отметить, что наиболее загрязненной является область за центральным зданием, которое располагается в первом ряду и имеет высоту 30 м. Основная причина наблюдаемого эффекта заключается в том, что именно над этим зданием наблюдается максимальный заброс загрязняющих веществ набегающим потоком, кроме того, за зданием отсутствуют высотные задания, что способствует осаждению частиц за ним (рис. 4).

## Заключение

Неоднородность элементов городской среды требует от модели не только предсказания турбулентной структуры потока, но и учета влияния городских элементов, природных и антропогенных факторов. Комплексный учет данных показателей позволит решать задачи, связанные с переносом атмосферных примесей внутри городской среды, оценить влияние застройки на формирование аэрационного режима и изменение теплового баланса территорий, что, в конечном счете, поможет установить, какой вклад вносит тот или иной элемент городской инфраструктуры в формирование комфортных и экологически безопасных условий для жизнедеятельности населения.

Полученный инструмент в виде разработанной микромасштабной математической модели позволил комплексно подойти к решению задач гидродинамики и прогнозирования экологической обстановки урбанизированных территорий.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансировании из Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках Целевого конкурса прикладных научных исследований, направленных на решение проблем городского развития по проекту № 2020080506564 “Исследование и оценка воздействия выбросов автотранспорта на городскую среду с помощью расчетно-экспериментального моделирования”.

## Список литературы

- [1] Mikhailuta S.V., Lezhenin A.A., Pitt A., Taseiko O.V. Urban wind fields: Phenomena in transformation. *Urban Climate*. 2017; (9):122–140. DOI:10.1016/j.uclim.2016.12.005. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7055320>.
- [2] Li B., Luo Z., Sandberd M., Liu J. Revisiting the “Venturi effect” in passage ventilation between two non-parallel buildings. *Building and Environment*. 2015; (94):714–722. DOI:10.1016/j.buildenv.2015.10.023.
- [3] Сердюкова А.Ф., Барабанщикова Д.А. Влияние автотранспорта на окружающую среду. Казань: Изд-во Молодой ученый; 2018: 374.
- [4] Roth M., Chow W.T.L. A historical review and assessment of urban heat island research in Singapore. *Journal of Tropical Geography*. 2012; (33):381–397. DOI:10.1111/sjtg.12003.



- 
- [5] **Дорошенко А.В.** Программа оценки аэродинамической комфортности в пешеходной зоне. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013; 5(76):100–102.
- [6] **Tominaga Y., Yoshie R., Mochida A., Kataoka H., Harito R., Kazuyoshi K., Nozi T.** Cross comparisons of CFD prediction for wind environment at pedestrian level around buildings. The Sixth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering (APCWE-V). Seoul, Korea, 2005: 12–14.
- [7] **Данилкин Е.А., Старченко А.В.** Моделирование распространения выбросов автомобильного транспорта в уличном каньоне. Вычислительные технологии. 2020; 25(2):4–21. DOI:10.25743/ICT.2020.25.2.002.
- [8] **Юшков В.П., Курбатова М.М., Варенцов М.И., Лезина Е.А., Курбатов Г.А., Миллер Е.А., Репина И.А., Артамонов А.Ю., Каллистратова М.А.** Моделирование городского острова тепла в период экстремальных морозов в Москве в январе 2017. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019; 55(5):13–31. DOI:10.31857/S0002-351555513-31-14347.
- [9] **Meshkova V.D., Filimonov S.A., Shebelev A.V.** Computational modeling of architectural and construction aerodynamics problems. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018; 456. DOI:10.1088/1757-899X/456/1/012079.
- [10] **Zaichik L.I., Drobyshevsky N.I., Filippov A.S., Mukin R.V., Strizhov V.F.** A diffusion-inertia model for predicting dispersion and deposition of low-inertia particles in turbulent flows. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010; (53):154–162.
- [11] **Патанкар С.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Изд-во Энергоатомиздат; 1984: 152.
- [12] **Menter F.R.** Zonal two equation  $k-\omega$  turbulence models for aerodynamic flows. AIAA Paper. 1993; 93(906):21. DOI:10.2514/6.1993-2906.
- [13] **Oke T.R.** Boundary layer climates. 2nd ed. Routledge Publishing House; 1987: 435.
- [14] **Psiloglou B., Santamouris M., Asimakopoulos D.** Atmospheric broadband model for computation of solar radiation at the Earth's surface. Application to mediterranean climate. Pure and Applied Geophysics. 2000; (157):829–860. DOI:10.1007/PL00001120.
- [15] **Литвинцев К.Ю., Филимонов С.А.** Использование схемы “бегущего счета” для решения СЛАУ, полученных на основе метода конечных объемов для уравнения теплового переноса излучения. Вычислительные технологии. 2017; 22(4):69–79.
- [16] **Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Минаков А.В.** Современные возможности CFD кода SigmaFlow для решения теплофизических задач. Сборник статей. Современная наука: Исследования, идеи, результаты, технологии. 2010; 4(2):117–122.
- [17] **Дектерев А.А., Литвинцев К.Ю., Гаврилов А.А., Харламов Е.Б., Филимонов С.А.** Свободно распространяемый программный комплекс SIGMA\_FW для моделирования гидродинамики и теплообмена. Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2017; 10(4):534–542.
-

## MATHEMATICAL MODELLING

DOI:10.25743/ICT.2021.26.5.002

**The role of urban development in the formation of a “heat island”**MESHKOVA VICTORIA D.<sup>1,\*</sup>, DEKTEREV ALEXANDR A.<sup>1,2</sup>, LITVINTSEV KIRILL YU.<sup>2</sup>,  
FILIMONOV SERGEY A.<sup>1,2</sup>, GAVRILOV ANDREY A.<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russia<sup>2</sup>S. S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia\*Corresponding author: Meshkova Victoria D., e-mail: [redel-vd@yandex.ru](mailto:redel-vd@yandex.ru)

Received August 26, 2021, revised September 9, 2021, accepted September 20, 2021.

**Abstract**

*Introduction.* The configuration of modern micro districts leads to the formation of zones with low velocity, in which the accumulation of pollutants occurs. On the other hand, during the construction of cities, the surface of the Earth is covered with materials that actively absorb solar radiation, which leads to the formation of an urban heat island. Our work is devoted to the study of the local influence of urban development on the spread of pollutants, which takes into account the above mentioned factors.

*Mathematical model.* For solving our problems we developed the microscale mathematical model based on the Reynolds-averaged Navier–Stokes equations for incompressible flows with variable density. For the correct calculation of the temperature on the surface of buildings, we used a model of conjugate heat transfer with a one-dimensional equation of thermal conductivity. As a model problem, we considered the Krasnoyarsk area with dense development and the presence of a high-rise building for two seasons: winter and summer. The source of emission of pollutants was traffic.

*Results.* The results of the calculations show a significant decrease in velocity around buildings. On the contrary, solar radiation leads to the intensification of free convective motion, especially in the surface area. That can double the near-surface velocity compared to the solution that does not account for the heat transfer.

*Conclusions.* The developed mathematical model allows a comprehensive approach to solving hydrodynamic problems of prediction the ecological situation of cities.

*Keywords:* hydrodynamics, aeration regime, urban microclimate, numerical modelling, SigmaFlow, convective motion, heat transfer.

*Citation:* Meshkova V.D., Dekterev A.A., Litvintsev K.Yu., Filimonov S.A., Gavrilov A.A. The role of urban development in the formation of a “heat island”. Computational Technologies. 2021; 26(5):4–14. DOI:10.25743/ICT.2021.26.5.002. (In Russ.)

**Acknowledgements.** The study was carried out with the financial support of the Krasnoyarsk Regional Fund for the Support of Scientific and Scientific and Technical Activities within the framework of the Targeted Competition of Applied Scientific Research aimed at solving the problems of urban development under the project No. 2020080506564 “Research and assessment of the impact of vehicle emissions on the urban environment using computational and experimental modeling”.

**References**

1. Mikhailuta S.V., Lezhenin A.A., Pitt A., Taseiko O.V. Urban wind fields: Phenomena in transformation. Urban Climate. 2017; (9):122–140. DOI:10.1016/j.uclim.2016.12.005. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7055320>.

2. **Li B., Luo Z., Sandberd M., Liu J.** Revisiting the “Venturi effect” in passage ventilation between two non-parallel buildings. *Building and Environment*. 2015; (94):714–722. DOI:10.1016/j.buildenv.2015.10.023.
3. **Serdyukova A.F., Barabanshchikova D.A.** Vliyanie avtotransporta na okruzhayushchuyu sredu [Impact of auto transport on the environment]. Kazan': Izdatel'stvo Molodoy uchenyy; 2018: 374. (In Russ.)
4. **Roth M., Chow W.T.L.** A historical review and assessment of urban heat island research in Singapore. *Journal of Tropical Geography*. 2012; (33):381–397. DOI:10.1111/sjtg.12003.
5. **Doroshenko A.V.** Pedestrian area aerodynamic comfort evaluation program. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2013; 5(76):100–102. (In Russ.)
6. **Tominaga Y., Yoshie R., Mochida A., Kataoka H., Harito R., Kazuyoshi K., Nozi T.** Cross comparisons of CFD prediction for wind environment at pedestrian level around buildings. *The Sixth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering (APCWE-V)*. Seoul, Korea, 2005: 12–14.
7. **Danilkin E.A., Starchenko A.V.** Modelling the transfer of road transport emissions in a street canyon. *Computational Technologies*. 2020; 25(2):4–21. DOI:10.25743/ICT.2020.25.2.002. (In Russ.)
8. **Yushkov V.P., Kurbatova M.M., Varentsov M.I., Lezina E.A., Kurbatov G.A., Miller E.A., Repina I.A., Artamonov A.Yu., Kallistratova M.A.** Modeling an urban heat island during extreme frosts in Moscow in January 2017. *Izvestiya RAN. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019; 55(5):13–31. DOI:10.31857/S0002-351555513-31-14347. (In Russ.)
9. **Meshkova V.D., Filimonov S.A., Shebelev A.V.** Computational modeling of architectural and construction aerodynamics problems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 456. DOI:10.1088/1757-899X/456/1/012079.
10. **Zaichik L.I., Drobyshevsky N.I., Filippov A.S., Mukin R.V., Strizhov V.F.** A diffusion-inertia model for predicting dispersion and deposition of low-inertia particles in turbulent flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010; (53):154–162.
11. **Patankar S.** Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti [Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics]. Moscow: Izdatel'stvo Energoatomizdat; 1984: 152. (In Russ.)
12. **Menter F.R.** Zonal two equation  $k-\omega$  turbulence models for aerodynamic flows. *AIAA Paper*. 1993; 93(906):21. DOI:10.2514/6.1993-2906.
13. **Oke T.R.** *Boundary layer climates*. 2nd ed. Routledge Publishing House; 1987: 435.
14. **Psiloglou B., Santamouris M., Asimakopoulos D.** Atmospheric broadband model for computation of solar radiation at the Earth's surface. Application to mediterranean climate. *Pure and Applied Geophysics*. 2000; (157):829–860. DOI:10.1007/PL00001120.
15. **Litvintsev K.Yu., Filimonov S.A.** The use of the “marching order” scheme for solving SLAE obtained on the basis of the finite volume method for the radiating heat transfer equation. *Computational Technologies*. 2017; 22(4):69–79. (In Russ.)
16. **Dekterev A.A., Gavrilov A.A., Minakov A.V.** Sovremennyye vozmozhnosti SFD koda SigmaFlow dlya resheniya teplofizicheskikh zadach. *Sbornik statey. Sovremennaya nauka: Issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii* [Modern capabilities of the SigmaFlow CFD code for solving thermophysical problems. Digest of Articles. Modern Science: Research, Ideas, Results, Technologies]. 2010; 4(2):117–122. (In Russ.)
17. **Dekterev A.A., Litvintsev K.Yu., Gavrilov A.A., Kharlamov E.B., Filimonov S.A.** Free software package SIGMA\_FW for numerical simulation of hydrodynamics and heat transfer. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2017; 10(4):534–542.