

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВЕТРОВЫХ ТЕЧЕНИЙ В ЖИЛОМ КВАРТАЛЕ

Антон Вячеславович Абрамов<sup>1</sup>, Ольга Анатольевна Пчеленок<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Российский государственный университет (РГУ) им. А.Н. Косыгина; г. Москва, Российская Федерация;

<sup>2</sup> Орловский государственный университет (ОГУ) им. И.С. Тургенева; г. Орел, Российская Федерация

*Показана роль численного моделирования как ведущего инструмента исследования ветровых течений на масштабах отдельных городских кварталов. На основе анализа математических моделей представлен перечень решаемых этим методом задач. Проведен анализ существующих численных моделей для расчета поля скоростей воздуха на различных масштабах с учетом жилой застройки. Показано, что большинство из них предполагает решение уравнения Навье – Стокса с дополнительными составляющими турбулентного переноса. Обоснована возможность использования модели  $k-\omega$  турбулентности Дж. Ферзингера для моделирования ветра на масштабе городских кварталов. Представлен обобщенный алгоритм построения таких численных моделей.*

*Составлена численная модель порывистого ветра в жилом квартале по ул. Картукова г. Орла. Для этого разработано его геометрическое представление, определены начальные и граничные условия модели. Предложена сетка конечных элементов, которая учитывает особенности движения потоков воздуха, в частности — гидродинамические пограничные слои. Получено проверочное решение, результаты которого сопоставлены с экспериментом. Установлено, что различия между ними могут быть признаны незначительными.*

*С помощью разработанной модели проведено численное исследование динамики поля скорости ветра в рамках рассматриваемого квартала во времени в условиях порывистого ветра итерационным численным методом. В результате установлен характер развития ветрового течения на рассмотренной территории во времени. При обобщении полученных результатов сформированы рекомендации по переносу отдельных зон при переустройстве придомовой территории в рамках ближайшего капитального ремонта на рассмотренном участке. В частности, рекомендовано перенести детскую игровую площадку, так как при смене погоды и формировании порывистого ветра на ней наблюдаются наиболее выраженные воздушные потоки.*

**Ключевые слова:** ветер, численное моделирование, жилищная застройка, рациональное планирование,  $k-\omega$  модель турбулентности, скорость воздуха, конвективная ячейка

**Для цитирования:** Абрамов А.В., Пчеленок О.А. Численное моделирование нестационарных ветровых течений в жилом квартале // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2024. № 4. С. 32–40. DOI: 10.22227/2311-1518.2024.4.32-40

## NUMERICAL SIMULATION OF UNSTEADY WIND CURRENTS IN A RESIDENTIAL AREA

Anton V. Abramov<sup>1</sup>, Olga A. Pchelenok<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Russian State University (RSU) named after A.N. Kosygina; Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup> Oryol State University (OSU) named after I.S. Turgenev; Orel, Russian Federation

*The role of numerical modeling as a leading tool for studying wind currents at the scale of individual city blocks is shown. An analysis of mathematical models is conducted, a list of problems solved by this method is presented. An analysis of existing numerical models for calculating the air velocity field at various scales is conducted, considering residential buildings. It is shown that most of them involve solving the Navier-Stokes equation with additional components of turbulent transfer. The possibility of using the  $k-\omega$  turbulence model of J. Ferzinger for modeling wind at the scale of city blocks is substantiated. A generalized algorithm for constructing such numerical models is presented. A numerical model of gusty wind in a residential area along Kartukova Street in Orel has been compiled. For this purpose, its geometric representation has been developed, initial and boundary conditions of the model have been determined. A finite element grid has been proposed that considers the features of air flow movement, in particular, hydrodynamic boundary layers. A verification solution has been obtained, the results of which have been compared with the experiment. It has been established that the differences between them can be recognized as insignificant.*

*Using the developed model, a numerical study of the wind speed field dynamics within the considered quarter over time under gusty wind conditions was carried out using the iterative numerical method. As a result, the nature of wind flow development in the considered territory over time was established. When generalizing the obtained results, recommendations were formed on the transfer of individual zones during the reconstruction of the adjacent area within the framework of the nearest major repairs in the considered territory. In particular, it is recommended to transfer the children's playground, since when the weather changes and gusty winds form, the most pronounced air flows are observed there.*

**Keywords:** wind, numerical modeling, residential development, rational planning,  $k-\omega$  turbulence model, air velocity, convective cell

**For citation:** Abramov A.V., Pchelenok O.A. Numerical simulation of unsteady wind currents in a residential area. Biosphere Compatibility: Man, Region, Technology. 2024; 4:32-40. DOI: 10.22227/2311-1518.2024.4.32-40 (rus.).

### Актуальность задачи исследования ветровых течений в жилых кварталах

Одним из важнейших аспектов жизнедеятельности человека является необходимость обеспечения рационального биоклимата как совокупности факторов, действующих на рассматриваемой территории в определенный момент времени. Известно, что в условиях городской среды биоклимат определяется по совокупному действию температуры и относительной влажности воздуха, ветра и теплового облучения. Также известны внутренние взаимосвязи между этими факторами.

Следствием глобальных процессов урбанизации являются современные тенденции градостроительства, в частности, горизонтальное развитие городов различного размера, начиная от мегаполисов и заканчивая средними и малыми городами. Однако в крупных и больших городах эта тенденция прослеживается более отчетливо.

Как показывают многочисленные исследования, высотные здания оказывают значительное влияние на ветровые потоки и, таким образом, определяют биоклимат на рассматриваемой территории. К. Тсе показал механизм влияния высотных зданий городской застройки на высоконапорные ветровые течения [1]. В результате этих исследований было показано, что здания могут прижимать ветровые потоки к поверхности земли, т.е. в зону нахождения людей, что оказывает существенное влияние на состояние биоклимата.

Характер ветровых потоков в городе влияет на другие процессы. Так, по данным К. Захида, снижение интенсивности ветровых течений на территории жилой застройки способствовало более широкому распространению вируса группы SARS в Гонконге. Недостаточная интенсивность ветра, существенно ослабленная зданиями, не позволила своевременно удалять из жилых кварталов воздух, насыщенный вирусами, что способствовало его распространению [2].

Также повышенное внимание к исследованию ветровых явлений связано с активным развитием ветроэнергетики и высокой ролью ветра в формировании погодных условий. Воздушные течения на масштабах, сопоставимых с континентами, странами и их регионами исследованы достаточно хорошо. Полученные данные используются для обоснования расположения ветроэнергетических установок и целых парков [3].

Таким образом, прогнозирование характера ветровых течений в городской застройке на ее различных масштабах является важной и актуальной задачей.

### Современное состояние исследования нестационарных ветровых течений в жилом квартале

В настоящий момент активно развиваются малые ветроэнергетические установки, которые могут быть размещены в жилых кварталах. Вследствие этого акцент исследований смещается на оценку ветровых явлений на масштабах отдельных кварталов, высотные здания которых существенно влияют на характер ветровых течений [4, 5]. Результаты моделирования позволяют не только рационально размещать ветроэнергетические установки малой мощности в жилых кварталах, но и принимать проектные решения при разработке дизайн-проектов придомовых территорий, обосновывать площадь и форму зеленых насаждений [6].

Как показывает практика, экспериментальное исследование ветровых течений в жилых кварталах не всегда позволяет получить исчерпывающие данные о динамике ветровых потоков. Для повышения точности исследований необходимо увеличить количество точек единовременного измерения, что, в свою очередь, усложняет конструкцию измерительной сети. Анализируя возможные альтернативы, Р. Бриттер доказал, что более подходящим инструментом исследования ветровых течений на малых масштабах является численное моделирование [7].

За последние годы в рамках подхода получены многочисленные результаты. Так, Б. Блокен установил, что в жилых кварталах, особенно с многоэтажной застройкой, наиболее выраженные ветровые потоки наблюдаются на высотах от 1,5 до 2,0 м, т.е. в зоне нахождения пешеходов [8]. Т. Ван Хоофф определил рациональные размеры зон зеленых насаждений, которые позволяют снизить интенсивность ветра на придомовых территориях [9]. Большой вклад в исследование ветровых течений в жилых кварталах также внесли А. Юань, Л. Лю [10, 11].

В отечественной литературе вопросам численного моделирования ветра в жилых кварталах также уделяется повышенное внимание. Тем не менее доступные исследования имеют ряд недостатков. Так, Ю.А. Воробьевой не описана математическая модель ветровых процессов, использованная при численном моделировании [12]. В модели М.М. Курбатова рассматривается свободный объем атмосферы без привязки к зданиям [13]. Аналогичные исследования также имеют свои недостатки. По этой причине задачу моделирования воздушных потоков в условиях ветра в жилых кварталах нельзя считать решенной.

Большинство существующих подходов к численному моделированию рассматриваемых процессов предполагает решение различных вариаций уравнения Навье–Стокса. Например, Дж. Ферзингер

предложил уравнение с дополнительными членами, которые позволяют рассчитывать турбулентное рассеивание кинетической энергии потока. Эти уравнения получили название  $k - \omega$  модель турбулентности и имеют следующий вид [14]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho \varepsilon \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + C_{\varepsilon 1} P_k \frac{\varepsilon}{k} - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (1)$$

где  $x$  — расстояние, пройденное воздушной струей под действием ветрового напора, м;  $\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon$  — коэффициент рассеивания кинетической энергии в турбулентном вихре;  $\bar{u}$  — средняя скорость воздуха в потоке, м/с;  $\mu_t$  — турбулентная вязкость (уравнение 2);  $\sigma_\varepsilon$ ,  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$  — константы модели Ферзингера;  $P_k$  — энергопродукция в воздушном потоке за счет развития турбулентных вихрей (3).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (2)$$

где  $C_\mu$  — константы модели Дж. Ферзингера.

$$P_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad (3)$$

где  $u$  — локальная скорость воздуха в потоке, м/с.

Известны другие вариации уравнения Навье – Стокса для расчета ветровых потоков в городских кварталах: модель с поправкой Япа, RNG модель Яхоты [15, 16]. Тем не менее  $k - \omega$  модель турбулентности считается одной из наиболее точных.

Метод численного моделирования на основе этой модели отработан А. Дхунни и предполагает [6]:

1. Анализ пространственной организации и размеров территории.
2. Проведение верификационного эксперимента, например измерение скорости ветра в различных точках рассматриваемой территории.
3. Построение уточненной геометрической модели территории.
4. Формирование начальных и граничных условий численной модели в соответствии с результатами наблюдений.
5. Получение стационарного решения уравнений (1)–(3) относительно определенных начальных и граничных условий.
6. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных, в случае их несовпадения — исправление ошибок в модели.
7. Формулировку прикладной задачи, формирование начальных и граничных условий модели в соответствии с ее особенностями.

9. Решение модели относительно начальных и граничных условий решаемой задачи.

### Результаты численного моделирования нестационарных ветровых течений в жилом квартале

Рассмотрим порядок моделирования ветровых течений на примере одной из придомовых территорий г. Орла, расположенного по ул. Картукова между домами 7, 9 и 11 (рис. 1, а).

Проведен анализ выбранной территории с использованием результатов спутниковых наблюдений (рис. 1, б), после чего построена ее модель (рис. 1, с), в составе:

- модели дома № 7 по ул. Картукова (позиция 1);
- модели дома № 9 по ул. Картукова (позиция 2);
- модели дома № 11 по ул. Картукова (позиция 3);
- модели здания узла распределения электрического напряжения (позиция 4).

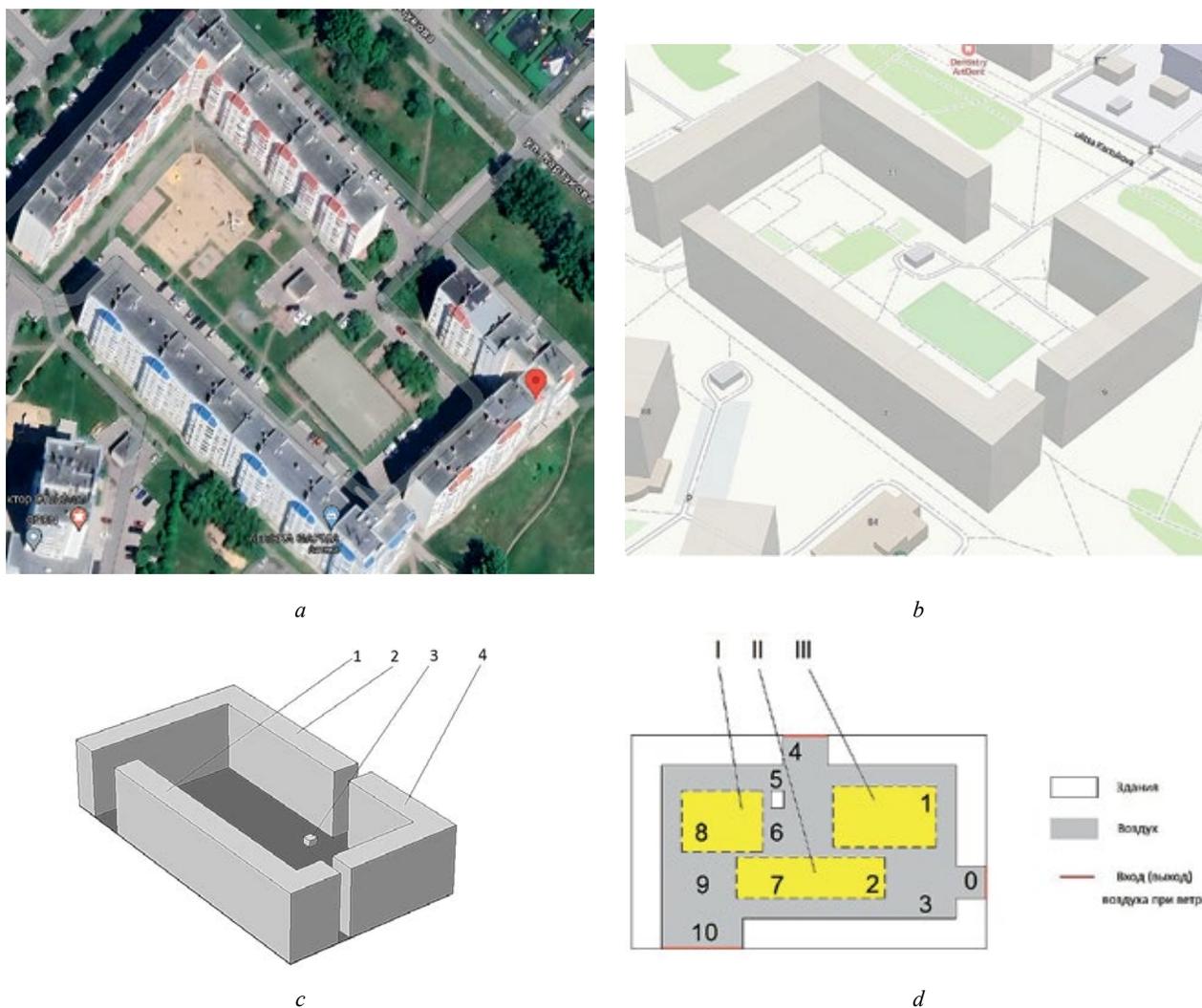
Получено плоскостное сечение модели на высоте 1,7 м над уровнем земли (рис. 1, д), на котором выделены зоны, соответствующие: детской игровой площадке (зона I), автомобильной парковке (зона II), спортивной площадке (зона III). Определено положение 11 контрольных точек: 0 на входе воздушного потока на придомовую территорию, 1–11, равномерно распределенных по территории. При этом точки 1, 2, 7, 8 расположены на площадках и парковке, точки 4 и 10 — в проездах между домами, через которые воздух выходит за пределы придомовой территории.

При построении численных моделей, в том числе рассматриваемой, учитываются экспериментальные данные. Это позволяет, с одной стороны, обеспечить точность моделирования, с другой, подтвердить результаты решений. Для получения верификационных данных авторами проведены измерения температуры воздуха и скорости ветра на рассматриваемой территории в летний сезон — 24.06.2024. В этот период фиксируется максимальное время пребывания людей, и в первую очередь детей, на открытой территории. С другой стороны, после подтверждения численная модель может использоваться для прогнозирования ветровых течений как в теплый, так и в холодный периоды года.

Для этого проведены измерения климатических параметров одновременно во всех точках, отмеченных на рис. 1, д. Результаты представлены в таблице.

Среднее значение температуры воздуха составило 28,6 °С, влажность 27 %, направление ветра: ССЗ, а его скорость на входе в рассматриваемую территорию (точка 0) 2,43 м/с.

Далее сформированы начальные и граничные условия численной модели (рис. 2, а):



**Рис. 1.** Анализируемый квартал г. Орла: *a* — фото квартала; *b* — схема зданий квартала; *c* — объемная геометрическая модель; *d* — плоскостная геометрическая модель: зона I — детская игровая площадка; зона II — автомобильная парковка; зона III — спортивная площадка

1. Свойства пространства в рамках области I назначены по таблицам для воздуха, что делает возможным решение уравнения Навье – Стокса. Свойства области II назначены для твердых тел, что делает невозможным применение к ним уравнения Навье – Стокса.

2. На границе 1 назначено условие втекания воздуха со скоростью  $v_{вх} = 2,5$  м/с (в соответствии с результатами эксперимента).

3. Границы 2 и 3 в процессе численного решения являются открытыми, что позволяет воздуху выходить за пределы рассмотренной территории.

Построена сетка конечных элементов (рис. 2, *b*) на геометрической модели и получено стационарное решение уравнений 1–3 разностными схемами. Коэффициенты уравнений выбраны в соответствии с  $k - \omega$  моделью турбулентности. В результате решения установлены контуры зон воздушных потоков различной скорости (рис. 2, *c*).

Сопоставление расчетных значений в контрольных точках с опытными данными (табл.) свидетельствует об их согласовании. Существенные различия зафиксированы только в точках 8 и 9, что можно объяснить случайными флуктуациями, что свидетельствует о возможности использования

Результаты сравнительного эксперимента

Номер точки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Результаты эксперимента ( $v_{в-эксп}$ , м/с)	2,43	0,8	2,2	1,17	1,71	0,84	0,96	1,68	0,5	0,5	1,14
Расчетные значения ( $v_{в-мод}$ , м/с)	2,5	0,7	2,1	1,21	1,68	0,95	0,7	1,84	0,8	0,83	1,01

модели в качестве инструмента прикладных исследований.

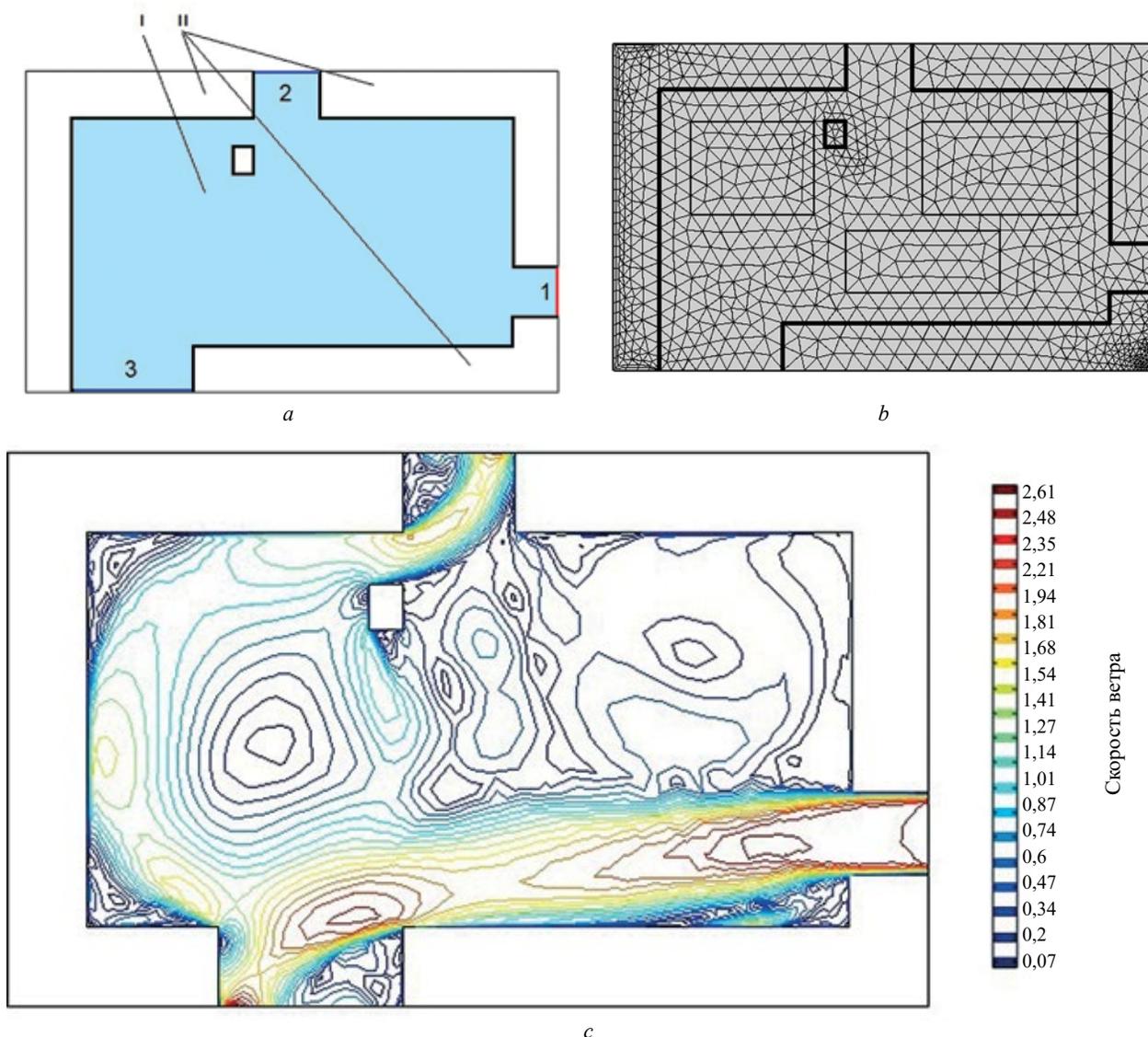
На следующем этапе с помощью численной модели исследованы процессы развития воздушных потоков при порывистом ветре. Как показывает анализ научной литературы, этому вопросу уделяется недостаточно пристальное внимание. В числе достигнутых результатов можно выделить модель Н.В. Дульгера [17]. Таким образом, это направление нуждается в дальнейшем развитии.

Для этого в начальный момент времени скорость ветра в области I модели принята равной нулю, а на границе 1 равной 3,0 м/с в соответствии с многолетними средними значениями климатических наблюдений. В результате ветер втекает в спокойное пространство рассматриваемой территории, формируя в ней определенную картину воздушных потоков.

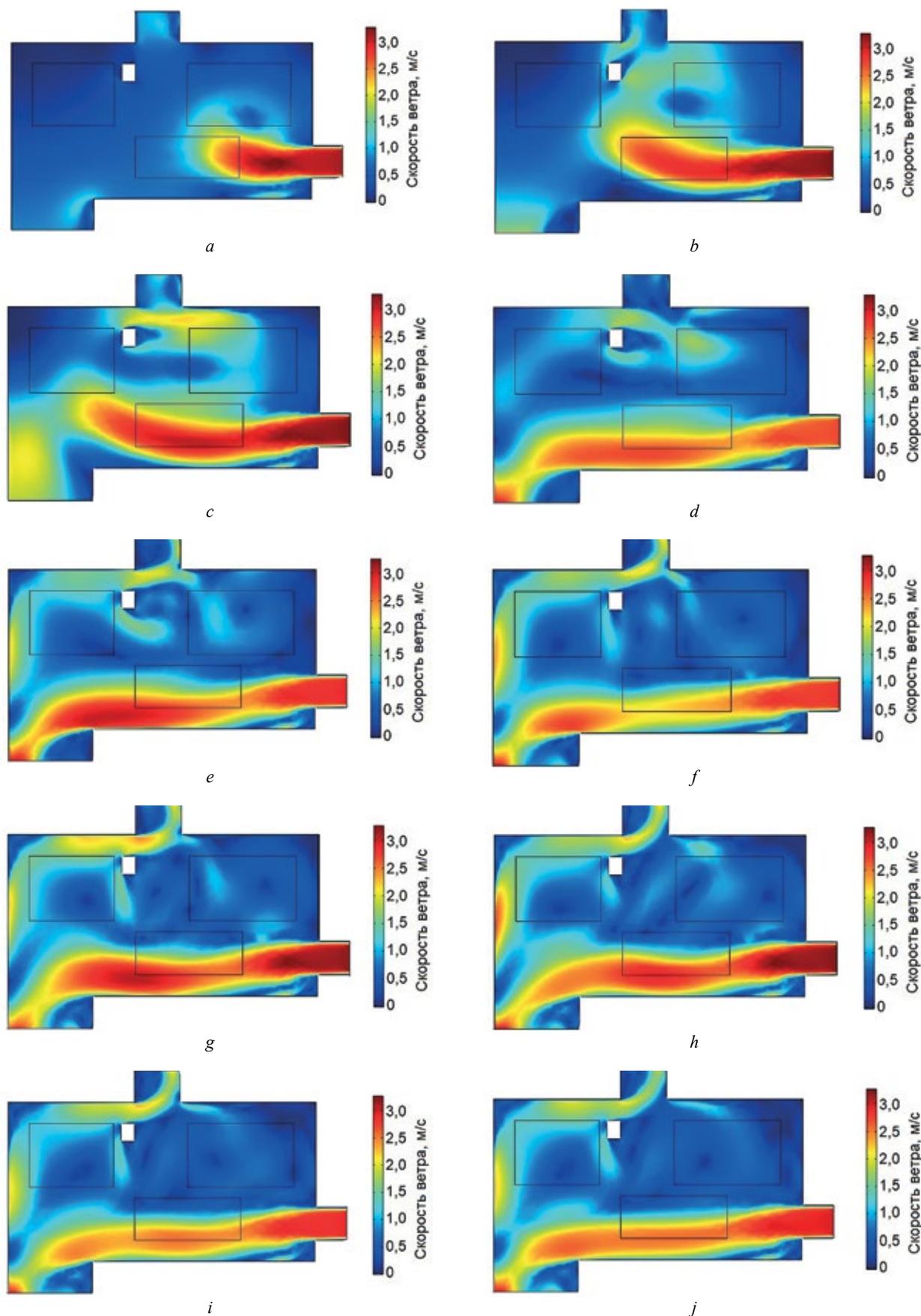
Распределение поля скорости воздуха в первые 5 с численного эксперимента с шагом  $\Delta t = 0,5$  с приведено на рис. 3. Согласно полученным решениям, после этого времени поток становится устойчивым и его характер не изменяется.

Как видно, спустя 0,5 с численного эксперимента воздушный поток принимает вид свободной струи. За счет его гидростатического давления на территории спортивной площадки образуется замкнутая конвективная ячейка, скорость ветра в которой не превышает 1 м/с. Между домами № 9 и 11, а также № 7 и 11 формируются малые по интенсивности потоки вытекающего с рассматриваемой территории воздуха.

Спустя 1 с численного эксперимента (рис. 3, б) воздушный поток охватывает уже всю территорию автомобильной парковки и заворачивается в направлении дома № 9. Препятствие в виде здания узла



**Рис. 2.** Этапы построения численной модели ветровых течений на рассматриваемой придомовой территории: *a* — геометрическая модель с областями различной природы; *b* — сетка конечных элементов на модели; *c* — результаты решения (контуры зон воздушных потоков)



**Рис. 3.** Динамика поля скорости воздуха на придомовой территории за различные промежутки времени: *a* — спустя 0,5 с после начала движения воздуха; *b* — спустя 1 с; *c* — спустя 1,5 с; *d* — спустя 2,0 с; *e* — спустя 2,5 с; *f* — спустя 3,0 с; *g* — спустя 3,5 с; *h* — спустя 4,0 с; *i* — спустя 4,5 с; *j* — спустя 5,0 с

распределения электрического напряжения разделяет вторичный воздушный поток на два рукава. Один из них обеспечивает вынос воздуха за пределы рассматриваемой территории, между домами № 9 и 11 с подветренной стороны, другой формирует замкнутую конвективную ячейку.

Спустя еще 0,5 с (рис. 3, *с*) воздушный поток достигает детской игровой площадки. В результате между ней и спортивной площадкой возникает замкнутая воздушная ячейка, которая временно запирает воздух, не давая ему свободно выходить между домами № 9 и 11.

По истечении второй секунды численного эксперимента эта ячейка прижимает поток втекающего воздуха к дому № 7 (рис. 3, *д*), в результате чего он сливается с выходящим воздушным потоком между домами № 7 и 11. От выходящего потока отделяется дополнительный рукав, в котором ветер дует вдоль дома № 11 в направлении здания узла распределения электрического напряжения и втекает на территорию спортивной площадки.

С течением времени (рис. 3, *е*) вторичный поток становится более выраженным, разбиваясь на три рукава в зоне контакта со зданием распределительного узла. На спортивной площадке формируется выраженная замкнутая воздушная ячейка. В дальнейшем (рис. 3, *е*) она сливается с втекающим потоком и частично рассеивается.

После этого картина воздушных потоков на рассмотренной территории приобретает устойчивость (рис. 3, *г-ж*).

В случае порывистого ветра можно ожидать схожей картины потоков в следующем цикле ветровой активности. Проведенное авторами имитационное моделирование свидетельствует, что флуктуации, вносимые турбулентной составляющей, не оказывают на нее существенного влияния.

Обобщая представленные результаты, можно заключить, что при втекании ветра между домами № 7 и 9 интенсивность воздушных потоков на детской игровой площадке выше, чем на спортивной.

## Выводы

Как видно, в результате численного решения обеспечивается достаточно полная визуализация полей скорости нестационарных ветровых течений на территории. Численная модель является динамичной. В ее геометрическую часть могут быть введены дополнительные элементы, например ветрозащитные стенки, зеленые насаждения и т.д. За счет изменения начальных условий можно проводить расчеты нестационарных ветровых течений в различные периоды года. За счет этого модель и получаемые с ее помощью численные данные могут быть использованы при решении различных научных и проектных задач.

В числе основных научных задач может быть отмечено прогнозирование биоклимата и оценка его качества при расчете комплексных показателей, например эффективно-эквивалентной температуры. Для повышения качества расчетов эту модель необходимо дополнить модулем расчета динамики температурного поля. Эта задача рассматривается авторами в числе приоритетных.

Численное моделирование является одним из перспективных методов анализа морфологической структуры городов, практическую значимость которого трудно переоценить. У градостроителей появляется дополнительный инструмент устранения дисбаланса, возникающего в комплексе подсистем развивающегося города. Прогностическая функция данного метода позволяет решать прикладные задачи, в частности проводить оценку эффективности различных мероприятий (например, ветрозащитные стенки, зеленые насаждения) при планировании ближайшего капитального ремонта зданий и благоустройства территории. Проектные решения, принятые с учетом результатов моделирования, позволят повысить качественный уровень городов и наиболее полно обеспечить комфорт населения.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Tse K.T., Zhang X., Weerasuriya A.U., Li S.W., Kwok K.C.S., Mak C.M. et al. Adopting 'lift-up' building design to improve the surrounding pedestrian-level wind environment // *Building Environment*. 2017. No. 117. Pp. 154–165. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.03.011
2. Zahid Iqbal Q.M., Chan A.L.S. Pedestrian level wind environment assessment around group of high-rise cross-shaped buildings: Effect of building shape, separation and orientation // *Building Environment*. 2016. Vol. 101. Pp. 45–63. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.02.015
3. Houda S.A., Zemmouri N., Hasseine A., Othmani R., Belarbi R. A CFD model for simulating urban flow in complex morphological street network // *The Online Journal of Science and Technology*. 2012. Vol. 2 (1). Pp. 1–10.

4. Toja-Silva F., Colmenar-Santos, Castro-Gil A.M. Urban wind energy exploitation systems: Behavior under multidirectional flow conditions — opportunities and challenges // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 24. Pp. 364–378. DOI: 10.1016/j.rser.2013.03.052
5. Kalmikov A., Dupont G., Dykes K., Chan C. Wind power resource assessment in complex urban environments MIT campus case study using CFD analysis // AWEA WINDPOWER conference. Dallas. 2010. Pp. 23–26.
6. Dhunny A., Toja F., Carlos P., Lollchund M.R., Rughooputh S. CFD simulation and full-scale experimental model inter-comparison of the wind flow around a university campus // *Wind Engineering*. 2016. 12 p. DOI: 10.1177/0309524x16666460
7. Britter R., Schatzmann M. Background and justification document to support the model evaluation // The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering. North Carolina, USA. 2010. 8 p.
8. Blocken B.J.E., Carmeliet J.E., Stathopoulos T. CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings—effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2007. Vol. 95. Pp. 941–962. DOI: 10.1016/j.jweia.2007.01.013
9. Van Hooff T., Blocken B. On the effect of wind direction and urban surroundings on natural ventilation of a large semienclosed stadium // *Computers & Fluids*. 2010. Vol. 39 (7). Pp. 1146–1155. DOI: 10.1016/j.compfluid.2010.02.004
10. Yang A., Su Y., Wen C., Juan Y., Wang W., Cheng Ch-H. Cheng estimation of wind power generation in dense urban area // *Applied Energy*. 2016. Vol. 171. Pp. 213–230. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.03.007
11. Lu L., Sun K. Wind power evaluation and utilization over a reference high-rise building in urban area // *Energy Building (Part A)*. 2014. Vol. 68. Pp. 339–350. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.09.029
12. Воробьева Ю.А., Михайлова Т.В., Бурак Е.Э. Цифровое моделирование ветровых потоков в жилой застройке // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2022. № 5. С. 33–40.
13. Курбатова М.М., Бычков В.И. Моделирование скорости ветра при низовой метели с помощью модели WRF-ARW // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2020. № 1 (375). С. 130–141. DOI: 10.37162/2618-9631-2020-1-130-141
14. Ferziger J., Peric M. Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment (chapter in book) // *Computational Methods for Fluid Dynamics* (3th ed.). 2002. 423 p.
15. Yakhot V., Orszag S., Thangam S. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique // *Physics of Fluids A-Fluid Dynamics*. 2002. Vol. 4 (7). Pp. 1510–1520. DOI: 10.1063/1.858424
16. Yap C.J. Turbulent heat and momentum transfer in recirculating and impinging flows. PhD Thesis // Faculty of Technology, University of Manchester: Manchester, UK. 1987. 328 p.
17. Дульгер Н.В., Панасенко Н.Н. Цифровая модель пульсирующего ветра // *Всероссийская научно-практическая конференция (26–27 мая 2022, г. Брянск) / под ред. К.А. Гончарова*. Брянск : БГТУ, 2022. С. 49–61.

Об авторах: **Антон Вячеславович Абрамов** — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры материаловедения и товарной экспертизы; **Российский государственный университет (РГУ) им. А.Н. Косыгина**; 117997, г. Москва, ул. Садовническая, д. 33, стр. 1; e-mail: Ant-lin88@mail.ru;

**Ольга Анатольевна Пчеленок** — кандидат с.-хоз. наук, доцент, заведующая кафедрой техносферной безопасности; **Орловский государственный университет (ОГУ) им. И.С. Тургенева**; 302026, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95; e-mail: bgdgtu@mail.ru.

## REFERENCES

1. Tse K.T., Zhang X., Weerasuriya A.U., Li S.W., Kwok K.C.S., Mak C.M. et al. Adopting ‘lift-up’ building design to improve the surrounding pedestrian-level wind environment. *Building Environment*. 2017; 117:154-165. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.03.011
2. Zahid Iqbal Q.M., Chan A.L.S. Pedestrian level wind environment assessment around group of high-rise cross-shaped buildings: Effect of building shape, separation and orientation. *Building Environment*. 2016; 101:45-63. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.02.015
3. Houada S.A., Zemmouri N., Hasseine A., Othmani R., Belarbi R. A CFD model for simulating urban flow in complex morphological street network. *The Online Journal of Science and Technology*. 2012; 2(1):1-10.
4. Toja-Silva F., Colmenar-Santos, Castro-Gil A.M. Urban wind energy exploitation systems: Behavior under multidirectional flow conditions — opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013; 24:364-378. DOI: 10.1016/j.rser.2013.03.052

5. Kalmikov A., Dupont G., Dykes K., Chan C. Wind power resource assessment in complex urban environments MIT campus case study using CFD analysis. *AWEA WINDPOWER conference. Dallas.* 2010; 23-26.
6. Dhunny A., Toja F., Carlos P., Lollchund M.R., Rughooputh S. CFD simulation and full-scale experimental model inter-comparison of the wind flow around a university campus. *Wind Engineering.* 2016; 12. DOI: 10.1177/0309524x16666460
7. Britter R., Schatzmann M. Background and justification document to support the model evaluation. *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering. North Carolina, USA.* 2010; 8.
8. Blocken B.J.E., Carmeliet J.E., Stathopoulos T. CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings—effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.* 2007; 95:941-962. DOI: 10.1016/j.jweia.2007.01.013
9. Van Hooff T., Blocken B. On the effect of wind direction and urban surroundings on natural ventilation of a large semienclosed stadium. *Computers & Fluids.* 2010; 39(7):1146-1155. DOI: 10.1016/j.compfluid.2010.02.004
10. Yang A., Su Y., Wen C., Juan Y., Wang W., Cheng Ch.-H. Cheng Estimation of wind power generation in dense urban area. *Applied Energy.* 2016; 171:213-230. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.03.007
11. Lu L., Sun K. Wind power evaluation and utilization over a reference high-rise building in urban area. *Energy Building (Part A).* 2014; 68:339-350. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.09.029
12. Vorobyova Yu.A., Mikhailova T.V., Burak E.E. Digital modeling of wind flows in residential buildings. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov.* 2022; 5:33-40. (rus.).
13. Kurbatova M.M., Bychkov V.I. Modeling of wind speed in a low-lying blizzard using the WRF-ARW model. *Hydro-meteorological Studies and Forecasts.* 2020; 1(375):130-141. DOI: 10.37162/2618-9631-2020-1-130-141 (rus.).
14. Ferziger J., Peric M. Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment (chapter in book). *Computational Methods for Fluid Dynamics (3th ed.).* 2002; 423.
15. Yakhot V., Orszag S., Thangam S. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A-Fluid Dynamics.* 2002; 4(7):1510-1520. DOI: 10.1063/1.858424
16. Yap C.J. Turbulent heat and momentum transfer in recirculating and impinging flows. PhD Thesis. *Faculty of Technology, University of Manchester: Manchester, UK.* 1987; 328.
17. Dulger N.V., Panasenko N.N. Digital model of pulsating wind. *All-Russian scientific and practical conference (May 26–27, 2022, Bryansk) / ed. by K.A. Goncharov. Bryansk, BSTU, 2022; 49-61. (rus.).*

About the authors: **Anton V. Abramov** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Materials Science and Commodity Expertise; **Russian State University (RSU) named after A.N. Kosygina**; 33 Sadovnicheskaya st., Moscow, 117997, Russian Federation; e-mail: Ant-lin88@mail.ru;

**Olga A. Pchelenok** — Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Head, Department of Technosphere Safety; **Oryol State University (OSU) named after I.S. Turgenyev**; 95 Komsomolskaya st., Orel, 302026, Russian Federation; e-mail: bgdgtu@mail.ru.