

Научная статья

УДК 69.04

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-1/122-135>

Применение модели пористого тела в задачах оценки ветровой комфортности пешеходных зон

Олег Сергеевич Горячевский✉, Ольга Александровна Янушко

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

✉ osgoryachevskij@mail.ru

Аннотация. В статье проведена верификация модели пористого тела, реализованной в Ansys CFX, для квазиодномерной постановки. Затем предложена методика определения параметров пористого тела на основе численного моделирования аэродинамики решеток в канале. Предложенная методика верифицируется на трехмерной задаче обтекания решетчатого ограждения. Практическая эффективность методики продемонстрирована на примере исследования пешеходной комфортности с учетом ветрозащитных конструкций ЖК «Акватория» в г. Москва.

Ключевые слова: вычислительная аэродинамика, пористые тела, верификация, пешеходная комфортность

Для цитирования: Горячевский О.С., Янушко О.А. Применение модели пористого тела в задачах оценки ветровой комфортности пешеходных зон // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 1(58). С. 122–135.

Original article

Application of the porous body model in the tasks of assessing the wind comfort of pedestrian zones

Oleg S. Goryachevsky✉, Olga A. Yanushko

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

✉ osgoryachevskij@mail.ru

Abstract. The paper presents a verification case for the porous body model and a quasi-one-dimensional flow, implemented in Ansys CFX. A methodology for determining the porous body parameters through numerical modelling of a flow over a lattice in a channel is proposed and verified for a three-dimensional flow over a lattice barrier. The practical effectiveness of the methodology is demonstrated for the pedestrian comfort analysis of the "Aquatoria" residential complex in Moscow with the windproof structures accounted.

Keywords: computational aerodynamics, porous bodies, verification, pedestrian comfort.

For citation: Goryachevsky O.S., Yanushko O.A. Application of the porous body model in the tasks of assessing the wind comfort of pedestrian zones. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2024, no. 1(58), pp. 122–135. (In Russ.).

Введение

Согласно российским (СП 20.13330.2016) и иностранным нормам (Eurocode 1–4, ASCE/SEI 7–16, CNR DT 207 R1/2018) при разработке архитектурно-планировочных решений городских кварталов и проектировании возведения зданий внутри существующей городской застройки необходимо провести оценку комфортности пешеходных зон. Исторически первым

методом моделирования ветровой комфортности является физическое моделирование в аэродинамических трубах [2]. В последние годы наиболее популярным и уже легитимизированным подходом стало математическое (численное) моделирование на основе CFD-технологий [1, 3]. Основными преимуществами численного моделирования является возможность:

- быстрого анализа различных конфигураций зданий объекта;
- оценки эффективности ветрозащитных мероприятий (зеленые насаждения и специальные конструкции);
- получения наглядных картин распределения ветровых потоков, облегчающая выявление причин ветрового дискомфорта и разработку планов благоустройства территории.

Прямое численное моделирование зеленых насаждений и ветрозащитных полупроницаемых конструкций оказывается затруднительным из-за неопределенности их формы и большого количества мелких элементов [6]. Поэтому на практике часто используют упрощенную модель пористого тела, которая позволяет эффективно решать поставленные задачи [5].

В данной работе:

- 1) верифицируется модель пористого тела, реализованная в программном комплексе Ansys CFX;
- 2) предлагается методика вычисления параметров модели пористого тела для проницаемых конструкций регулярной структуры;
- 3) приводится пример применения модели пористого тела для моделирования аэродинамики жилого комплекса с учетом ветрозащитных мероприятий.

1. Математическая модель пористого тела

1.1 Описание модели

В большинстве программных комплексов вычислительной аэродинамики реализована модель пористого тела в виде дополнительного члена S в уравнениях движения [4]:

$$S_i = -(C_1 v_i + C_2 |\mathbf{v}| v_i) \frac{1}{a}; \tag{1}$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla \mathbf{v} = \mathbf{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \eta \Delta \mathbf{v} + \mathbf{S}, \tag{2}$$

- где \mathbf{v} – вектор скорости;
 p – давление;
 \mathbf{F} – вектор массовых сил;
 ρ – плотность среды;
 η – кинематическая вязкость среды;
 C_1, C_2 – константы, зависящие от материала пористого тела;
 a – толщина пористой зоны.

В рамках наиболее распространенного в вычислительной аэродинамике метода конечных объемов величина S будет вносить свой вклад только в тех ячейках сетки, в которых находится пористая зона, в остальных же ячейках $S = 0$ (рис. 1).

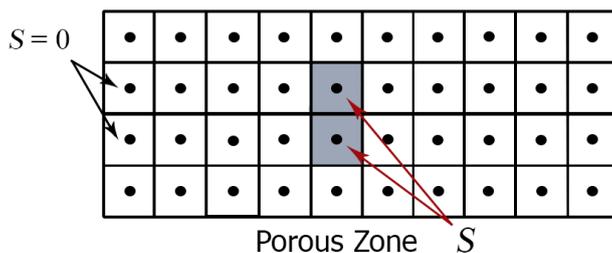


Рис. 1. Вычислительная область, разбитая на конечные объемы

Fig. 1. Computational domain divided into cells

В программных комплексах вычислительной аэродинамики, как правило, следует задавать линейный и квадратичный коэффициенты C_l и C_q , уже содержащие внутри себя величину $1/a$. Тогда член S выражается так:

$$S_i = -(C_l v_i + C_q |v| v_i) S_x \tag{3}$$

1.2 Верификация численной модели

Прежде чем использовать модель, заявленную в любом программном комплексе, для решения практических задач необходимо провести её верификацию на примерах, имеющих аналитическое решение. Такой подход позволяет оценить погрешности численных решений и применимость к решению более сложных задач.

В качестве верификационного примера выбрана квазиодномерная задача о прохождении потока через пористое тело в канале с проскальзывающими стенками (ограничены только скорости по нормали). В качестве граничного условия на входе в канал используется постоянная скорость v_0 .

В соответствии с (1), (2) и уравнением непрерывности аналитическое решение вне пористой зоны следующее:

$$v_x = v_0; \quad \Delta p = C_1 v_x + C_2 v_x^2, \tag{4}$$

где Δp – падение давления (разность на входе и выходе канала).

В качестве конкретного примера для решения в Ansys CFX рассмотрен канал размерами $12 \times 2 \times 2$ м и пористым телом $2 \times 2 \times 2$ м. Линейный и квадратичный коэффициенты приняты: $C_l = 0,0001$ [кг/с \times м³] и $C_q = 5$ [кг/м⁴], объемная пористость 0,8 (в данном случае не важна), входная скорость 08 м/с. Получены следующие скорости и давления в расчетной области (рис. 2–4):

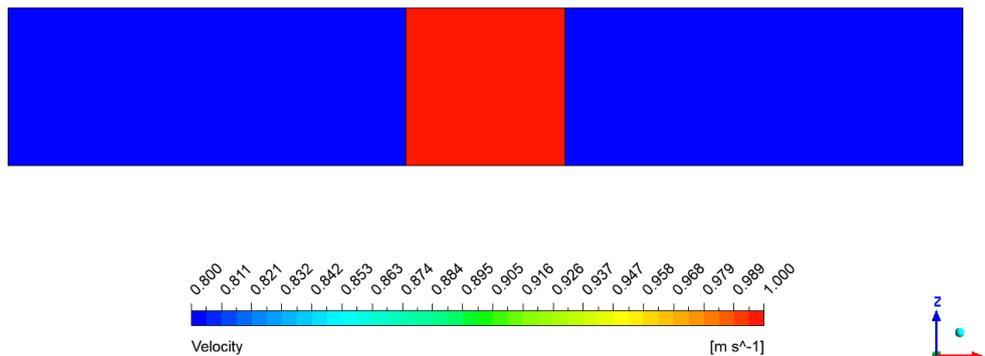


Рис. 2. Скорость потока в плоскости ZX

Fig. 2. Flow velocity in the ZX plane

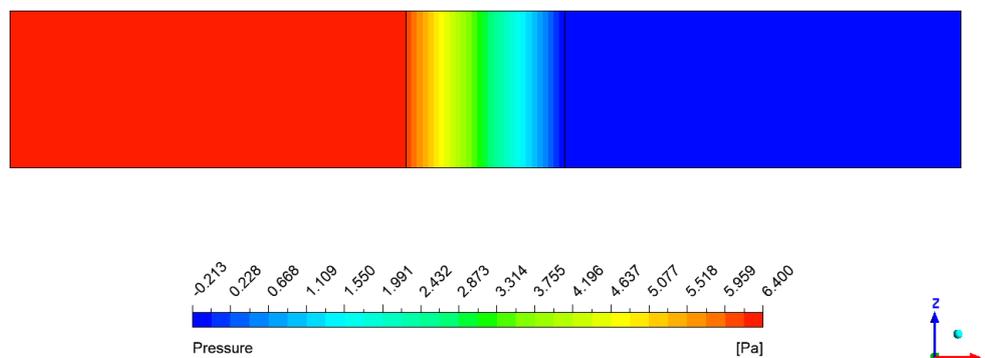


Рис. 3. Статическое давление в плоскости ZX

Fig. 3. Static pressure in the ZX plane

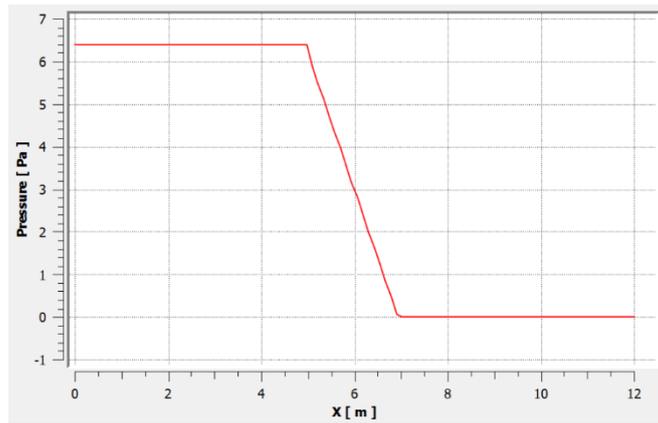


Рис. 4. График зависимости давления от координаты X (вдоль потока)

Fig. 4. Graph of pressure dependence on the X coordinate (along the flow)

Далее аналогичная задача была решена при других входных скоростях (0,5 м/с, 1 м/с, 2 м/с, 4 м/с, 6 м/с, 8 м/с, 10 м/с) и построен график зависимости падения давления от скорости (рис. 5).

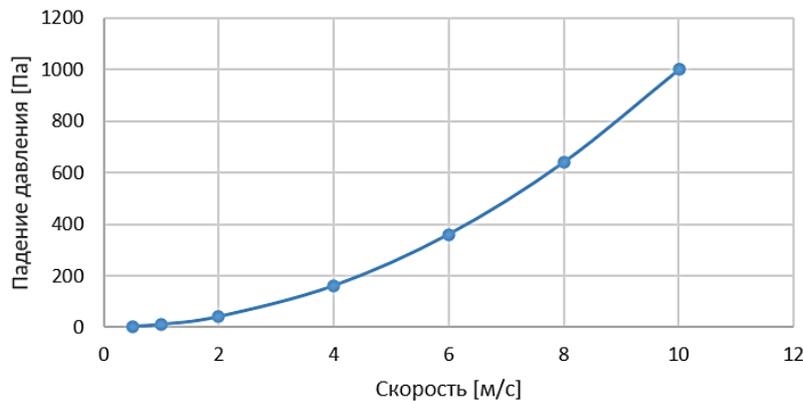


Рис. 5. График зависимости падения давления от скорости

Fig. 5. Graph of pressure drop dependence on velocity

Заметим, что полученный график практически совпадает с параболой $\Delta p = 10v_x^2$ в соответствии с аналитическим решением (4):

$$C_1 = C_l \cdot a \approx 0; C_2 = C_q \cdot a = 5 \text{ кг} / \text{м}^4 \cdot 2\text{м} = 10 \text{ кг} / \text{м}^3.$$

Результат аналитического решения совпадает с результатом, полученным с помощью программного комплекса. Таким образом, численная модель точно представляет лежащую в ее основе математическую модель, как минимум в одномерном случае.

2. Методика вычисления параметров пористого тела

2.1 Описание задачи

Для замены сложных решетчатых конструкций эквивалентным пористым телом необходимо найти параметры модели – объемную пористость, линейный и квадратичный коэффициенты.

В данной статье предлагается методика определения параметров эквивалентного пористого тела на примере простой решетки толщиной 0,02 м с регулярно размещенными отверстиями размером 0,02×0,02 м, расстояния между отверстиями также составляют 0,02м (рис. 6).

Суть методики заключается в том, что для небольшого характерного фрагмента решетки (см. рис. 6) есть возможность смоделировать падение давления для разных скоростей

ветра в канале напрямую (в стационарной постановке), без использования модели пористого тела. Построив кривую зависимости Δp от скорости на входе, можно вычислить линейный и квадратичный коэффициенты методом наименьших квадратов. Объемная пористость элементарно вычисляется из геометрических соображений (для данной решетки – 0,25).

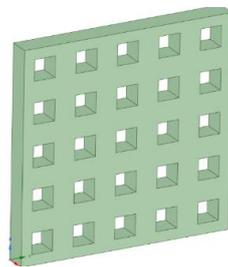


Рис. 6. Геометрия решетки

Fig. 6. Lattice geometry

Фрагмент решетки был размещен в прямоугольном канале. Стенки канала с проскальзыванием позволяют имитировать характерный пучок потока, проходящий через решетку бесконечного размера (рис. 7). Для поверхностей решетки используется условие стенки без проскальзывания. Расчетная область была разбита на гексагональные конечные объемы (рис. 8). Для сокращения размерности задачи использовалось интерфейсное соединение крупной сетки в областях, далеких от решетки и мелкой сетки в центральной зоне. Итоговая размерность задачи – 17 564 442 КО.

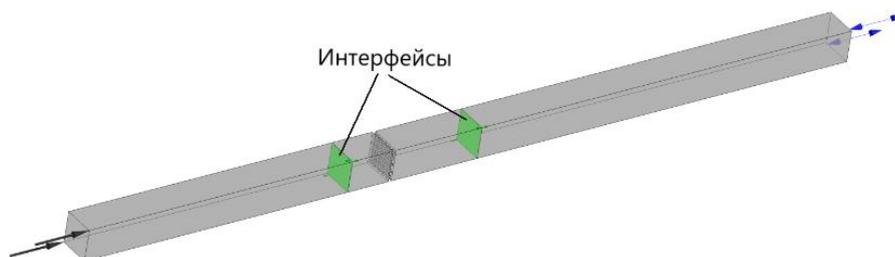


Рис. 7. Расчетная область с отметкой интерфейсных соединений сетки

Fig. 7. Computational domain marked by the interface connections of the grid

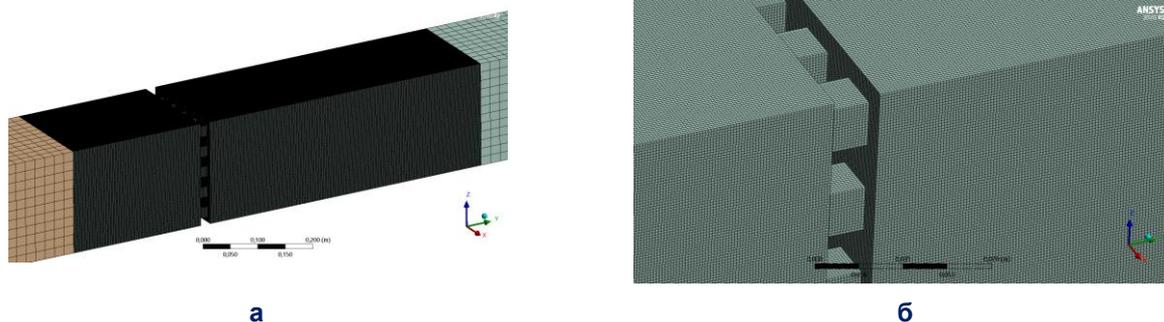


Рис. 8. Конечнообъемная сетка:

а) фрагмент КО-сетки; б) КО-сетка вблизи решетки

Fig. 8. Finite-volume mesh:

а) fragment of the FV-mesh; б) FV-mesh near the lattice

По результатам моделирования для представительного набора скоростей (см. табл. 1) были найдены перепады давления (разница на входе и выходе из расчетной области). На основе полученных результатов были найдены коэффициенты для эквивалентного пористого тела: $C_l = 0$, $C_q = 544,5$ [кг/с×м³].

Далее была построена аналогичная расчетная область, где решетка была заменена эквивалентным пористым телом с соответствующими параметрами. В данном случае не требовалось применения интерфейсов, так как размерность задачи невелика – 31 694 КО. Для упрощенной постановки были проведены расчеты для тех же скоростей ветра.

2.2 Результаты

На рисунках 9, 10 представлены картины скоростей воздуха и статических давлений для зоны решетки/пористого тела при скорости ветра на входе 8 м/с. В таблице 1 приведены значения перепада давления (разницы на входе и выходе расчетной области) для разных скоростей ветра.

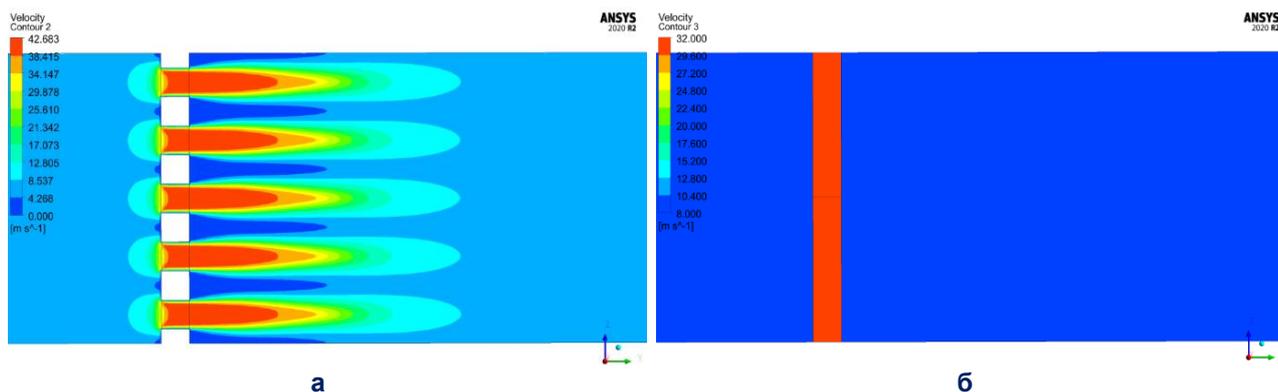


Рис. 9. Скорость воздуха в зоне решетки / пористого тела, м/с:

а) прямое моделирование решетки; б) модель пористого тела

Fig. 9. Air velocity in the lattice / porous body zone, m/s:

a) direct modeling of the lattice; b) porous body model

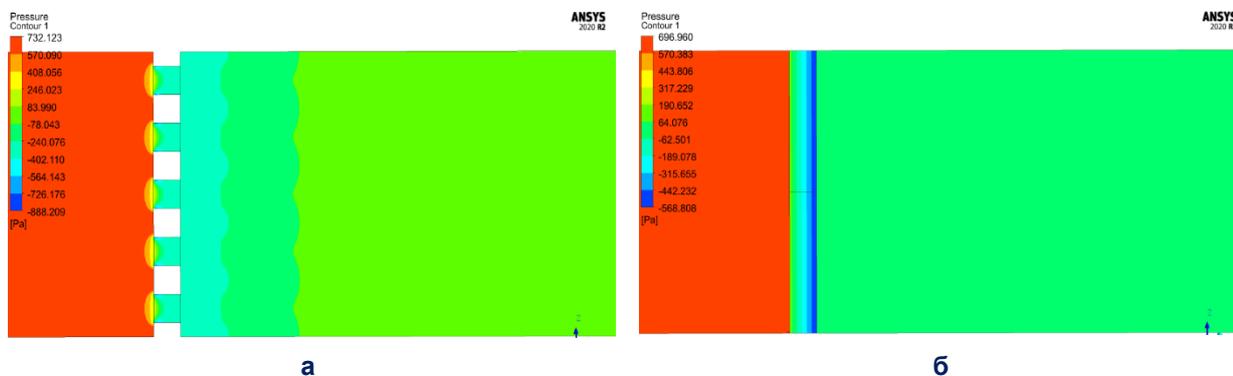


Рис. 10. Статическое давление в зоне решетки / пористого тела, Па:

а) прямое моделирование решетки; б) модель пористого тела

Fig. 10. Static pressure in the lattice / porous body zone, Pa:

a) direct modeling of the lattice; б) porous body model

Можно видеть, что разница в перепадах давления между результатами прямого моделирования решетки и применения модели пористого тела минимальна. Скорость ветра внутри пористого тела в 4 раза превышает скорость в домене, что соответствует пористости 0,25. Отметим, что число конечных объемов при прямом моделировании составило 17.5 млн, а при использовании пористого тела – 32 тыс.

Таким образом, приведенная выше методика доказала свою эффективность – сохраняется точность результатов при огромной вычислительной экономии (снижение размерности в 550 раз!).

Разница результатов прямого моделирования решетки и эквивалентного пористого тела
 Direct lattice modeling vs. equivalent porous body modeling results

| V, м/с | Δp при прямом моделировании, Па | Δp при моделировании эквивалентного пористого тела, Па | Абсолютная разница, Па | Относительная разница, % |
|--------|---|--|------------------------|--------------------------|
| 1 | 11,3 | 10,9 | 0,44 | 3,88 |
| 2 | 42,8 | 43,6 | 0,76 | 1,74 |
| 4 | 172,3 | 174,2 | 1,97 | 1,13 |
| 6 | 388,7 | 392,0 | 3,38 | 0,86 |
| 8 | 693,2 | 697,0 | 3,78 | 0,54 |
| 10 | 1085,8 | 1089,0 | 3,20 | 0,29 |
| 12 | 1566,4 | 1568,2 | 1,76 | 0,11 |
| 14 | 2134,2 | 2134,4 | 0,24 | 0,01 |
| 16 | 2793,3 | 2787,8 | 5,46 | 0,20 |

2.3 Верификация методики для трехмерных потоков

Верификация численной модели на основе сопоставления с аналитическим решением, представленная в п. 1.2, и результаты п. 2.2 напрямую не доказывают возможность применения методики п. 2.1 для трехмерных течений, представляющих наибольший практический интерес.

Для устранения этого пробела решается задача обтекания пористого ограждения с помощью прямого моделирования и с использованием модели пористого тела на двух вариантах сетки (рис. 11). Скорость ветра на входе в расчетную область – 8 м/с. Перфорация ограждения и коэффициенты C_l , C_q приняты теми же, что в п. 2.1, 2.2. Задача решается в стационарной постановке с учетом симметрии.

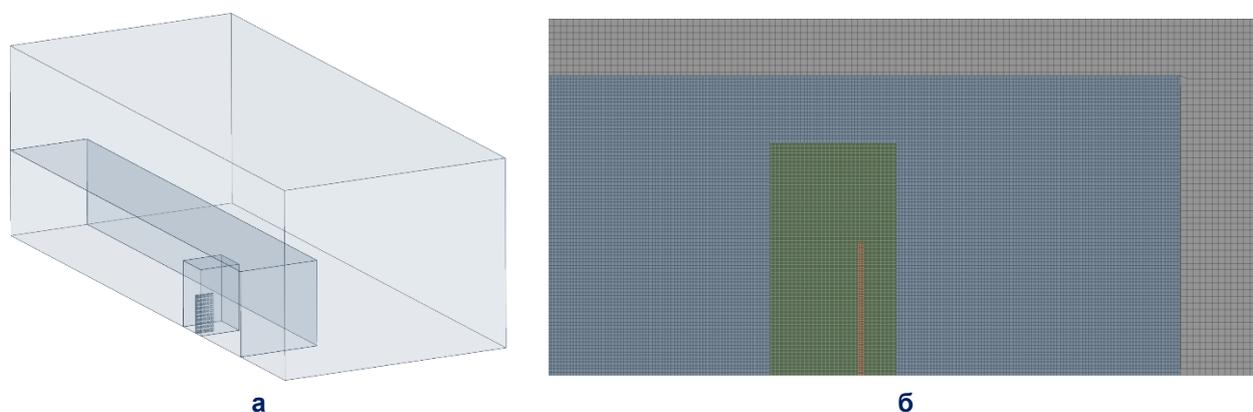


Рис. 11. Геометрия и сетка задачи:

- а) расчетная область с разграничением зон с разным размером КО;**
- б) фрагмент КО сетки - вид сбоку (вариант с пористым телом 9,8 млн КО)**

Fig. 11. Case geometry and mesh:

- a) the computational domain with the delimitation of zones with different sizes of the cells;**
- b) a fragment of the FV-mesh (side view) (a variant with a porous body of 9.8 million cells)**

Сопоставление средних скоростей и статических давлений представлено на рис. 12–14.

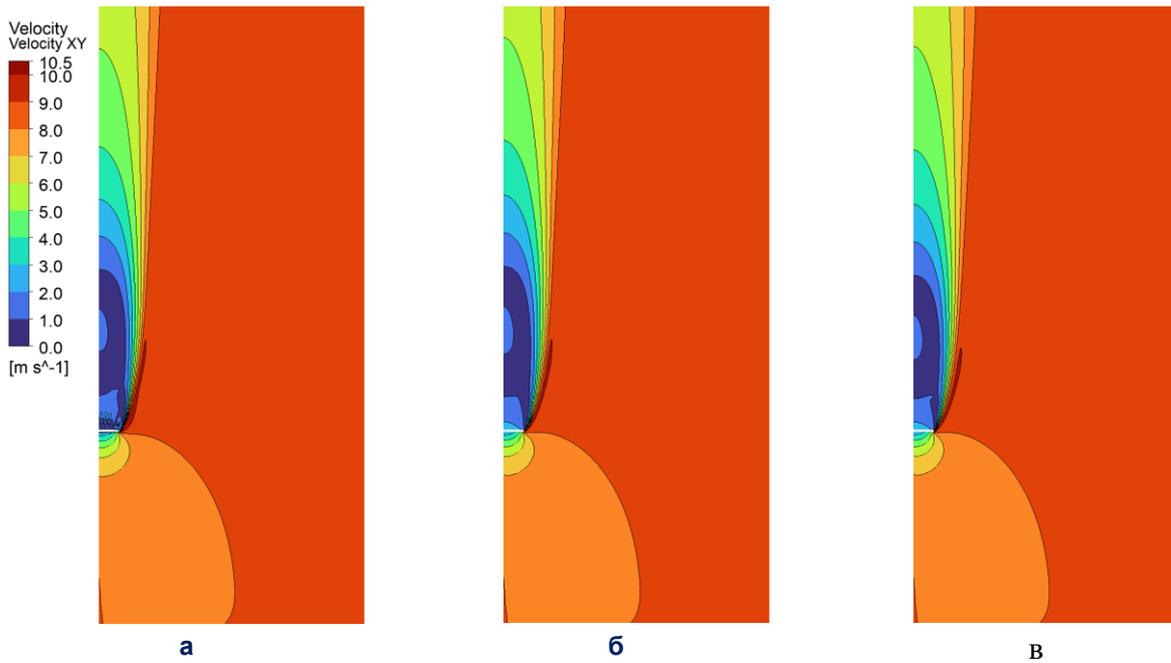


Рис. 12. Средние скорости в характерном горизонтальном сечении, м/с:
а) прямое моделирование (52,6 млн КО); б) пористое тело (52,6 млн КО);
в) пористое тело (9,6 млн КО)

Fig. 12. Mean velocity in a characteristic horizontal section, m/s:
a) direct modeling (52.6 million cells); б) porous body (52.6 million cells); в) porous body (9.6 million cells)

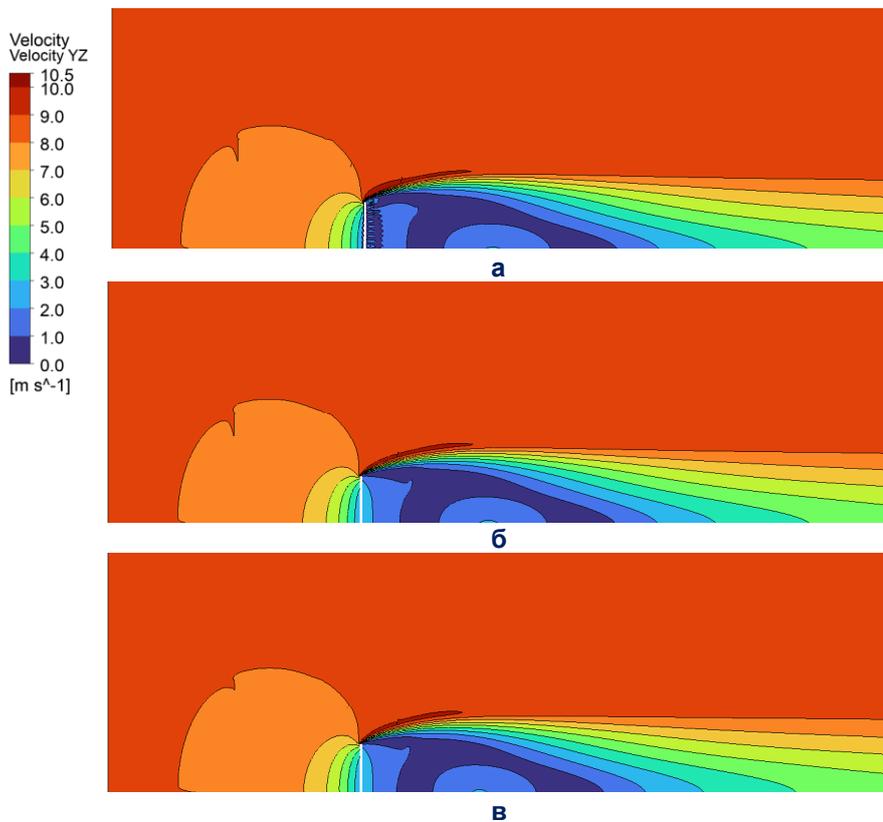


Рис. 13. Средние скорости в характерном вертикальном сечении, м/с:
а) прямое моделирование (52,6 млн КО); б) пористое тело (52,6 млн КО);
в) пористое тело (9,6 млн КО)

Fig. 13. Mean velocity in a characteristic vertical section, m/s:
a) direct modeling (52.6 million cells); б) porous body (52.6 million cells);
в) porous body (9.6 million cells)

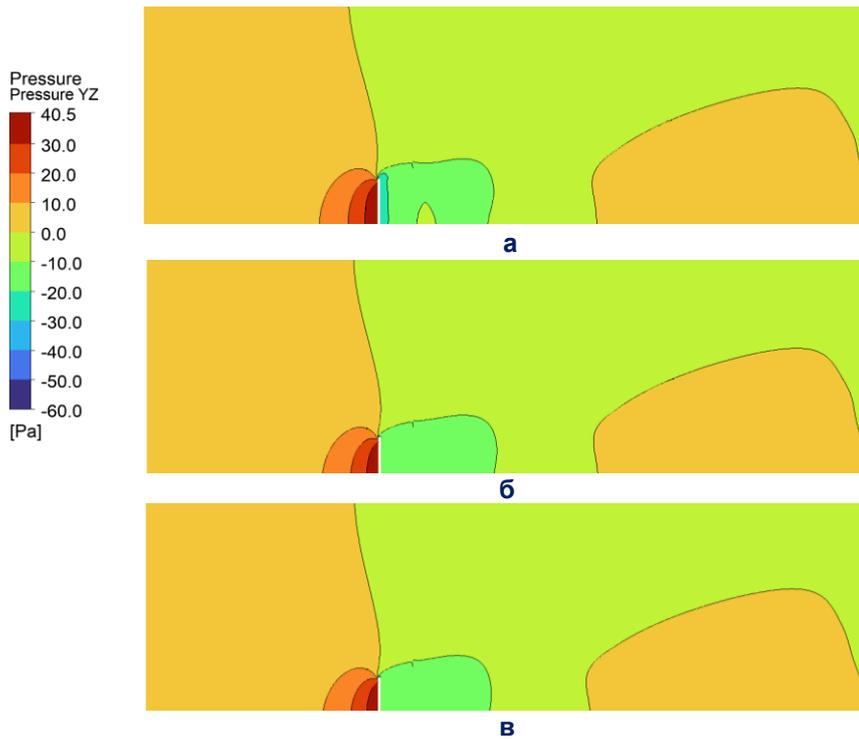


Рис. 14. Средние статические давления в характерном вертикальном сечении, Па:
а) прямое моделирование (52,6 млн КО); б) пористое тело (52,6 млн КО);
в) пористое тело (9,6 млн КО)

Fig. 14. Mean static pressure in a characteristic vertical section, Pa:
a) direct modeling (52.6 million cells); б) porous body (52.6 million cells);
в) porous body (9.6 million cells)

Результаты на рис. 12-14 наглядно доказывают, что замена решетчатого ограждения эквивалентным пористым телом, константы C_l , C_q которого вычислены по представленной в п. 2.1, 2.2 методике, позволяет получить практически такие же поля средних скоростей и давлений при существенной экономии вычислительных ресурсов.

3. Апробация модели для моделирования аэродинамики ЖК

3.1 Описание задачи

В качестве апробации модели пористого тела была выбрана задача по улучшению пешеходной комфортности с применением решетчатого ограждения. Исследуемой пешеходной зоной послужила территория жилого комплекса «Акватория» (рис. 15). Объект расположен в Левобережном районе Северного округа Москвы по адресу г. Москва, Ленинградское шоссе, вл. 69.



Рис. 15. Жилой комплекс «Акватория»

Fig. 15. Residential complex "Aquatoria"

3.2 Результаты моделирования

Численное моделирование аэродинамики ЖК с учетом рельефа, моста и окружающей застройки (рис. 16) выявило значимые зоны пешеходного дискомфорта, где можно ожидать сильные порывы ветра (рис. 17, 18). По-видимому, это связано с расположением на берегу реки, низкой плотностью окружающей застройки и архитектурными особенностями объекта.

Скорость ветра принималась по нормативному профилю с базовой скоростью 5м/с на высоте 10 м над землей.

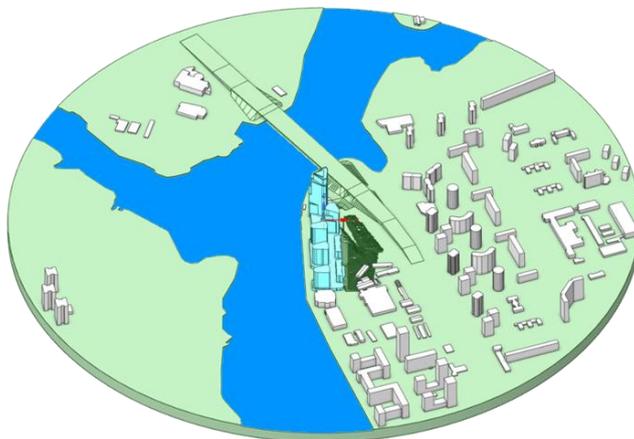


Рис. 16. Геометрическая модель, использованная для CFD-модели
Fig. 16. The geometric model used for the CFD model

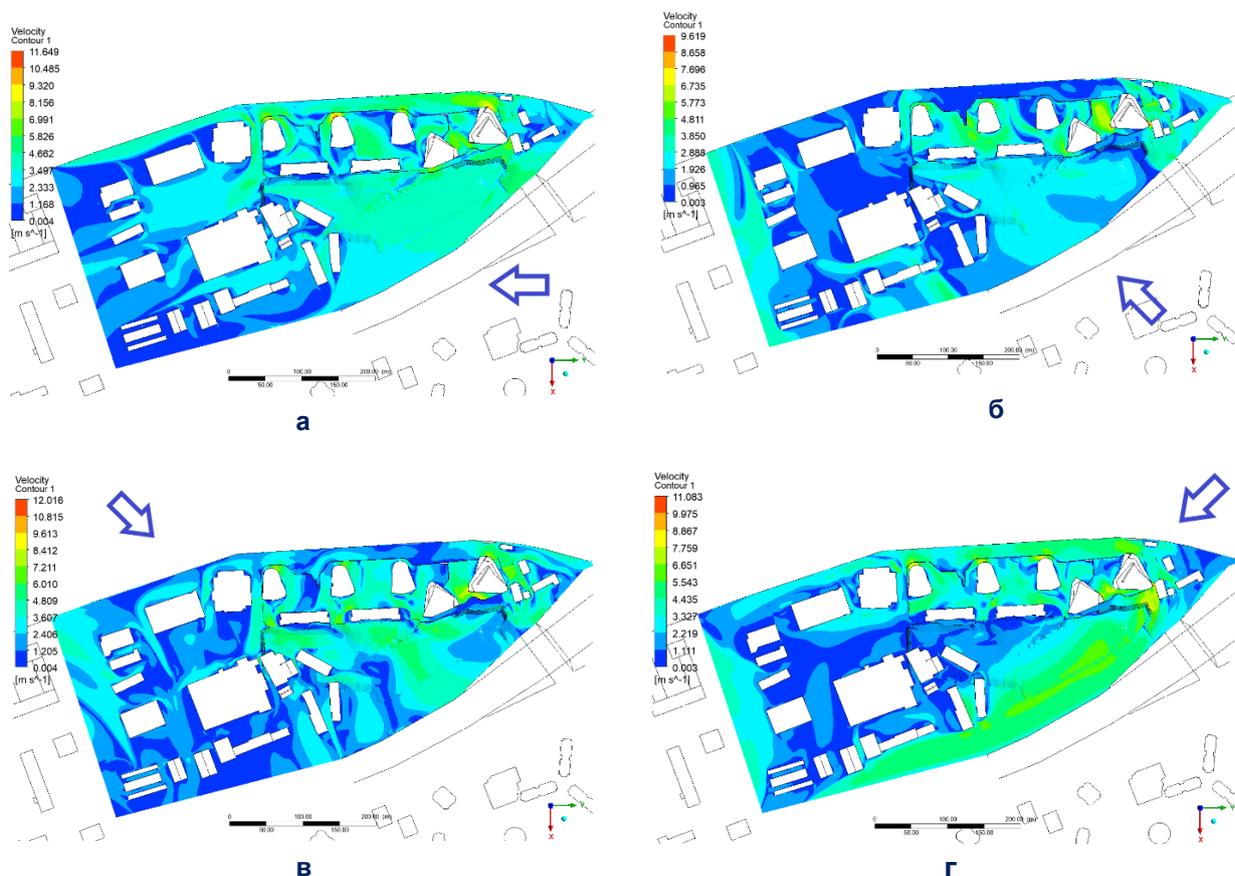


Рис. 17. Средние скорости ветра (м/с) на высоте 1,5 м над уровнем земли для 4 характерных направлений ветра (показаны стрелками).
Fig. 17. Mean wind velocity (m/s) at a height of 1.5 m above ground level for four characteristic wind directions (shown by arrows)

По результатам моделирования были выявлены две неблагоприятные пешеходные зоны.



Рис. 18. Выявленные зоны пешеходного дискомфорта

Fig. 18. Identified areas of pedestrian discomfort

Для снижения скоростей ветра в выявленных зонах дискомфорта были добавлены две ветрозащитные конструкции – решетчатые тела высотой 3 м и толщиной 0,6 м, смоделированные пористыми телами (рис. 19). Параметры пористых тел в направлении, перпендикулярном решетке, были взяты из предыдущей задачи, в остальных направлениях – очень большими числами. Таким образом учитывалась анизотропия свойств.

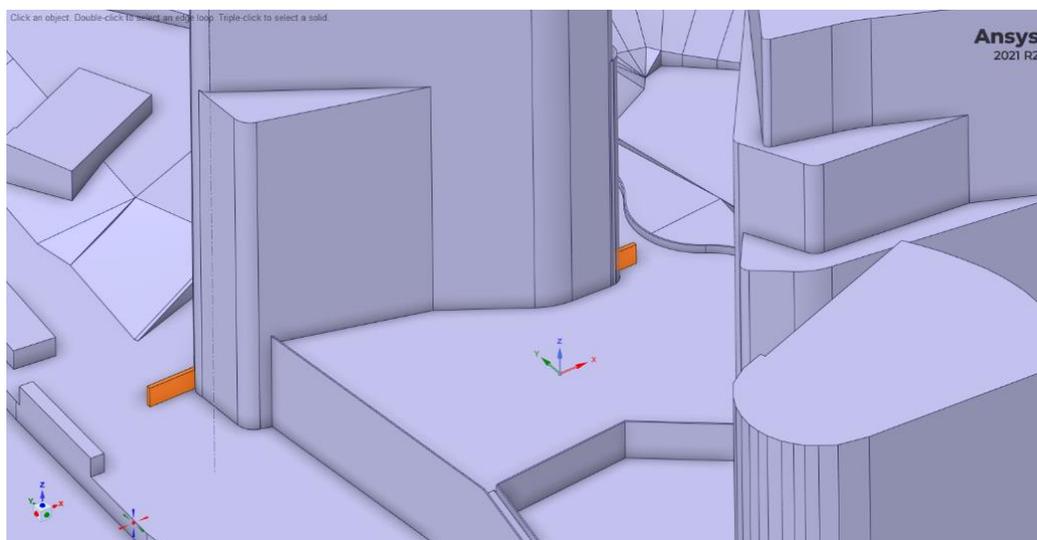


Рис. 19. Ветрозащитные конструкции (выделены оранжевым)

Fig. 19. Windproof structures (highlighted in orange)

Ниже приведено сопоставление изополей скоростей ветра в проблемных пешеходных зонах без использования ветрозащитных конструкций и с их применением (рис. 20, 21).

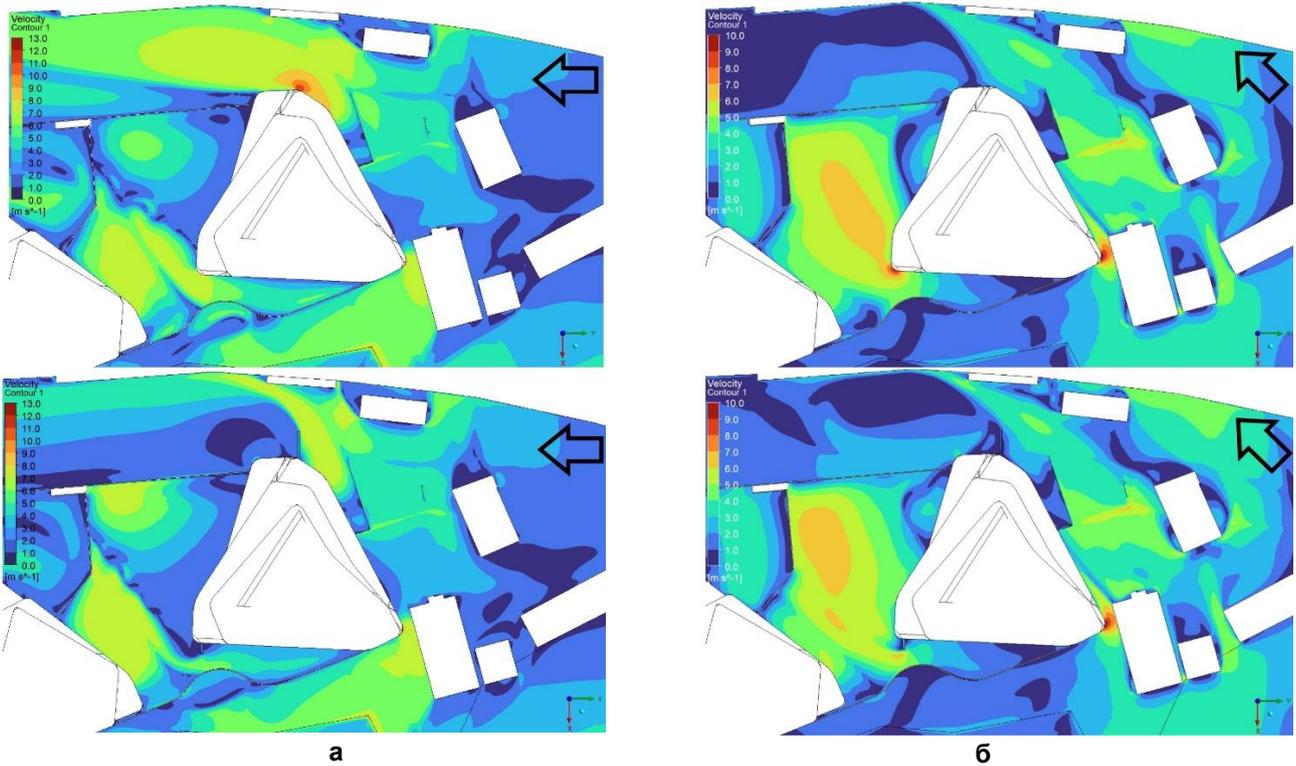


Рис. 20. Средние скорости ветра (м/с) на высоте 1,5 м над уровнем земли с ограждениями (снизу) и без (сверху) для двух характерных направлений ветра: а – 0 град.; б – 45 град.

Fig. 20. Wind velocity field (m/s) at a height of 1.5 m above ground level with fences (bottom) and without (top) for two characteristic wind directions: а – 0 degrees; б – 45 degrees

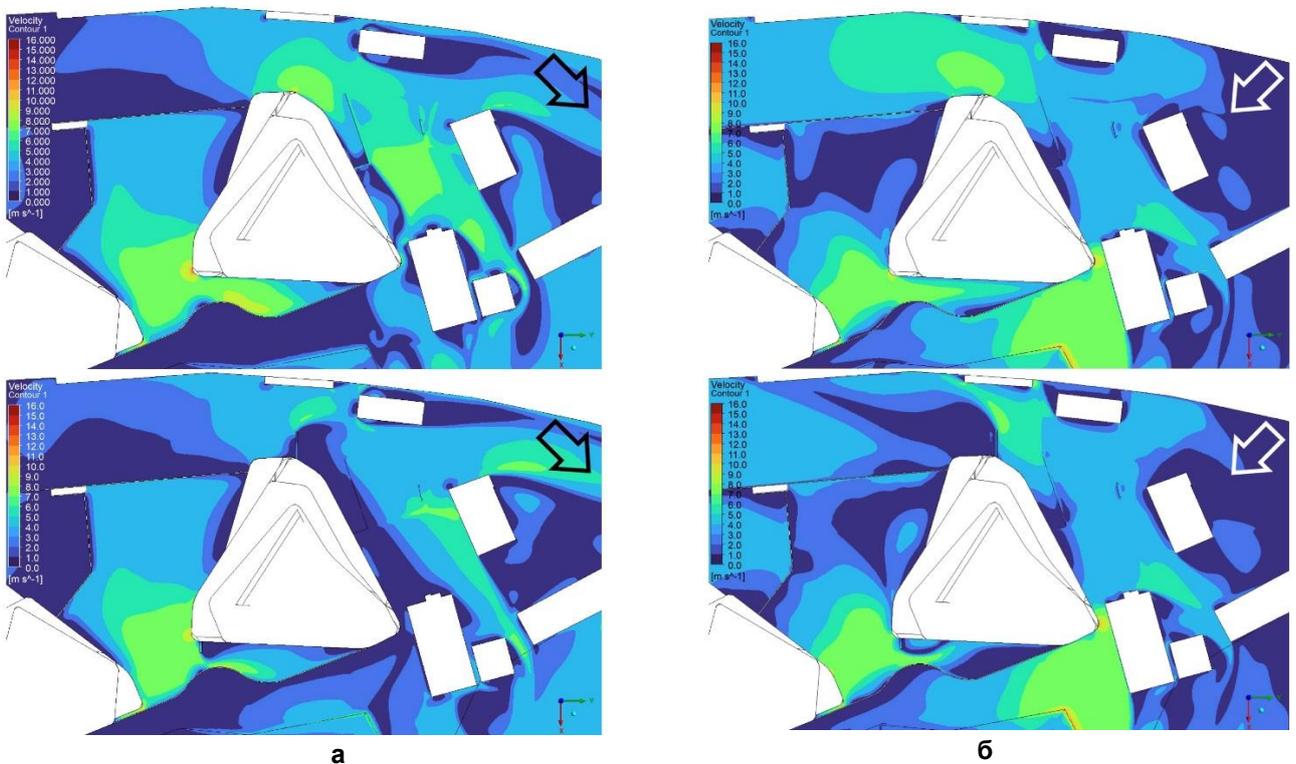


Рис. 21. Средние скорости ветра (м/с) на высоте 1,5 м над уровнем земли с ограждениями (снизу) и без (сверху) для двух характерных направлений ветра: а – 225 град.; б – 315 град.

Fig. 21. Mean wind velocity (m/s) at a height of 1.5 m above ground level with fences (from below) and without (from above) for two characteristic wind directions: а – 225 degrees; б – 315 degrees

Результаты, приведенные на рис. 20, 21, показывают позитивный эффект от применения ветрозащитных конструкций.

Заключение

По результатам настоящего исследования можно сделать следующие выводы:

- 1) численная реализация модели пористого тела в ANSYS CFX дает результаты, почти идеально совпадающие с аналитическим решением. Это верифицирует модель, как минимум, для квазиодномерной постановки;
- 2) предложена методика определения параметров пористых тел на основе прямого численного моделирования аэродинамики решеток в канале;
- 3) предложенная методика определения параметров пористых тел была верифицирована для трехмерных течений на примере задачи обтекания решетчатого ограждения;
- 4) использование модели пористого тела позволяет эффективно проводить оценку пешеходной комфортности жилой застройки с учетом ветрозащитных конструкций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Belostotsky A.M., Afanasyeva I.N., Lantsova I.Yu. Estimation of pedestrian comfort on the basis of numerical modeling of wind aerodynamics of building in the environmental development // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2019. Т. 15, № 2. С. 24–39. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2019-15-2-24-39>
2. Blocken B., Stathopoulos T., Van Beeck J. Pedestrian-level wind conditions around buildings: review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment // *Building and Environment*. 2016. Vol. 100. P. 50–81. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.004>
3. Buccolieri R., Eddy J., Monks P.S., Leigh R.J. Air quality affected by trees in real street canyons: The case of Marylebone neighbourhood in central London // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2017. Vol. 22. P. 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.01.009>
4. Mahgoub A.O., Ghani S. Numerical and experimental investigation of utilizing the porous media model for windbreaks CFD simulation // *Sustainable Cities and Society*. 2021. Vol. 65. Art. 102648. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102648>
5. Tsihritzis L., Nikolopoulou M. The effect of building height and façade area ratio on pedestrian wind comfort of London // *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*. 2019. Vol. 191. P. 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.05.021>
6. Wang Y., Zhong K., Hu J., Kang Y. An anisotropic prediction model of the resistance coefficient in porous media model for simulating wind flow through building arrays // *Building and Environment*. 2023. Vol. 228. Art. 109807. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109807>

REFERENCES

1. Belostotsky A.M., Afanasyeva I.N., Lantsova I.Yu. Estimation of pedestrian comfort on the basis of numerical modeling of wind aerodynamics of building in the environmental development. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2019, vol. 15, no. 2, pp. 24–39. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2019-15-2-24-39>
2. Blocken B., Stathopoulos T., Van Beeck J. Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment. *Building and Environment*, 2016, vol. 100, pp. 50–81. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.004>
3. Buccolieri R., Eddy J., Monks P.S., Leigh R.J. Air quality affected by trees in real street canyons: The case of Marylebone neighbourhood in central London. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, vol. 22, pp. 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.01.009>
4. Mahgoub A. O., Ghani S. Numerical and experimental investigation of utilizing the porous media model for windbreaks CFD simulation. *Sustainable Cities and Society*, 2021, vol. 65, art. 102648. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102648>
5. Tsihritzis L., Nikolopoulou M. The effect of building height and façade area ratio on pedestrian wind comfort of London. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 2019, vol. 191, pp. 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.05.021>

6. Wang Y., Zhong K., Hu J., Kang Y. An anisotropic prediction model of the resistance coefficient in porous media model for simulating wind flow through building arrays. *Building and Environment*, 2023, vol. 228, art. 109807. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109807>

Информация об авторах

Горячевский Олег Сергеевич – заместитель директора Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Москва, Россия), osgoryachevskij@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8219-4598>

Янушко Ольга Александровна – инженер Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Москва, Россия), yanushko2129@mail.ru

Information about the authors

Oleg S. Goryachevsky, Deputy Director of A.B. Zolotov Research and Education Center of Computer Modelling, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia), osgoryachevskij@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8219-4598>

Olga A. Yanushko, Engineer of A.B. Zolotov Research and Education Center of Computer Modelling, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia), yanushko2129@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 06.09.2023; одобрена после рецензирования 01.02.2024; принята к публикации 15.03.2024.

Information about the article

The article was submitted September 6, 2023; approved after reviewing February 1, 2024; accepted for publication March 15, 2024.