

# Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов

УДК 711.6

DOI: 10.14529/build190101

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРАНСФОРМАЦИИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ОДИНОЧНОЕ ЗДАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**В.Д. Оленьков, А.Д. Бирюков, Н.Т. Тазеев, К.С. Коротеев**  
*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

Представлено описание методики и примера настройки расчетного случая для выполнения численного моделирования ветрового воздействия на модель одиночного здания согласно аналогичному полунатурному эксперименту.

В статье представлено решение задачи обтекания воздушным потоком профиля одиночного здания с использованием конечно-элементного анализа в пакете ANSYS FLUENT и сравнение результатов с данными, полученными в аэродинамической трубе. Использование компьютерного моделирования является актуальным в настоящее время, так как этот метод значительно ускоряет решение задач и позволяет наглядно визуализировать полученные результаты, а также дает возможность проведения сравнения данных результатов с ранее полученными экспериментальными данными.

Графическое представление результатов, полученных в ходе данного исследования, позволяет решать задачи сравнения и верификации опытных данных, полученных опытным путем на масштабных моделях.

*Ключевые слова:* численное моделирование, вычислительная гидродинамика, градостроительство, аэрация, карта аэрационного режима, поле скоростей, архитектурная аэродинамика, CFD-моделирование.

### Введение

Процессы урбанизации городов ставят новые задачи перед градостроителями, в круг которых входит создание безопасной и комфортной среды. Одно из наиболее оптимальных направлений для оздоровления воздушного бассейна – это всесторонний учет аэрационного режима местности, при котором исследуются закономерности движения воздуха с учетом естественного и техногенного рельефа. Аэрация населенных мест – процесс естественного регулируемого проветривания территории городов и других населенных мест [1].

В процессе аэрации происходит трансформация воздушного потока в результате взаимодействия его с природным и антропогенным ландшафтом. Трансформация заключается в изменении скорости и направления ветра. Для того чтобы прогнозировать аэрационный режим на территории населенного места, необходимо изучить этот процесс, построить его теоретическую модель. Далее – определить каналы получения необходимой для расчета информации о качественной и количественной характеристике этого процесса и разработать методику расчета. Подобные методики уже разрабатывались ранее и подробно освещены в трудах Ф.Л. Серебровского, Э.И. Реттера и

др. [1, 2], где выполнялись теоретические и экспериментальные исследования процессов аэрации городских нарушенных территорий [3, 4].

Проанализировав ряд существующих исследований, а также оценив перспективы развития данной области, можно выделить следующие обобщенные методы решения задач обтекания воздушным потоком профиля техногенного рельефа:

- теоретические методы решения (например, метод источников и стоков [1]);
- экспериментальные методы (практические);
- методы численного моделирования или вычислительной гидродинамики.

В настоящее время существует большое множество методик и прикладных программных средств, предназначенных для выполнения компьютерного моделирования ветровых воздействий на здания и сооружения методами вычислительной гидродинамики (CFD) [5].

### Получение и анализ исходных данных физического эксперимента

В данной работе рассмотрен пример проведения математического моделирования на основе полунатурного эксперимента с последующей попыткой верификации оригинальных результатов,

полученных в ходе эксперимента на масштабных моделях в аэродинамической трубе.

Цель верификации и сравнения результатов вытекает из особенности построения расчетной модели, так как в рассматриваемом случае математическое моделирование производится для «полного» случая с «полным» геометрическим и кинематическим подобием модели. В качестве опорных характеристик, на основе которых будут сравниваться результаты моделирования и эксперимента, предложено использовать коэффициенты трансформации воздушного потока, которые используются в исследованиях процессов аэрации жилой застройки.

Известно, что воздушный поток, обтекающий различные формы техногенного рельефа, трансформируется как по величине скорости, так и по направлению движения. Существуют две основные характеристики, определяющие изменение скорости и направления ветра в каждой точке рассматриваемого пространства, – это коэффициент трансформации  $t_i$  и угол трансформации воздушного потока  $\Delta\alpha_i$ .

Таким образом, зная скорость и азимут ветра в заданном географическом пункте (на основе многолетней статистики и розы ветров), а также значения вышерассмотренных коэффициентов, можно определить характеристики аэрационного режима на рассматриваемой территории.

Проанализируем исходные данные оригинального эксперимента, особенности организации экспериментальной установки и выходные результаты. Основная сложность, возникающая при физическом моделировании аэродинамических процессов, заключается в невозможности отображения реальной картины в условиях малогабаритной аэродинамической трубы.

Очевидно, что при масштабировании исследуемого случая до подходящих размеров необходимо соблюсти геометрическое, кинематическое и динамическое подобия сред [6].

В качестве меры геометрического подобия можно использовать коэффициенты  $L_m$  и  $L_n$ , определяющие соотношение линейных размеров реального объекта и его модели соответственно. В исходном эксперименте масштаб был выбран 1:1000.

Для достижения кинематического подобия воздушной среды необходимо воссоздать условие переменности по вертикали профиля скорости потока. Данное условие в исходном эксперименте обеспечивалось путем установки на срезе трубы специальной решетки с переменным шагом отверстий соответственно приращению координаты высоты относительно модели [7, 8].

Динамическое подобие моделируемого воздушного потока натурному можно обеспечить путем достижения подобия структуры турбулентности, характеризуемой скоростью диссипации турбулентной энергии, а также равенством турбулентных чисел Рейнольдса. Число Рейнольдса имеет

большое значение в экспериментальной аэродинамике, оно определяет подобие по силам вязкости. Соблюдение постоянства числа Рейнольдса в натуральных условиях и в эксперименте обеспечивает корректный учет эффекта вязкости [9, 10].

Исходный аэродинамический эксперимент основан на теории подобия, а исследования в этой области показали, что скорость воздушного потока в аэродинамической трубе может варьироваться в пределах  $U_N (L_m/L_n)^{1/3} \leq U_m \leq U_N$ , где  $U_m$  и  $U_N$  – средние скорости воздушного потока при моделировании и в натуральных условиях [1].

Имеем следующие исходные данные для эксперимента:

- линейные размеры модели:  $L_m/L_n = 0,001$ ;
- скорость потока в аэродинамической трубе  $U_m = 0,1 * U_N$ .

В исходном эксперименте Ф.Л. Серебровского осуществлялось моделирование характерного случая обтекания воздушным потоком отдельно стоящего здания линейного типа, именно на данном упрощенном примере можно пронаблюдать наиболее характерные области и коэффициенты трансформации воздушного потока для последующей оцифровки эксперимента. По результатам данных испытаний было построено поле относительных скоростей в сечении по оси симметрии (рис. 1). Также были нанесены линии тока, полученные расчетным методом источников и стоков (рис. 2) [1, 11, 12].

На рис. 3 изображено векторное поле скоростей в приземном слое толщиной 2 м (в натуре) с изолиниями и векторами скоростей. В данном случае высота в 2 метра обусловлена высотой роста человека, именно в этой зоне формируется наибольшее влияние на климатический комфорт для человека [1].

Полученные экспериментальные данные позволяют создать представление о движении воздуха в окрестностях одиночного здания, а также о характере образующихся вихрей на передних кромках здания.

Данные изображения, полученные аналитическими методами, а также в ходе полунатурных экспериментов в аэродинамической трубе, далее были использованы как референсные образы для дальнейшего сравнения с результатами численного моделирования. Основной упор делался на графическое сравнение результатов с интерпретацией коэффициентов трансформации в ярко выраженных характерных областях [13].

### Ход эксперимента

Расчет проводился по следующему алгоритму:

1. Подготовка расчетной модели:

- создание объемной геометрической модели, описывающей расчетную область. Этот пункт был выполнен в программном комплексе SolidWorks;

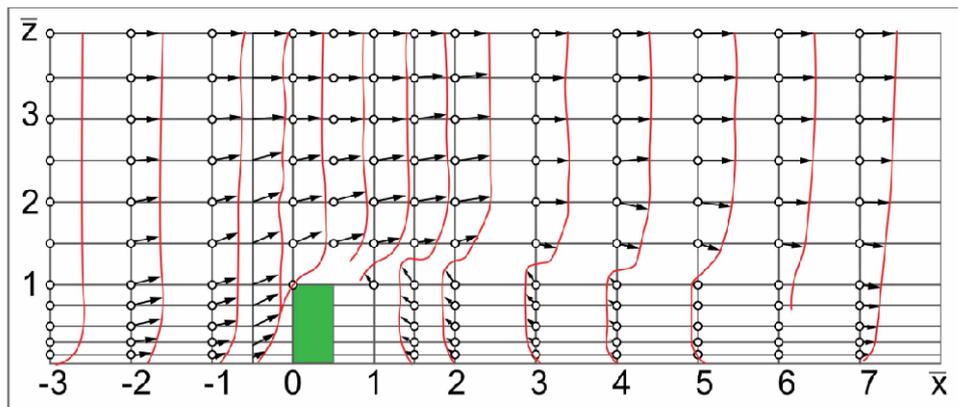


Рис. 1. Поле скоростей по оси симметрии здания

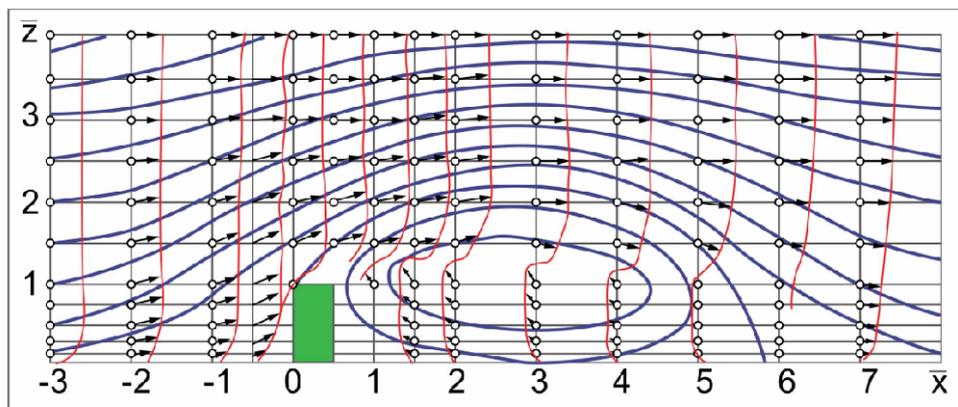


Рис. 2. Поле скоростей по оси симметрии здания с линиями тока, полученными расчетным методом

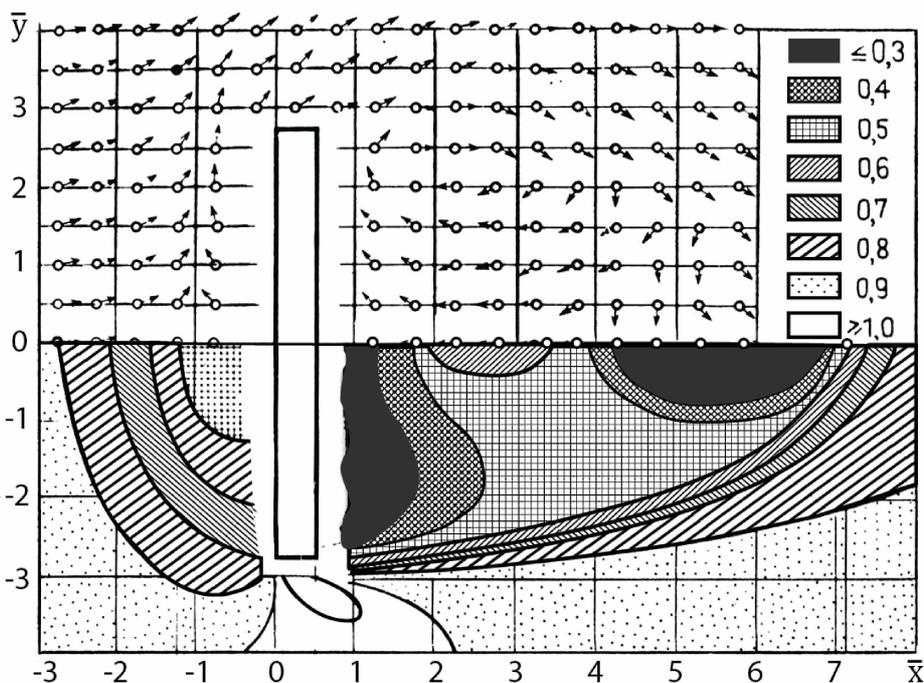


Рис. 3. Поле скоростей и значения коэффициентов трансформации воздушного потока в приземном слое на высоте 2 м (в натуре)

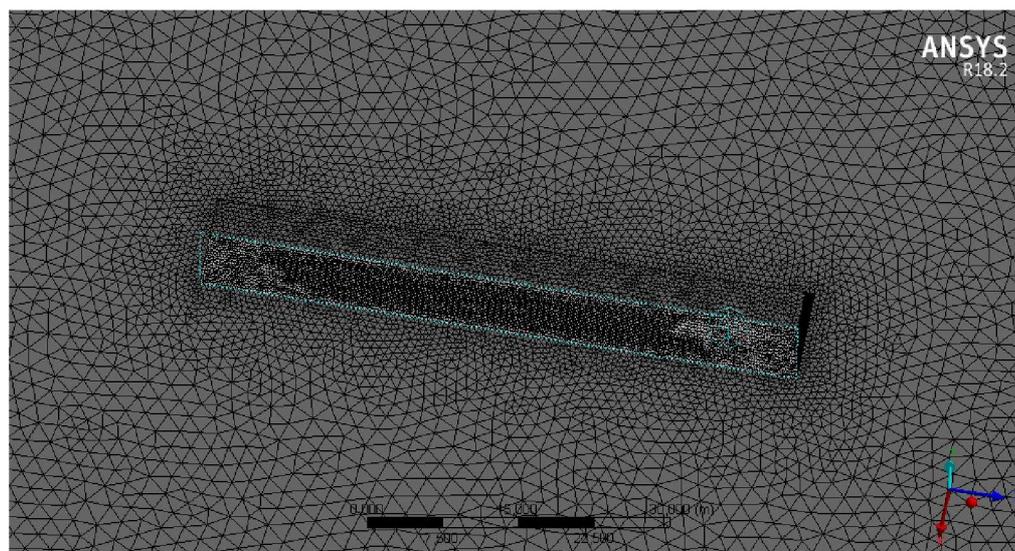


Рис. 4. Модель расчетной области с построенной сеткой КЭ

- генерация сеточной модели на основе созданной геометрии. Этот пункт был выполнен в пакете программного комплекса ANSYS MESHING;

- задание граничных и начальных условий, выбор физической модели расчета – препроцессинг.

2. Решение задачи в расчетном модуле.

3. Просмотр и оценка результатов – постобработка.

Для анализа была создана виртуальная модель здания с размерами, отвечающими условиям исходного полунатурного эксперимента [1]:

$$S \times H = 6, \quad (1)$$

где  $S$  – ширина здания (в аэродинамическом смысле);  $H$  – высота здания.

Длина здания в расчетах не учитывается и в эксперименте берется равной высоте – 10 м, ширина здания – 60 м.

Размеры расчетной области выбирались таким образом, чтобы ее границы не оказывали влияния на результаты расчетов, для этого выбирается характерный размер объекта  $H_{\max}$  – размер объекта в рассматриваемой плоскости; в данном случае за характерный размер области принимается ширина здания – 60 м. Для изолированных зданий рекомендуемые размеры расчетной области следующие [7, 8]:

$A \geq 5H_{\max}$  – расстояние от центра объекта до края расчетной области;

$B \geq 5H_{\max}$  – расстояние от центра объекта до границы Inlet (вход);

$C \geq 15H_{\max}$  – расстояние от центра объекта до границы Outlet (выход);

$D \geq 6H_{\max}$  – общая высота расчетной области;

$H_{\max}$  – размер объекта в рассматриваемой плоскости.

Таким образом, расчетная область построена с размерами: ширина – 600 м, длина – 600 м, высота – 100 м.

При проведении эксперимента методами конечно-элементного моделирования решающее значение в достижении точных результатов расчета имеет качество построения сетки конечных элементов (КЭ).

Плотность сетки при подготовке эксперимента регулировалась указанием максимальной величины для грани конечного элемента (параметр Max Face Size). Для параметра была выбрана величина в 2 м. Максимальный размер грани в выбранной области вокруг здания был взят 0,5 м. В результате была получена сетка конечных элементов, состоящая из 5470034 элементов (рис. 4).

Опыт исследований в аэродинамической трубе показывает, что при выполнении эксперимента необходимо соблюдение геометрического, кинематического и динамического подобий.

Геометрически эксперимент полностью воспроизводит реальные размеры здания. Кинематическое и динамическое подобия набегающего воздушного потока обеспечиваются программным комплексом ANSYS и анализом FluentFlow.

Условия изменения профиля скорости с высотой в расчетном модуле ANSYS Fluent задаются с помощью подключения к граничным условиям таблицы данных со значениями скоростей в формате csv.

Средняя скорость потока принята 15 м/с, поток направлен под прямым углом к зданию.

### Результаты моделирования и сравнение с первоначальными данными

После расчета была получена картина распределения потока воздуха, схематически разбитого с по-

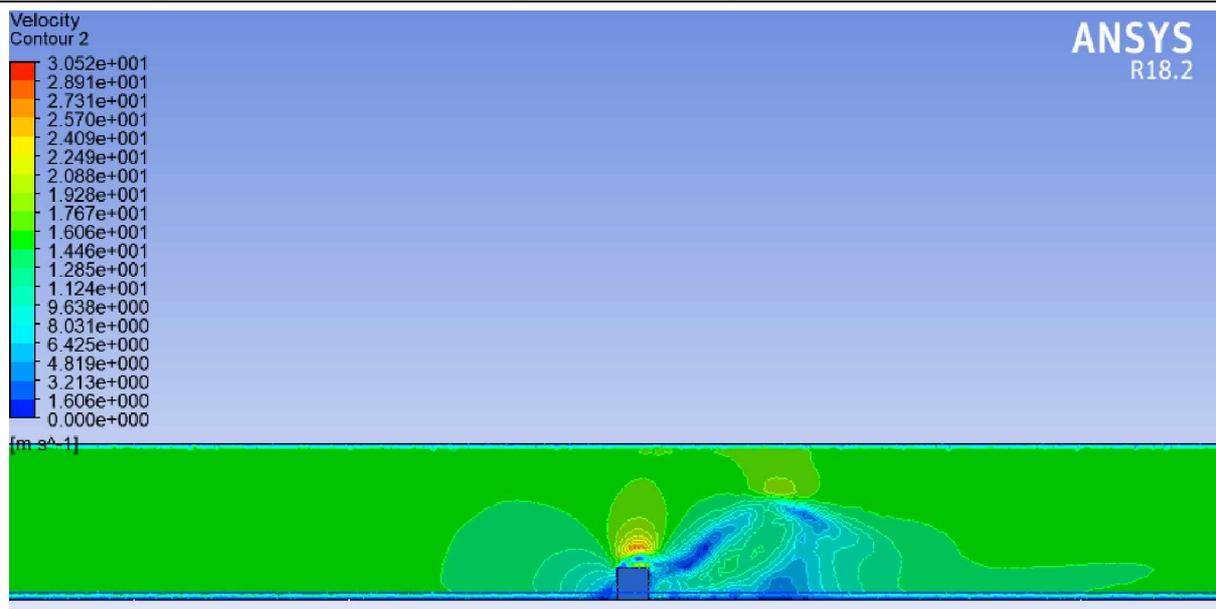


Рис. 5. Схема распределения скорости в симуляции в плоскости XY на высоте 2 м над землей

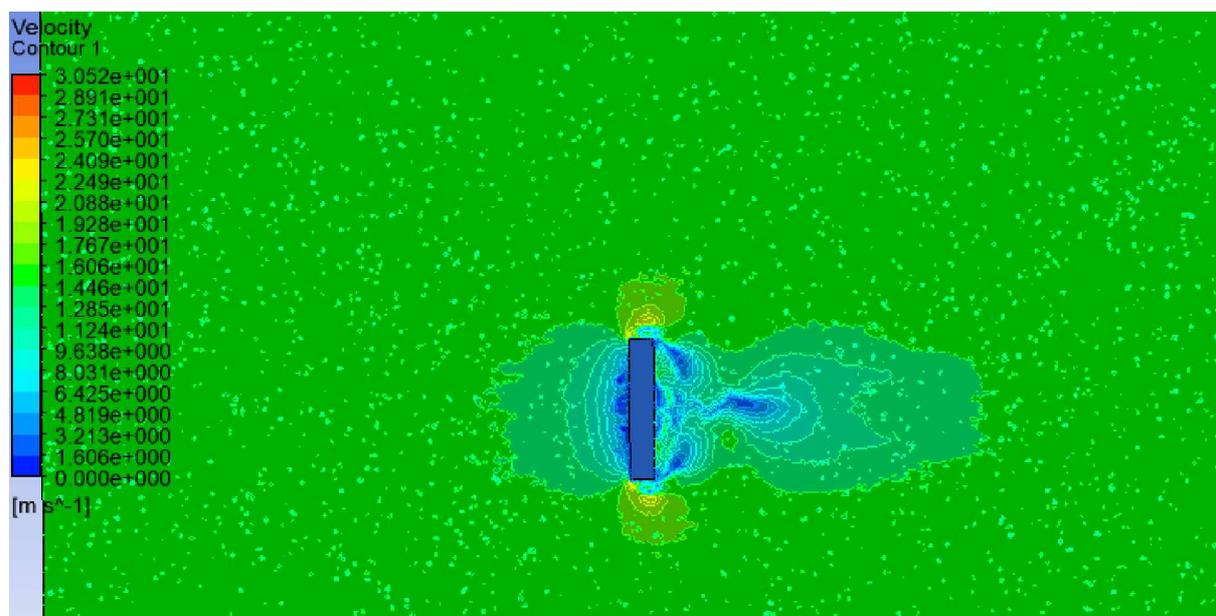


Рис. 6. Схема распределения скорости в симуляции в плоскости ZX на высоте 2 м над землей

мощью функции постпроцессора contour на 20 значений скорости (рис. 5, 6).

Для сравнения с результатами аналитических расчетов и полунатурных экспериментов были взяты пробы значений скорости в характерных точках расчетной области.

По результатам анализа были получены следующие значения, сгруппированные в таблице.

Для сравнения общей качественной картины результатов численного моделирования с результатами аналитических и полунатурных методов поле скоростей, полученное в результате компьютерного моделирования, было графически наложе-

но на схемы распределения коэффициентов трансформации (рис. 7, 8).

#### Выводы

Проведено численное моделирование по исходным данным в реальных масштабах, полученные данные были совмещены на одном графике для сравнения.

Очевидно, что полученные данные подтверждают сходимость и воспроизводимость исходных экспериментальных данных, а факт высокой схожести выходных коэффициентов трансформации и общей схожести качественной картины

# Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов

Сравнение результатов анализа поля скоростей в частных точках при компьютерном моделировании с данными, полученными в аэродинамической трубе

Коэффициент трансформации воздушного потока в области	Значения скорости, м/с	Среднее значение скорости, м/с	Отклонение от расчетного значения, %
менее 0,3	6,3	7,6	21
	7,6		
	8,8		
0,4	6,7	8,7	18
	8,5		
	10,8		
0,5	5,8	7,9	3
	7,6		
	10,4		
0,6	8,9	11,1	14
	9,5		
	14,8		
0,7	10,8	12,5	13
	12,3		
	14,1		
0,8	11,5	13,3	9
	12,3		
	16,1		
0,9	14,2	16,2	18
	16,3		
	18,1		

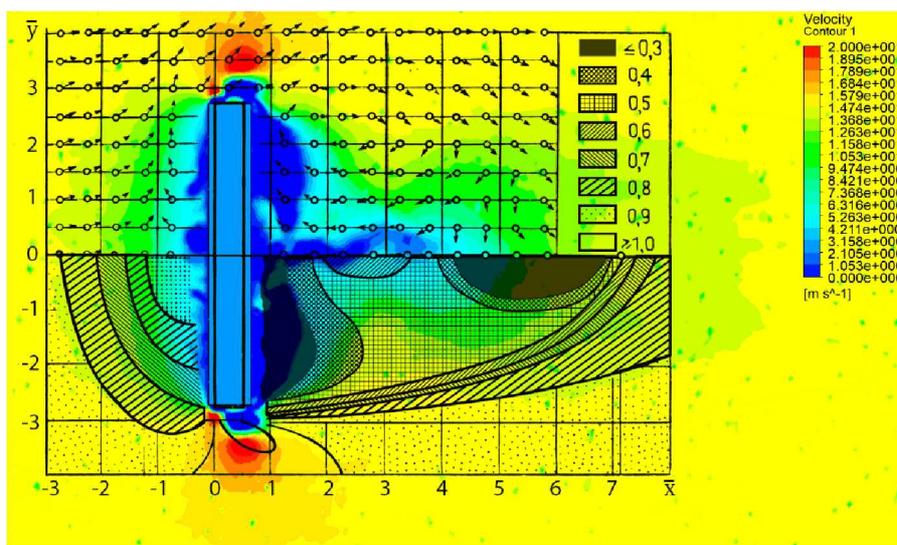


Рис. 7. Сравнение поля скоростей, полученного в результате численного моделирования, с полем коэффициентов трансформации, полученным опытным путем в горизонтальном сечении на высоте 2 м (в натуре)

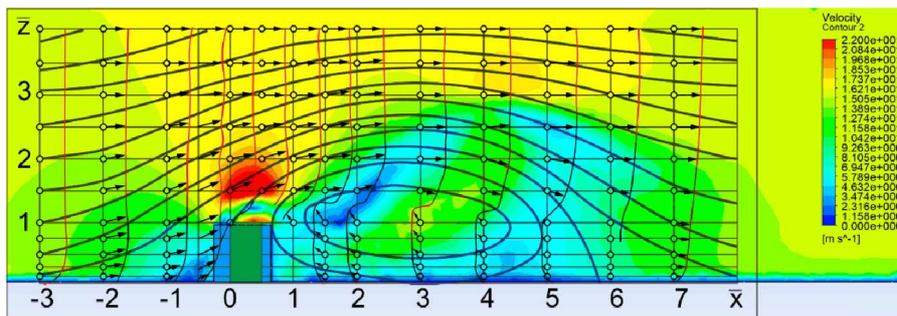


Рис. 8. Сравнение поля скоростей, полученного в результате численного моделирования, с полем коэффициентов трансформации, полученным аналитическим и опытным путем

с высокой долей вероятности может свидетельствовать о достоверности результатов исходного эксперимента.

Численное моделирование данного частного случая в реальном масштабе с разными настройками плотности расчетной сетки, а также качества моделирования позволили дополнительно уточнить результат путем получения информационной избыточности, при этом итоговые данные все равно сохранили качественную картинку и общий характер распределения.

Полученные в ходе сравнения данные подтверждают правильность настройки исходной модели и расчетов, следовательно, данная методика может быть использована как отправная точка для дальнейших исследований с применением технологий численного моделирования других более сложных случаев обтекания и ветрового воздействия на техногенный рельеф.

#### Литература

1. Серебровский, Ф.Л. Аэрация населенных мест / Ф.Л. Серебровский. – М.: Стройиздат, 1985. – 172 с.
2. Реттер, Э.И. Архитектурно-строительная аэродинамика / Э.И. Реттер. – М.: Стройиздат, 1984. – 294 с.
3. Оленьков, В.Д. Аэрационный режим города и его учет в градостроительном проектировании / В.Д. Оленьков, Д.С. Колбин // Строительство и образование: сб. науч. тр. – № 14. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – С. 71–74.
4. Колбин, Д.С. Исследование ветрового режима с целью аэрации и ветрозащиты городских территорий / Д.С. Колбин, В.Д. Оленьков // Вестн. ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2011. – № 1. – С. 36–39.
5. Kalmikov, A. Wind power resource assessment in complex urban environments: MIT campus case-study using CFD Analysis / A. Kalmikov, G. Dupont, K. Dykes, Cy Chan // AWEA 2010 WINDPOWER Conference, 2010.
6. Germak, T.E. Laboratory simulation of the atmospheric boundary layer / T.E. Germak // ATAA Paper. – 1970. – P. 70–75.
7. Семашко, К.И. Руководство по оценке и регулированию ветрового режима жилой застройки / К.И. Семашко. – М.: Стройиздат, 1986. – 59 с.
8. Оленьков, В.Д. Учет ветрового режима городской застройки при градостроительном планировании с использованием технологий компьютерного моделирования / В.Д. Оленьков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 21–27.
9. Поддаева, О.И. Архитектурно-строительная аэродинамика / О.И. Поддаева, И.В. Дунчикин // Вестник МГСУ. – 2017. – Вып. 12, № 6 (105). – С. 602–609.
10. Поддаева, О.И. Архитектурно-строительная аэродинамика: Учебное пособие / О.И. Поддаева, А.С. Кубенин, П.С. Чурин. – 2-е изд. – М.: МГСУ, 2017. – 88 с.
11. Olenkov, V.D. Study of wind effects on unique buildings / V.D. Olenkov, P.I. Puzyrev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – № 262. – 012154.
12. Рекомендации по оценке аэрации территории в жилой застройке г. Москвы / Отв. ред. И.К. Лифанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: МАКС Пресс, 2006. – 160 с.
13. Оленьков, В.Д. Численное моделирование ветрового воздействия на уникальные здания / В.Д. Оленьков, П.И. Пузырев // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2014. – № 4. – С. 87–89.

**Оленьков Валентин Данилович**, кандидат технических наук, профессор кафедры «Градостроительство, инженерные сети и системы», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), olenkovvd@susu.ru, centernasledie@mail.ru

**Бирюков Александр Дмитриевич**, аспирант кафедры «Строительное производство и теория сооружений», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), scaurender@gmail.com

**Тазеев Nailъ Тимурович**, магистрант кафедры «Строительные конструкции и сооружения», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), tazeev.nail@gmail.com

**Коротеев Кирилл Сергеевич**, магистрант кафедры автомобильного транспорта, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), koroteevns@mail.ru

Поступила в редакцию 5 декабря 2018 г.

## DETERMINATION OF THE COEFFICIENTS OF TRANSFORMATION OF THE AIR FLOW UNDER IMPACT ON A SINGLE BUILDING, USING TECHNOLOGIES OF COMPUTER MODELING

V.D. Olenkov, olenkovvd@susu.ru, centernasledie@mail.ru

A.D. Birjukov, crayrender@gmail.com

N.T. Tazeev, tazeev.nail@gmail.com

K.S. Koroteev, koroteevns@mail.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

A description is given of the methodology and example of setting up a computational case for performing numerical simulation of wind impact on a single building model according to a similar semi-natural experiment.

The article presents a solution to the problem of airflow past the profile of a single building, using the finite element analysis in the ANSYS FLUENT package and comparing the results with the data obtained in a wind tunnel. The use of computer simulation is currently relevant, since this method significantly speeds up the solution of problems and allows you to visualize the results obtained, and also makes it possible to compare these results with the previously obtained experimental data.

A graphical representation of the results obtained in the course of this study allows us to solve the problem of comparing and verifying the experimental data obtained experimentally on big-scale models.

*Keywords:* numerical modeling, computational hydrodynamics, urban planning, aeration, aeration mode map, velocity field, architectural aerodynamics, CFD modeling.

### References

1. Serebrovskiy F.L. *Aeratsiya naseleennykh mest* [Aeration of Localities]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1985. 172 p.
2. Retter E.I. *Arkhitekturno-stroitel'naya aerodinamika* [Architectural and Construction Aerodynamics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984. 294 p.
3. Olen'kov V.D., Kolbin D.S. [Aeration Mode of the City and its Teacher in a City Planning Project]. *Stroitel'stvo i obrazovaniye : sbornik nauchnykh trudov* [Construction and Education: a Collection of Scientific Papers]. Ekaterinburg, UrFU Publ., 2011, no. 14, pp. 71–74. (in Russ.).
4. Kolbin D.S., Olen'kov V.D. [Research Wind Regime for the Purpose of Aeration and Wind Protection of Urban Areas]. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura* [PNRPU Construction and Architecture Bulletin], 2011, no. 1, pp. 36–39. (in Russ.).
5. Kalmikov Alex. Wind Power Resource Assessment in Complex Urban Environments: MIT Campus Case-Study Using CFD Analysis, *AWEA 2010 WINDPOWER Conference*, 2010.
6. Germak T.E. *Laboratory Simulation of the Atmospheric Boundary Layer*. ATAA Paper Publ., 1970, pp. 70–75.
7. Semashko K.I. *Rukovodstvo po otsenke i regulirovaniyu vetrovogo rezhima zhiloy zastroyki* [Guidelines for Assessing and Regulating the Wind Regime of Residential Buildings]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986. 59 p.
8. Olenkov V.D. Accounting for Wind Regime of an Urban Development in Town Planning with the Use of Computer Simulation Technologies. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 21–27. (in Russ.).
9. Podayeva O.I., Dunichkin I.V. [Architectural and Building Aerodynamics]. *Vestnik MGSU*, 2017, no. 6(105), iss. 12, pp. 602–609. (in Russ.).
10. Podayeva O.I., Kubenin A.S., Churin P.S. *Arkhitekturno-stroitel'naya aerodinamika: Uchebnoye posobiye* [Architectural and Construction Aerodynamics: Tutorial]. Moscow, MGSU Publ., 2017. 88 p.
11. Olenkov V.D., Puzyrev P.I. [Study of wind effects on unique buildings]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, no. 262, 012154. DOI:10.1088/1757-899X/262/1/012154

12. Lifanov I.K. (Ed.) Rekomendatsii po otsenke aeratsii territorii v zhiloy zastroyke g. Moskvy [Recommendations for the Assessment of Aeration of the Territory in Residential Buildings in Moscow]. Moscow, MAKS Press Publ., 2006. 160 p.

13. Olen'kov V.D., Puzyrev P.I. [Numerical Simulation of Wind Impact on Unique Buildings]. Akademicheskiy vestnik UralNIIproekt RAASN [Academic Bulletin UralNIIproekt RAASN], 2014, no. 4, pp. 87–89. (in Russ.).

*Received 5 December 2018*

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Определение коэффициентов трансформации воздушного потока при воздействии на одиночное здание с использованием технологий компьютерного моделирования / В.Д. Оленьков, А.Д. Бирюков, Н.Т. Тазеев, К.С. Коротеев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 5–13. DOI: 10.14529/build190101

#### FOR CITATION

Olenkov V.D., Birjukov A.D., Tazeev N.T., Koroteev K.S. Determination of the Coefficients of Transformation of the Air Flow Under Impact on a Single Building, Using Technologies of Computer Modeling. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2019, vol. 19, no. 1, pp. 5–13. (in Russ.). DOI: 10.14529/build190101

---