

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, ЦИФРОВАЯ ПОДДЕРЖКА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЙ

УДК 624.042:004

О. И. ВЕДЯЙКИНА, канд. физ.-мат. наук, доц., доц. кафедры общей физики и теоретической механики; П. А. ХАЗОВ, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры теории сооружений и технической механики; И. С. СОБОЛЬ, д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой гидротехнических сооружений; О. В. ФУРСА, студент

ВЛИЯНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ РАСЧЕТНОГО ПРОСТРАНСТВА НА ДОСТОВЕРНОСТЬ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЫ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 433-14-54; эл. почта: razvnauki@rambler.ru

Ключевые слова: цифровой двойник, цифровая поддержка, компьютерное моделирование, граничные условия, аэродинамическая труба.

Исследуется влияние граничных условий расчетной области при моделировании компьютерного эксперимента на реалистичность цифрового двойника малогабаритной аэродинамической трубы. Проведен сравнительный анализ трех наиболее распространенных вариантов, определяющих поведение моделируемой воздушной среды на границах задаваемой области.

Введение

В современную эпоху внедрение методов цифровизации в процессы проведения научных исследований и инженерных расчетов является актуальной задачей, включающей, в том числе, методики цифровой поддержки широкого спектра сложных технических устройств для проведения физических экспериментов различных отраслей [1–7]. Примером таких экспериментальных систем выступают аэродинамические трубы [8, 9], недостаток работы которых заключается в сложности визуализации полученных данных и, соответственно, в их обработке.

Следовательно, создание надежных методов цифровой поддержки, позволяющих эффективно обрабатывать, анализировать и визуализировать результаты, является критически важной задачей. Ее решение лежит в области современного компьютерного моделирования, позволяющего создавать виртуальные модели физических процессов, происходящих во время экспериментов, что способствует разработке более точных методик цифровой поддержки, внедрение которых в инженерную практику способствует повышению качества исследований.

Для проведения компьютерных экспериментов с аэродинамическими установками возникает необходимость создания их высокоточных цифровых копий – цифровых двойников, в соответствии с ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий». Это задача, требующая детального моделирования. Цифровой двойник должен



воспроизводить не только точную геометрию и размеры реальной установки, включая сопутствующие элементы, но и с высокой степенью точности учитывать свойства окружающей среды.

Материалы и методы

При моделировании цифрового двойника в программном комплексе *ANSYS* создается расчетная область, имитирующая физическое поведение окружающей среды при проведении аэродинамического эксперимента. Расчетная область представляет собой геометрическое пространство, в пределах которого производится решение дифференциальных уравнений, описывающих исследуемые явления [10 11]. Границы расчетной области играют важную роль, поскольку именно на них задаются граничные условия – физические ограничения, определяющие поведение моделируемой среды. Различные варианты задания граничных условий позволяют, при необходимости, исследовать широкий спектр сценариев проведения экспериментов и оценить влияние внешних факторов на изучаемый процесс. Таким образом, грамотный выбор соответствующих граничных условий является залогом достоверности и точности результатов компьютерного моделирования.

Для исследования влияния условий на границах исследуемой расчетной области в ПК *ANSYS* были выбраны следующие варианты:

- *Symmetry*;
- *Outlet*;
- *Opening*.

Граничное условие *Symmetry* (Симметрия) в ПК *ANSYS* используется для моделирования симметричных потоков или симметричной геометрии, часто применяется при воспроизведении натуральных аэродинамических экспериментов в строительстве, так как позволяет сократить размер расчетной области, предполагая, что скорости и давления на границе симметричны относительно этой границы. Это, в свою очередь, уменьшает время вычислений и необходимые ресурсы.

Условие *Outlet* (Выход) предполагает, что поток может свободно выходить из области, при этом давление «выхода» задается как статический или относительный параметр. Обычно используется в тех случаях, когда поток выходит из расчетной области без каких-либо дополнительных ограничений, без возможности возвращения обратно.

Условие *Opening* (Открытие) также используется для обозначения выхода потока, но оно более универсально. Позволяет учитывать возможность входа и выхода потока, что делает его более подходящим для ситуаций, когда поток может изменяться в зависимости от условий на границе (например, в результате изменения давления).

Таким образом, в ПК *ANSYS* при проведении аэродинамических экспериментов разница между граничными условиями заключается в том, как они обрабатывают поток и давление на границах расчетной области.

Цифровой двойник, повторяющий все геометрические размеры и нюансы установки, создается для дозвуковой вертикальной аэродинамической трубы малых габаритов с открытой рабочей областью, расположенной на кафедре отопления и вентиляции Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета (рис. 1).

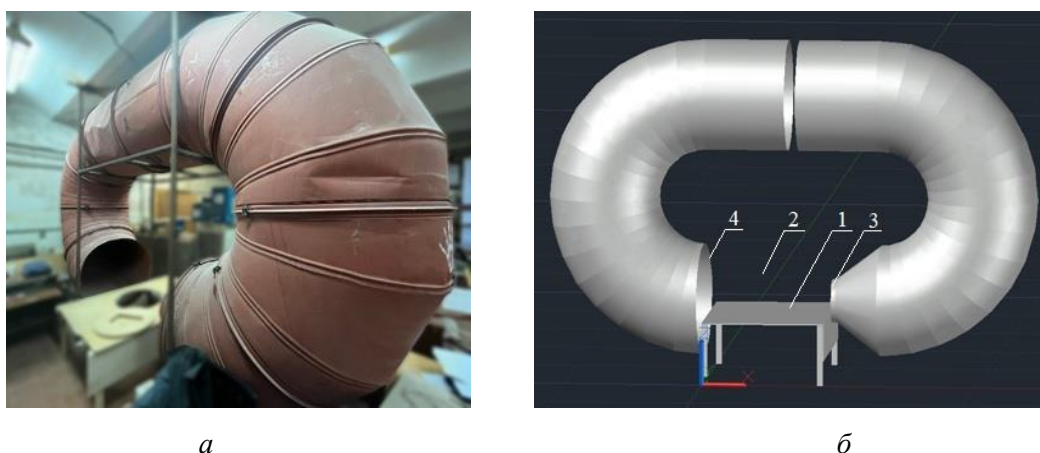


Рис. 1. *а* - прототип цифрового двойника – аэродинамическая труба. *б* - цифровой двойник: 1 – подмакетник; 2 – рабочая область; 3 – выходное сечение; 4 – входное сечение.

Для выполнения компьютерного моделирования аэродинамического эксперимента в граничном условии *Outlet* задается значение относительного постоянного давления 0 Па, при задании граничного условия *Opening* значение давления также устанавливается 0 Па, что позволяет осуществлять свободный выход воздушных потоков без сопротивления на границах области. Граничное условие *Symmetry* не содержит дополнительных параметров.

Кроме сравниваемых граничных условий расчетной области задаются следующие параметры для проведения компьютерного моделирования:

1. Размеры расчетной области ограничены реальными размерами помещения, где расположена установка, и боковыми припусками до 500 мм для возможности отслеживания смещения воздушных масс рабочей области и окружающего пространства.

2. Расчетная сетка конечных элементов сгущается к выпускам аэродинамической трубы и поверхности подмакетника.

3. Расчетная область обладает свойствами несжимаемой газовой среды, т. к. скорости движения воздушных потоков малы.

4. Все твердые поверхности имеют условие, не допускающее проникание сквозь них воздушных потоков, а также обладают свойством свободного скольжения вдоль поверхности, так как вязкость воздуха незначительна при малых скоростях.

5. Вход воздушных масс осуществляется через сечение трубы. Значение начальной скорости задается с условием ее достижения 12 м/с в выходном сопле у границы подмакетника.

6. Сечение трубы, через которое осуществляется выход воздушных масс, обладает свойством *Outlet*.

Результаты исследования

При проведении компьютерного эксперимента задавалось условие либо достижения уровня сходимости невязок 10^{-4} , либо отсутствия достижения предыдущего условия проведения ста итераций расчета (рис. 2).

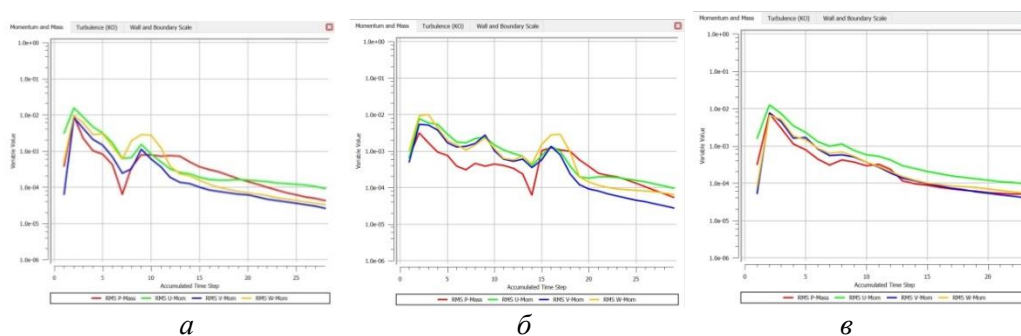


Рис. 2. Графики сходимости при разных условиях границ расчетной области: а - *Symmetry*; б - *Outlet*; в - *Opening*

Достаточно плавное решение уравнений Навье – Стокса наблюдается у всех видов граничных условий расчетной области. Необходимый уровень сходимости достигается менее чем за 30 итераций.

Так как все компьютерные эксперименты показали быструю сходимость невязок и решение, то и затраченное на их проведение время отличается незначительно (табл. 1).

Таблица 1

**Время расчета в программе
при разных условиях границ расчетной области**

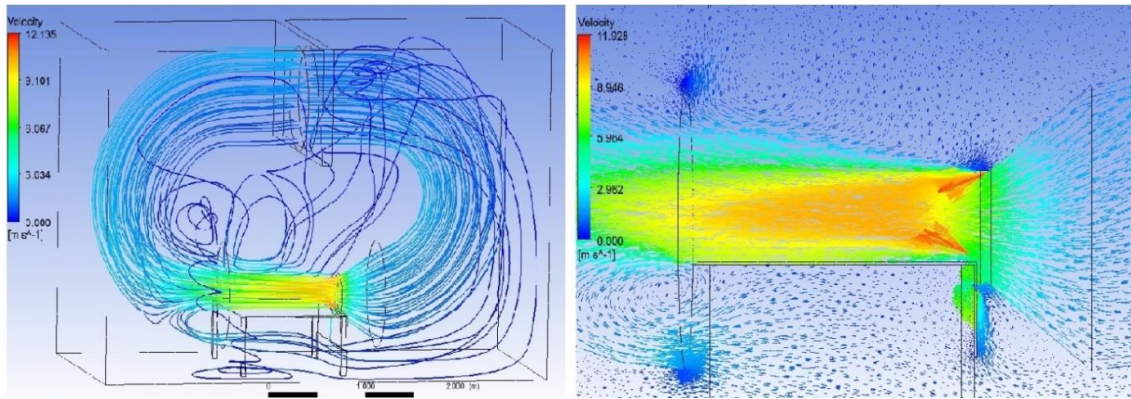
Модель турбулентности	Время расчета
<i>Symmetry</i>	21 мин 42 сек
<i>Outlet</i> (0 Па)	19 мин 34 сек
<i>Opening</i> (0 Па)	17 мин 35 сек

Наиболее быстрый расчет был проведен в компьютерном эксперименте с граничным условием *Opening* расчетной области.

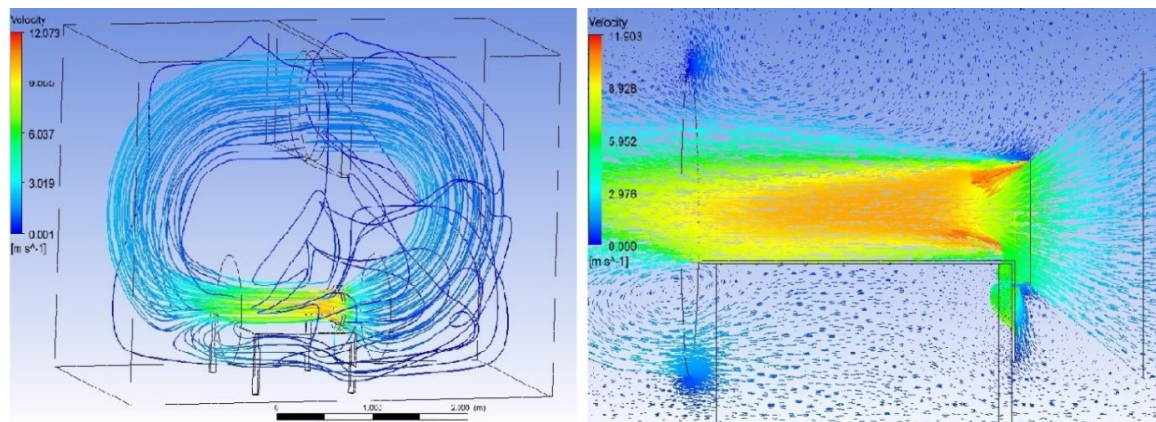
Для определения оптимального условия на границе расчетной области, наиболее точно отражающего проведение реального эксперимента, сходимость решения не является определяющим фактором. При создании эффективной цифровой модели аэродинамической трубы наиболее важным параметром является распределение воздушных потоков (как по направлению, так и по величине) (рис. 3).

Направление и изменения скоростей в рабочей области аэродинамической установки визуально достаточно близки, но при этом, оценивая движение воздушных масс вокруг трубы, можно заметить, что незначительное смещение потоков с окружающей средой происходит при граничных условиях *Symmetry* и *Outlet*, а при *Opening* смещение полностью отсутствует и аэродинамический поток совершенно однородный.

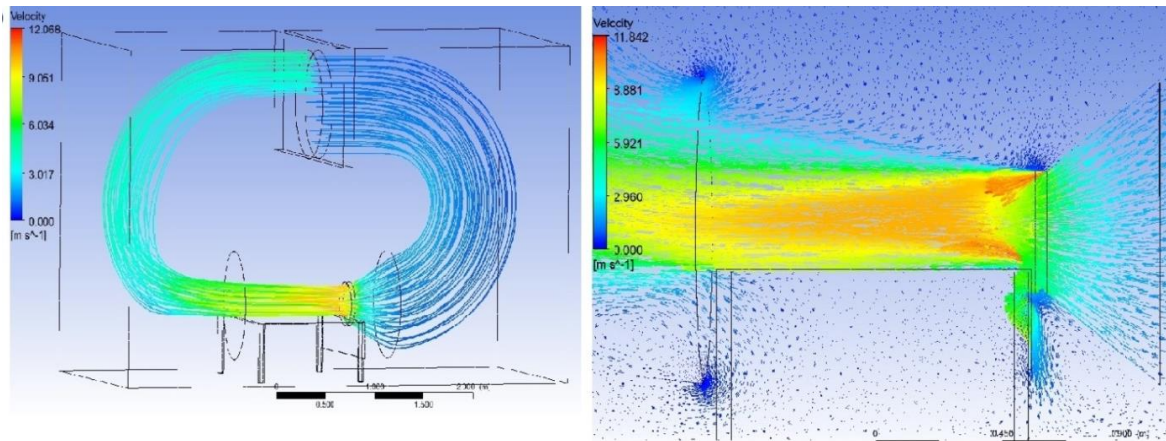
Более детальное количественное сравнение воздушных потоков представлено в табл. 2, где приведены данные по скоростям из трех ключевых зон: входного сечения, центральной части рабочей области (подмакетника) и выходного сечения.



а



б



в

Рис. 3. Распределение воздушных потоков в расчетной и рабочей области при разных условиях границ расчетной области: а - *Symmetry*; б - *Outlet*; в - *Opening*



Таблица 2

**Сравнение значений модулей скоростей
при разных условиях границ расчетной области целая труба**

Высота точки от уровня пола, м	Граничные условия расчетной области			Максимальная разница, %
	<i>Symmetry</i>	<i>Outlet</i> (0Па)	<i>Opening</i> (0Па)	
Значения скоростей на выходном сечении, м/с				
0,56	5,01	6,33	6,36	21,27
0,65	10,02	10,03	9,92	1,07
0,75	9,62	9,76	9,58	0,94
0,85	9,74	9,65	9,59	1,51
Значения скоростей в середине рабочей области, м/с				
0,56	7,96	8,23	7,99	3,36
0,65	9,58	9,72	9,53	1,98
0,75	10,06	10,1	10,0	0,94
0,85	8,15	7,79	7,8	4,44
0,90	5,41	5,35	5,35	1,26
Значения скоростей на входном сечении, м/с				
0,56	4,44	4,35	6,04	27,98
0,65	8,31	8,37	8,9	6,59
0,75	8,75	8,47	9,15	7,39
0,85	6,84	6,51	7,31	10,99
0,90	5,38	5,15	5,98	13,91
Значения максимальных скоростей, м/с				
	12,135	12,073	12,068	0,55

В отдельных точках расхождение достигает 28 %, хотя в большинстве случаев оно небольшое и остается в пределах 10 %. Для более объективной оценки значений скоростей и нейтрализации возможности точечных исключений в табл. 3 приведены средние показатели по потокам.

Таблица 3

**Среднее значение модулей скоростей
при разных условиях границ расчетной области**

Область замеров	Значения скоростей при граничных условиях расчетной области, м/с			Максимальная разница, %
	<i>Symmetry</i>	<i>Outlet</i> (0Па)	<i>Opening</i> (0Па)	
выходное сечение	7,902	7,828	7,672	2,9
середина рабочей области	8,681	8,718	8,599	1,36
входное сечение	7,240	7,078	8,923	10,67

Отличия по средним значениям скоростей также незначительны, оставаясь в допустимой погрешности. При этом наиболее близкие результаты были получены



при использовании граничных условий *Symmetry* и *Outlet*, разница между которыми составила всего 2,24 %.

Выводы

Моделирование компьютерного эксперимента с использованием граничного условия *Opening* было самое быстрое, но при этом оно также привело к наибольшему расхождению в скоростях воздушного потока и, что более важно, к искажению распределения потока, без какого-либо смещения с окружающей воздушной средой, что не соответствует реальной ситуации. Измерение показателей модулей скоростей при проведении физического эксперимента над реальной аэродинамической трубой показало, что скорости за пределами рабочей области резко снижаются, но при этом незначительное смещение воздушных масс происходит, т. к. система не изолирована от остального помещения. Наиболее точно такое смещение иллюстрируют компьютерные эксперименты с граничными условиями *Symmetry* и *Outlet*.

Условие *Symmetry* используется для упрощения модели расчетной области за счет ее симметрии, а *Outlet* отражает более приближенную к реальности ситуацию, когда осуществляется беспрепятственный выход воздушного потока. Поэтому, несмотря на близкие значения результатов моделирования, в дальнейшем исследовании задачи создания цифрового двойника аэродинамической трубы наиболее подходящим граничным условием принято *Outlet*.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Февральских, А. В. Цифровая поддержка проектирования аэрогидродинамической компоновки скоростного амфибийного судна / А. В. Февральских // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2025. – Т. 22, № 1 (247). – С. 35–41. – DOI 10.14489/vkit.2025.01.pp.035-041. – EDN LLPGGC.
2. Белостоцкий, А. М. Численное моделирование задач строительной аэродинамики. Разработка методик расчета ветровых воздействий и исследование реальных объектов / А. М. Белостоцкий, С. И. Дубинский, И. Н. Афанасьева // Вестник МГСУ, 2010. – № 4–5 – С. 182–185.
3. Замолоцких, О. А. Определение аэродинамических характеристик неуправляемых авиационных средств поражения в связке с летательным аппаратом в программном комплексе ANSYS CFX / О. А. Замолоцких, А. А. Испулов, А. В. Волчок // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 203–209. – DOI: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.203-209.
4. Хазов, П. А. Компьютерное моделирование аэродинамического обтекания и оценка пешеходной аэродинамической комфортности комплекса зданий / П. А. Хазов, О. И. Ведяйкина // Омский научный вестник. – 2024. – No 3 (191). – С. 56–63. – DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-56-63.
5. Газаров, А. Р. Применение программного обеспечения Ansys для выявления аэродинамических характеристик зданий / А. Р. Газаров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 11. – С. 344–347.
6. Singh, J. CFD simulation of the wind field around pyramidal roofed single-story buildings / J. Singh, A. K. Roy. – URL: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1476-2> (дата обращения: 08.07.2025).
7. Ветрянщиков, И. А. К вопросу о компьютерном моделировании и анализе аэродинамики группы зданий городского района. / И. А. Ветрянщиков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 12. – С. 253–255.



8. Ведяйкина, О. И. Алгоритм цифровой поддержки работоспособности малогабаритных аэродинамических экспериментальных установок / О. И. Ведяйкина, П. А. Хазов, С. С. Шилов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2025. – Т. 25, № 2. – С. 62–71. – DOI 10.14529/build250208. – EDN RZJJND.

9. Численное исследование влияния степени загромождения потока на аэродинамические коэффициенты моделей в аэродинамических трубах малых скоростей / В. Т. Буй, В. Т. Калугин, В. И. Лапыгин, А. И. Хлупнов // Теплофизика и аэродинамика. – 2017. – Т. 24, № 6. – С. 881–890.

10. Седов, Л. И. Механика сплошной среды : в 2-х томах / Л. И. Седов. – Москва : Наука, 1973. – Том 1. – 536 с.

11. Седов Л. И. Механика сплошной среды : в 2-х томах / Л. И. Седов. – Москва : Наука, 1973. – Том 2. – 584 с.

VEDIAIKINA Olga Ivanovna, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, associate professor at the chair of general physics and theoretical mechanics; KHAZOV Pavel Alekseevich, doctor of technical sciences, associate professor, professor of the chair of theory of structures and technical mechanics; SOBOL Ilya Stanislavovich, doctor of technical sciences, associated professor, holder of the chair of hydraulic structures; FURSA Olga Vitalevna, student

INFLUENCE OF COMPUTATIONAL DOMAIN BOUNDARY CONDITIONS ON THE RELIABILITY OF A DIGITAL TWIN OF A WIND TUNNEL

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: (831) 433-14-54; e-mail: razvnauki@rambler.ru

Key words: digital twin, digital support, computer simulation, boundary conditions, wind tunnel.

The influence of boundary conditions of the computational domain on the reliability of a digital twin of a small-scale aerodynamic tunnel during a computer experiment is investigated. A comparative analysis of the three most common variants, determining the behavior of the simulated airflow at the boundaries of the specified domain, has been conducted.

REFERENCES

1. Fevral'skikh A. V. Tsifrovaya podderzhka proektirovaniya aerogidrodinamicheskoy komponovki skorostnogo amfibiynogo sudna [Digital support for designing the aerodynamic and hydrodynamic configuration of a high-speed amphibious vessel]. Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologiy [Herald of Computer and Information Technologies], 2025, Vol. 22, № 1 (247), P. 35–41. DOI 10.14489/vkit.2025.01.pp.035-041. EDN LLPGGC.

2. Belostotsky A. M., Dubinsky S. I., Afanasyeva I. N. Chislennoe modelirovanie zadach stroitel'noy aerodinamiki. Razrabotka metodik rascheta vetrovykh vozdeystviy i issledovanie realnykh obektov [Numerical modeling of problems in building aerodynamics. Development of methods for calculating wind effects and investigation of real objects]. Vestnik MGSU, 2010, № 4–5, P. 182–185.

3. Zamolotskikh O. A., Ispulov A. A., Volchok A. V. Opredelenie aerodinamicheskikh kharakteristik neupravlyaemykh aviatsionnykh sredstv porazheniya v svyazke s letatel'nyim



apparatom v programmnom komplekse ANSYS CFX [Determination of aerodynamic characteristics of unguided aircraft munitions in conjunction with an aircraft in the ANSYS CFX software package]. Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Transactions of the Tambov State Technical University], 2018, Vol. 24, № 2, P. 203–209. DOI: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.203-209.

4. Khazov P. A., Vediaikina O. I. Kompyuternoe modelirovanie aerodinamicheskogo obtekaniya i otsenka peshekhodnoy aerodinamicheskoy komfortnosti kompleksa zdaniy [Computer modeling of aerodynamic flow and assessment of pedestrian aerodynamic comfort for a building complex]. Omskiy nauchny vestnik [Omsk Scientific Bulletin], 2024, № 3 (191), P. 56–63. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-56-63.

5. Gazarov A. R. Primenenie programmnoy obespecheniya ANSYS dlya vyyavleniya aerodinamicheskikh kharakteristik zdaniy [Application of ANSYS software to identify aerodynamic characteristics of buildings]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya of Tula State University. Technical Sciences], 2020, № 11, P. 344–347.

6. Singh J., Roy A. K. CFD simulation of the wind field around pyramidal roofed single-story buildings. URL: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1476-2> (accessed: 08.07.2025).

7. Vetryanshchikov I. A. K voprosu o kompyuternom modelirovanii i analize aerodinamiki gruppy zdaniy gorodskogo rayona [On the issue of computer modeling and analysis of aerodynamics of a group of buildings in an urban district]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya of Tula State University. Technical Sciences], 2021, № 12, P. 253–255.

8. Vediaikina O. I., Khazov P. A., Shilov S. S. Algoritm tsifrovoy podderzhki rabotosposobnosti malogabaritnykh aerodinamicheskikh eksperimentalnykh ustanovok [Algorithm for digital support of the operability of small-scale aerodynamic experimental facilities]. Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitelstvo i arkhitektura [Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction Engineering and Architecture], 2025, Vol. 25, № 2, P. 62–71. DOI 10.14529/build250208. EDN RZJJND.

9. Bui V. T., Kalugin V. T., Lapygin V. I., Khlupnov A. I. Chislennoe issledovanie vliyaniya stepeni zagromozhdeniya potoka na aerodinamicheskie koeffitsienty modeley v aerodinamicheskikh trubakh malyykh skorostey [Numerical investigation of the influence of the degree of flow blockage on the aerodynamic coefficients of models in low-speed wind tunnels]. Teplofizika i aerodinamika [Thermophysics and Aeromechanics], 2017, Vol. 24, № 6, P. 881–890.

10. Sedov L. I. Mekhanika sploshnoy sredy [Continuum mechanics]: v 2-kh tomakh. Moscow, Nauka, 1973, Vol. 1, 536 p.

11. Sedov L. I. Mekhanika sploshnoy sredy [Continuum mechanics]: v 2-kh tomakh. Moscow, Nauka, 1973, Vol. 2, 584 p.

© О. И. Ведяйкина, П. А. Хазов, И. С. Соболев, О. В. Фурса, 2026

Получено: 19.12.2025 г.