

ВЛИЯНИЕ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПРИ МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ РАСЧЕТНОЙ СЕТКЕ И МАЛЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СКОРОСТЯХ

О.И. Ведяйкина[✉]

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет
(ННГАСУ), Нижний Новгород, Россия
[✉] razvnauki@rambler.ru

Аннотация. Развитие цифровизации в настоящее время позволяет осуществлять внедрение современных технологий в процессы проведения научных и инженерных экспериментов в различных областях промышленности. В рамках данной статьи рассматривается процесс создания цифрового двойника сложной технической установки для проведения масштабных экспериментов на примере малогабаритной дозвуковой аэродинамической трубы, используемой в исследованиях в области строительной аэродинамики. Основной задачей является анализ влияния выбора модели турбулентности на результаты компьютерных экспериментов при использовании мелкодисперсной расчетной сетки и малых скоростях воздушных потоков. В ходе исследования сравниваются три распространённые модели (k-ε, SST и BSL RS) с целью определения оптимальной для данного типа исследований. Результаты показывают, что модели дают сходные по характеру распределения потоков результаты, однако модель SST демонстрирует наиболее эффективный баланс между точностью и вычислительной ресурсозатратностью, обеспечивая наиболее плавное и быстрое решение и минимальные отличия от более сложных моделей. Полученные выводы позволяют прийти к заключению о целесообразности использования модели SST для дальнейших расчетов, что способствует повышению эффективности процессов цифровой поддержки аэродинамических исследований и поддержанию жизненного цикла технической установки.

Ключевые слова: строительная аэродинамика, компьютерное моделирование, цифровой двойник, аэродинамический эксперимент, малогабаритная аэродинамическая установка, цифровая поддержка, модель турбулентности

Для цитирования. Ведяйкина О.И. Влияние модели турбулентности на результаты вычислительных экспериментов при мелкодисперсной расчетной сетке и малых аэродинамических скоростях // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2026. Т. 26, № 1. С. 76–86. DOI: 10.14529/build260109

Original article
DOI: 10.14529/build260109

THE INFLUENCE OF THE TURBULENCE MODEL ON THE RESULTS OF COMPUTATIONAL EXPERIMENTS WITH A FINE-DISPERSED CALCULATION GRID AND LOW AERODYNAMIC VELOCITIES

O.I. Vediaikina[✉]

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
Nizhny Novgorod, Russia
[✉] razvnauki@rambler.ru

Abstract. The development of digitalization has enabled the widespread adoption of modern technologies in scientific and engineering experiments in various industrial fields. This article discusses the process of creating a digital twin for complex technical systems for conducting large-scale experiments using a small-sized subsonic wind tunnel applied in structural aerodynamics research. The main objective is to analyze the impact of the turbulence model selection on the results of computer experiments performed on a fine-resolution computational grid at low airflow velocities. The study compares three common models (k-ε, SST, and BSL RS) to determine the optimal model for this type of research.

The results show that the models produce similar flow distribution patterns, but the SST turbulence model demonstrates the most effective balance between accuracy and computational complexity, providing the smoothest and fastest solution with minimal differences from more complex models. Based on these findings, the SST turbulence model is recommended for further calculations. Its application can improve the efficiency of digital support for aerodynamic research and maintain the lifecycle of the technical installation.

Keywords: construction aerodynamics, computer modeling, digital twin, aerodynamic experiment, small-sized aerodynamic tunnel, digital support, turbulence model

For citation. Vediaikina O.I. The influence of the turbulence model on the results of computational experiments with a fine-dispersed calculation grid and low aerodynamic velocities. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2026;26(1):76–86. (in Russ.). DOI: 10.14529/build260109

Введение

В современном мире перед инженерами и учеными стоит острая необходимость разработки эффективных алгоритмов и методик для обеспечения цифровой поддержки широкого спектра технических устройств. Эта потребность особенно актуальна для сложных высокотехнологичных объектов машиностроительной, судостроительной, авиационной и строительной отраслей. Примером таких экспериментальных установок служат аэродинамические трубы [1, 2]. Проблема заключается в том, что эксперименты в них, несмотря на их важность, зачастую недостаточно исследованы в связи со сложностью визуализации получаемых данных.

Таким образом, разработка надежных методов цифровой поддержки, позволяющей эффективно обрабатывать, анализировать и визуализировать результаты экспериментов, является критически важной задачей, решение которой можно найти в современных методах компьютерного моделирования [3–8]. Они позволяют создавать виртуальные модели физических процессов, происходящих в ходе экспериментов, что способствует разработке более точных и надежных методик цифровой поддержки, которые впоследствии могут быть внедрены в инженерную практику, что позволит улучшить качество проектируемых объектов и систем.

Одним из наиболее перспективных направлений в разработке алгоритмов цифровой поддержки является применение цифровых двойников, представляющих собой виртуальную копию объекта или системы, обладающую характеристиками, приближенными к своему реальному прототипу.

Цифровой двойник, используемый в аэродинамических экспериментах, должен максимально точно отражать все характеристики реальной установки, включая её геометрию, а также свойства среды и параметры воздушного потока [9, 10]. Только при условии высокой степени соответствия между цифровым двойником и реальным объектом результаты моделирования будут надежными и применимыми на практике.

Материалы и методы

Создание цифрового двойника аэродинамической установки для последующего проведения достоверных вычислительных экспериментов – задача, требующая высокого уровня детализации модели и точности её физических характеристик. Это означает, что виртуальная модель должна учи-

тывать не только все детали реальной установки – её геометрическую форму и размеры, но и свойства окружающей среды и воздушного потока. Ключевым аспектом при этом является выбор модели турбулентности при компьютерном моделировании, который напрямую влияет на достоверность результатов и, как следствие, на эффективность всего процесса исследования. Цель данной статьи – подробно изучить это влияние для дальнейшего сопоставления данных с полученными в реальных экспериментах в аэродинамической трубе.

Турбулентность является неотъемлемой частью аэродинамического потока, оказывающей значительное влияние на распределение сил, действующих на исследуемый в рамках эксперимента объект.

Компьютерное моделирование движения жидкостей и газов вокруг твердых тел основано на решении сложной системы уравнений Навье – Стокса [11–13]. Для точного описания течения используют одновременно уравнения движения:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \end{cases} \quad (1)$$

которые могут быть записаны в матричном виде:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} + \frac{\mu}{\rho} \Delta \mathbf{V} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{f}, \quad (2)$$

и уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

где u, v, w (м/с) – проекции скоростей движения частиц в элементарных потоках на оси принятой глобальной системы координат XYZ; t – время (с); ρ – плотность аэродинамической среды (кг/м³), в условиях решаемой задачи принимается плотность атмосферы; p – давление в изучаемой точке пространства (Па); μ/ρ – коэффициент кинематической вязкости среды (м²/с), где μ – соответственно коэффициент динамической вязкости (кг/(м·с)); ∇ – оператор набла; Δ – векторный оператор Лапласа; \mathbf{V} – поле векторов скоростей; \mathbf{f} – поле векторов массовых сил.

Важно отметить, что на данный момент не найдено универсального аналитического решения уравнений, поэтому для их решения используются приближенные численные методы.

С увеличением вычислительных мощностей стало возможным выполнять расчёты с применением уравнения Навье – Стокса методом конечных элементов, результаты которого отличаются высокой точностью. В настоящее время многие специализированные программные пакеты предлагают решение уравнения, основанное на усреднении по числу Рейнольдса (RANS). Однако для того чтобы выполнить это решение, необходимо использовать модель турбулентности, которая позволяет замкнуть систему уравнений и получить корректные результаты.

В CFD-моделировании (Computational Fluid Dynamics – вычислительная гидрогазодинамика), подразделе механики сплошных сред, включающем совокупность физических, математических и численных методов, предназначенных для вычисления характеристик потоковых процессов, существует множество моделей турбулентности, различающихся по сложности и точности [14–20]. В статье сравниваются модели, возможные для выбора в вычислительном модуле гидрогазодинамики ANSYS CFX программного комплекса ANSYS [21], при помощи которого изучают потоки жидкостей и газов. Ряд авторов выполняли подобные сравнения для других задач аэродинамики [22–25], тем самым формулируя рекомендации по применимости моделей турбулентности для различных случаев численного моделирования.

Для исследования влияния модели турбулентности на распределение воздушных потоков при проведении компьютерного моделирования аэродинамического процесса в трубе были выбраны следующие модели:

- k-Epsilon (k-ε);
- Shear Stress Transport (SST);
- Baseline Reynolds Stress (BSL RS).

Одной из наиболее распространенных и широко используемых для численного моделирования турбулентных потоков является k-Epsilon (k-ε) модель. Она основана на решении двух уравнений: энергии турбулентности (k), представляющей собой среднюю кинетическую энергию турбулентных вихрей на единицу массы потока, и скорости её диссипации (ε), характеризующей скорость, с которой энергия турбулентности преобразуется в теплоту из-за вязкости. Модель достаточно проста в реализации и не требует больших вычислительных ресурсов, а также, учитывая, что она используется в течение многих лет, она имеет обширную базу данных для проверки и валидации. При этом эта модель широко используется для свободных течений, но плохо описывает пристеночные, осо-

бенно в условиях с сильными градиентами скоростей. В некоторых случаях может не учитывать сложные физические явления, такие как ротационные потоки или сильные завихрения.

Другая широко используемая модель турбулентности в области аэродинамики и гидродинамики – это модель Shear Stress Transport (SST). Она сочетает в себе преимущества двух моделей k-ε и k-ω [14]. Для нивелирования недостатка выше рассмотренной модели в областях, близких к стенкам, здесь для более точного описания поведения пристеночных потоков используется модель k-ω. Модель SST разработана для более точного учета сдвиговых напряжений, поэтому она особенно полезна при описании потоков с сильными градиентами скорости и в условиях, когда важна точность вблизи стенок, а также хорошо работает в условиях сложных геометрий и потоков с сильными завихрениями, оставаясь достаточно эффективной в вычислительном плане. В то же время данная модель может быть чувствительна к условиям расчетной сетки и задаваемым параметрам и требовать более тонкой настройки.

Третью модель турбулентности для сравнения выберем BSL RS (Baseline Reynolds Stress), которая является расширением модели RSM (Reynolds Stress Model) и используется для более точного описания турбулентных потоков в сравнении с традиционными моделями, такими как k-ε или k-ω. Она учитывает все компоненты напряжений Рейнольдса, что делает ее более сложной, чем модели с двумя уравнениями, но одновременно с этим она лучше справляется со сложными характеристиками турбулентности, такими как нестационарные и анизотропные потоки и более точно описывает поведение потоков вблизи стенок, в углах и других сложных геометриях. Эта модель подходит для высокоточных аэродинамических расчетов, но требует больше вычислительных ресурсов и времени.

Цифровой двойник создается для аэродинамической установки, относящейся к категории дозвуковых (создаваемая скорость ветрового потока до 12 м/с), вертикальных, малогабаритных труб (высотой около трёх метров и шириной менее пяти метров) с открытой рабочей областью – чуть более одного метра (рис. 1, 2).

Цифровой двойник полностью повторяет все геометрические размеры и особенности реальной установки, такие как непараллельность входного и выходного сечений трубы (рис. 3). Для проведения компьютерных экспериментов также замоделирован подмакетник, расположенный в зоне рабочей области.

При проведении компьютерного эксперимента задались следующие граничные условия:

1. Размеры расчетной области ограничены реальными размерами помещения (пол и потолок), где расположена установка, и небольшими



Рис. 1. Прототип цифрового двойника – аэродинамическая труба (ННГАСУ, кафедра отопления и вентиляции)

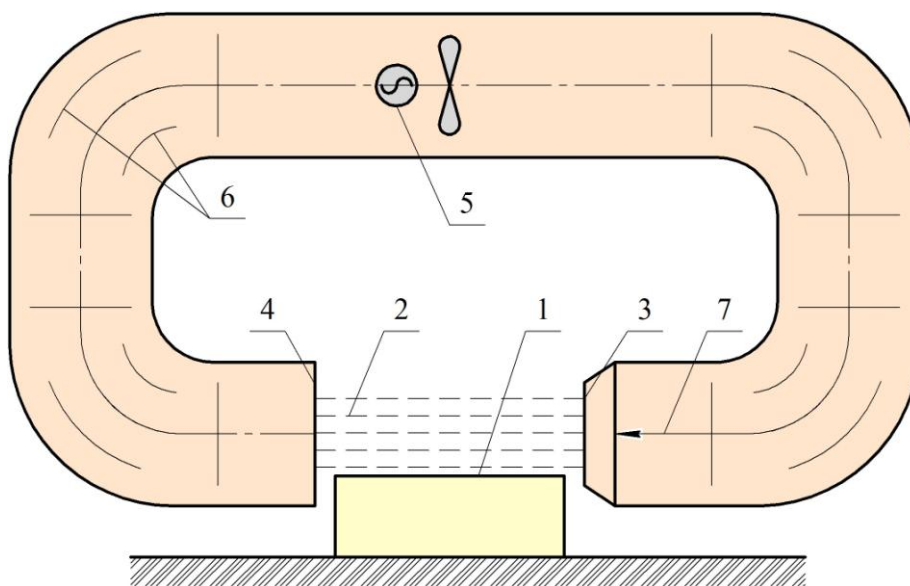


Рис. 2. Схема аэродинамической трубы: 1 – подмакетник; 2 – рабочая область; 3 – выходное сечение; 4 – входное сечение; 5 – аэродинамическая труба с осевым вентилятором; 6 – направляющие ребра; 7 – направление ветрового потока

припусками по ширине (до 500 мм) для возможности отслеживания смешения воздушных масс рабочей области и окружающего пространства.

2. Расчетная сетка конечных элементов сгущается к наиболее тонким частям установки: выпуски трубы и поверхность подмакетника (рис. 4).

3. Расчетная область обладает свойствами несжимаемой газовой среды, так как скорости движения воздушных потоков малы.

4. Все твердые поверхности имеют условие, не допускающее проникание сквозь них воздушных потоков.

5. Вход воздушных масс осуществляется сверху через сечение трубы (в месте расположения вентилятора в реальной аэродинамической установке). Значение начальной скорости задается с условием её достижения 12 м/с в выходном сопле у границы подмакетника.

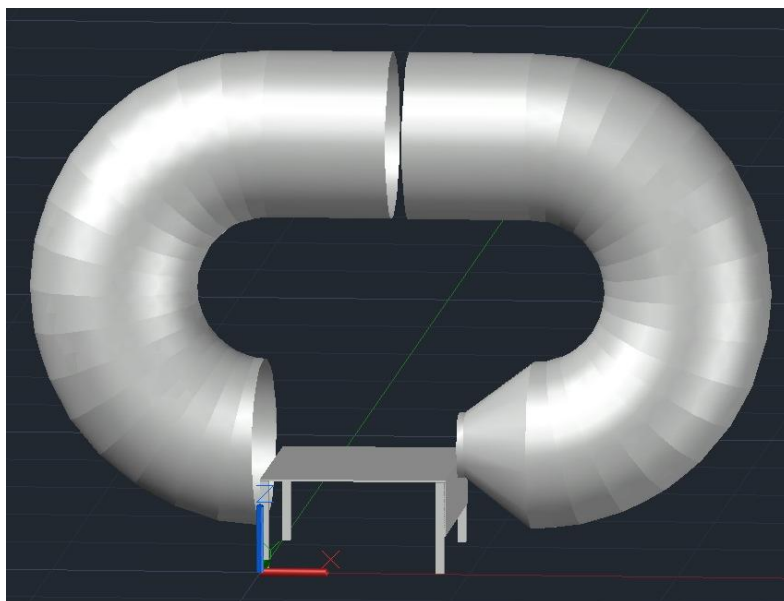


Рис. 3. Цифровой двойник аэродинамической трубы

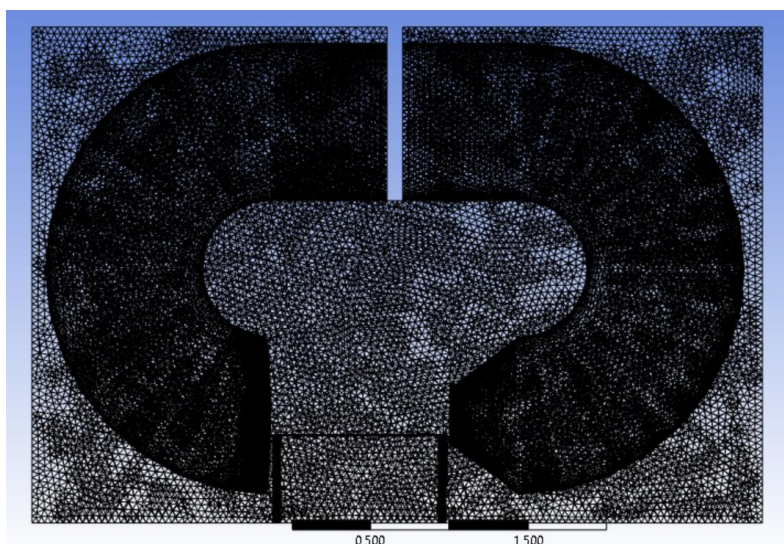


Рис. 4. Построенная расчетная сетка

6. Выход воздушных потоков осуществляется непосредственно через соответствующее сечение трубы, а также через вертикальные границы расчетной области.

Результаты исследования

При проведении компьютерного эксперимента задавалось условие либо достижения уровня сходимости невязок 10^{-4} , либо в отсутствие достижения предыдущего условия проведение ста итераций расчета (рис. 5).

Наиболее плавное решение уравнения Навье – Стокса наблюдается у модели турбулентности SST (рис. 5а), при этом необходимый уровень сходи-

мости был достигнут менее чем за 50 итераций. Чуть менее плавное решение и достижение необходимого значения сходимости за 83 итерации у модели k-Epsilon (рис. 5б). У третьего варианта (BSL RS) за заданное ограниченное количество итерации необходимый уровень сходимости хоть и был близок, но так и не был достигнут. В целом по решениям можно судить о хорошем качестве построенной расчетной сетки.

Существенным фактором при сопоставлении вариантов применяемых турбулентностей служит период времени, требуемый для выполнения расчетов, как показатель вычислительной эффективности (табл. 1).

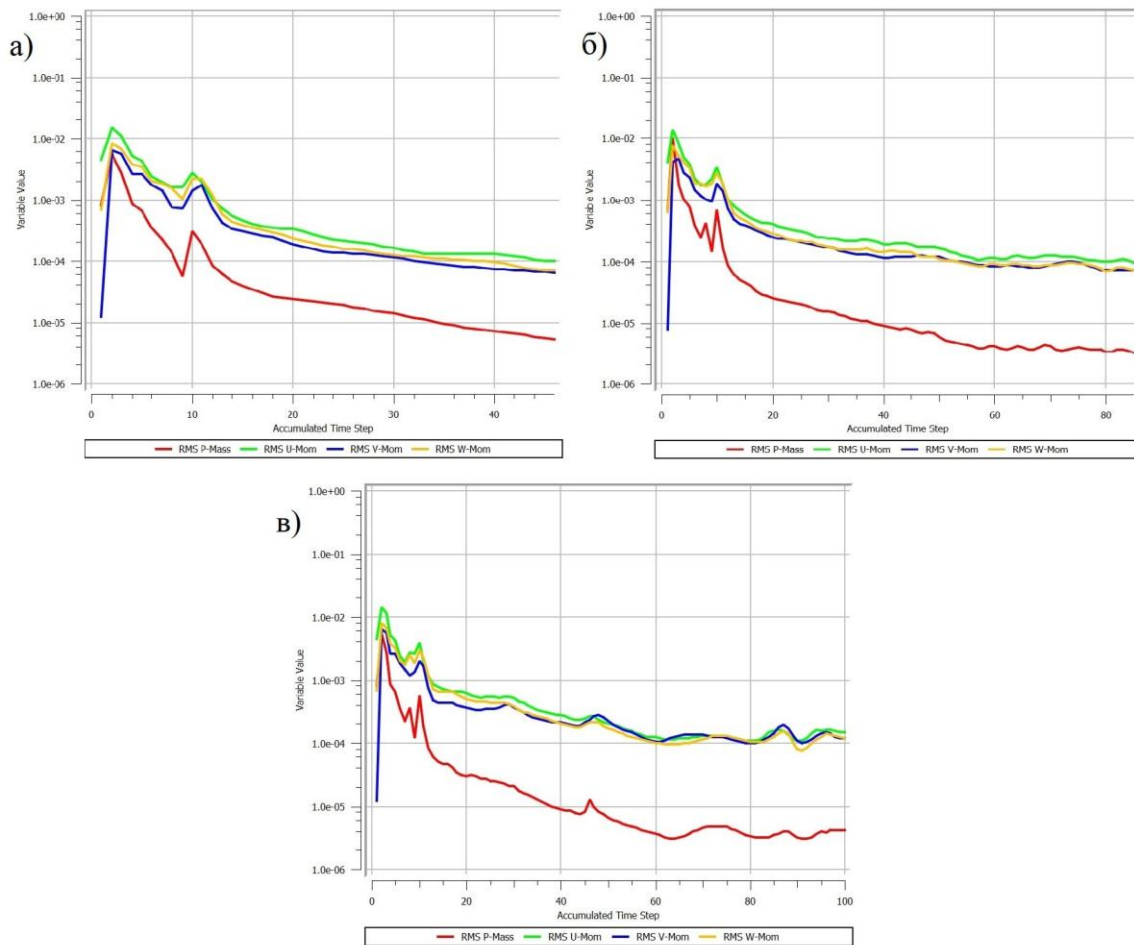


Рис. 5. Графики сходимости при разных моделях турбулентности: а – SST, б – k-Epsilon, в – BSL RS

Таблица 1
Время расчета в программе при разных моделях турбулентности

Модель турбулентности	Время расчета
Shear Stress Transport (SST)	35 мин
k-Epsilon (k-ε)	1 ч 13 мин
Baseline Reynolds Stress (BSL RS)	4 ч 56 мин

Наиболее быстрый расчет был проведен в компьютерном эксперименте с моделью турбулентности SST.

В то же время стоит отметить, что сходимость решения не является решающим фактором при выборе модели турбулентности и не гарантирует проведение корректного расчёта, наиболее отражающего физический эксперимент. Для создания цифровой модели аэродинамической трубы ключевыми показателями будут распространения векторов скоростей воздушных потоков, а также значение их модулей.

Для визуального сравнения направлений воздушных потоков на рис. 6 представлены результаты трёх проведенных экспериментов,

а для более точного сопоставления значений данные из трех зон рабочей области (выходное сечение, центр подмакетника, входное сечение) сведены в табл. 2.

За исключением нескольких точек, где разница в показателях модулей скоростей различных моделей турбулентности достигает 10–12 %, остальные показатели отличаются незначительно. Отличия в максимальных скоростях практически отсутствуют и составляют менее 2 %. И визуально, и по аналитическим результатам, приведенным в табл. 2, воздушные потоки, генерируемые цифровыми двойниками аэродинамической трубы, распространяются практически одинаково.

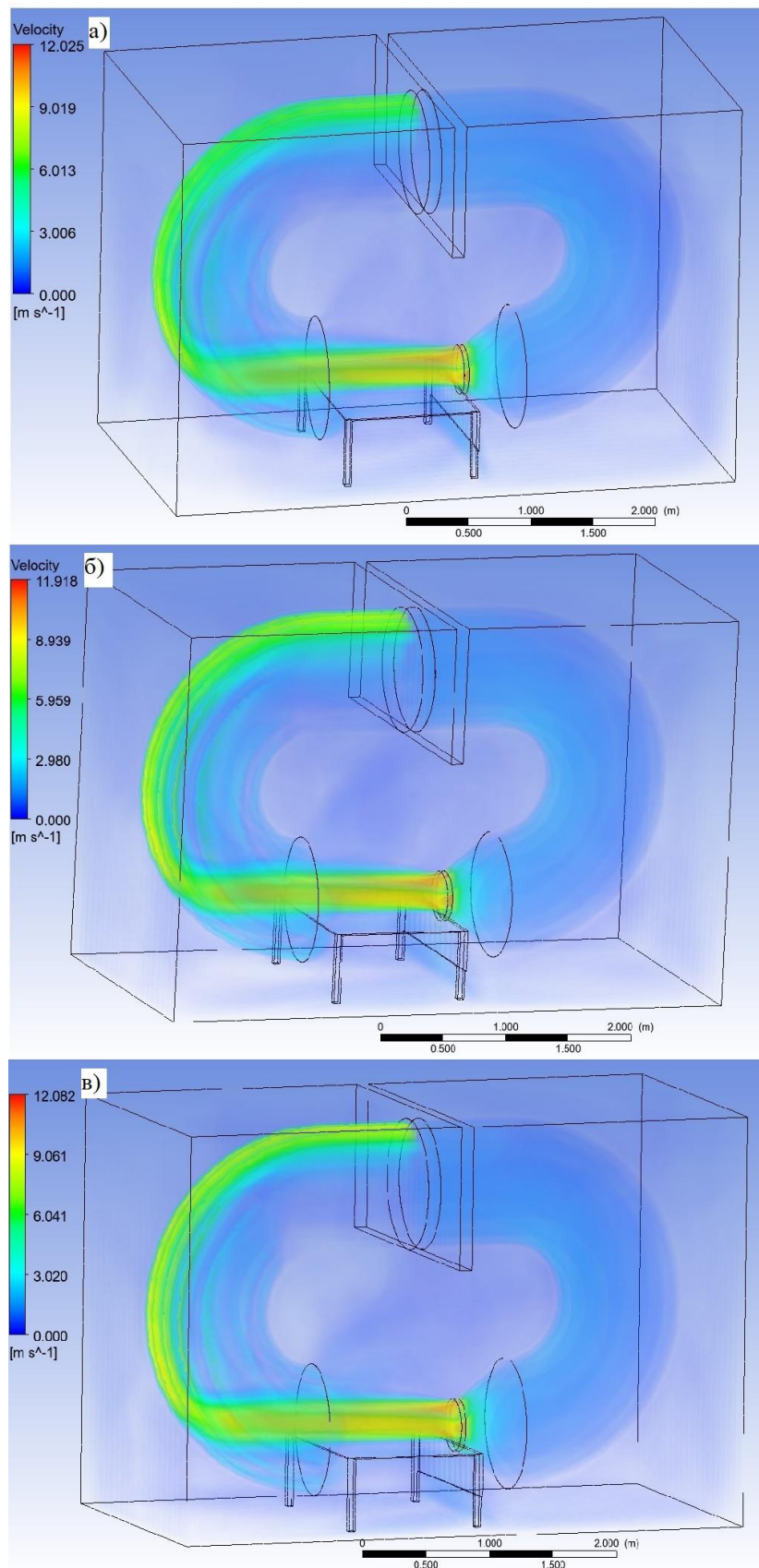


Рис. 6. Результаты аэродинамического расчета при разных моделях турбулентности:
а – SST, б – k-Epsilon, в – BSL RS

Таблица 2

Сравнение значений модулей скоростей при разных моделях турбулентности

Высота точки от уровня пола, м	Модель турбулентности			Максимальная разница, %
	SST	k-ε	BSL RS	
	Значения скоростей на выходном сечении, м/с			
0,56	5,06	4,86	4,95	3,97
0,60	9,97	9,69	9,62	3,46
0,65	10,09	10,18	10,16	0,87
0,70	9,64	9,70	9,68	0,62
0,75	9,59	9,64	9,63	0,48
0,80	9,70	9,73	9,76	0,60
0,85	9,49	9,64	9,76	1,25
	Значения скоростей в середине рабочей области, м/с			
0,56	6,21	5,58	5,71	10,14
0,60	7,99	7,52	7,56	5,87
0,65	9,67	9,61	9,61	0,59
0,70	10,07	10,13	11,12	9,43
0,75	10,08	10,14	10,14	0,62
0,80	9,92	9,96	9,99	0,79
0,85	8,77	8,91	8,95	2,04
0,90	5,7	6,30	5,71	9,57
	Значения скоростей на входном сечении, м/с			
0,56	6,77	6,04	5,97	11,81
0,60	8,21	7,81	7,86	4,90
0,65	9,51	9,47	9,44	0,67
0,70	10,0	10,10	10,07	0,90
0,75	10,05	10,16	10,16	1,04
0,80	9,79	9,91	10,01	2,12
0,85	8,58	8,74	9,04	5,15
0,90	6,30	6,45	6,54	3,64
	Значения максимальных скоростей, м/с			
	12,025	11,918	12,082	1,36

Выводы

Выбор между различными моделями турбулентностей должен основываться на компромиссе между точностью, сложностью реализации и временем, необходимым для получения результатов.

Компьютерное моделирование показало, что разные модели турбулентностей дают практически идентичные результаты по характеристикам создаваемых в рабочей области воздушных потоков. Однако модель Shear Stress Transport (SST) обладает существенным преимуществом: для её расчета потребовалось значительно меньше времени

(как минимум вдвое), и значит, она требует меньше вычислительных ресурсов. При этом модель SST обеспечивает быструю и высокую точность расчётов, показав в эксперименте самую быструю сходимость невязок. Другими словами, эта модель позволяет получить те же результаты, что и более сложные, например, но при этом значительно экономит время и ресурсы компьютера.

В конечном итоге для проведения дальнейших расчетов можно остановиться на модели турбулентности SST, показавшей лучшую производительность и пренебрежительно малые отличия в результатах расчётов с другими моделями.

Список литературы

1. Поддаева О.И., Федосова А.Н., Саврасов С.А., Каграманян А.Т. Экспериментальное исследование ветрового воздействия на строительные конструкции в аэродинамической трубе с малой рабочей частью // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 5. С. 140–143.
2. Сатанов А.А., Симонов А.В., Хазов П.А. Определение аэродинамических характеристик большепролетного здания экспериментальными методами // Строительная механика и конструкции. 2023. № 1(36). С. 63–74.
3. Хазов П.А., Мольков А.С., Молева А.А. Экспериментальная и численная аэродинамика купольной конструкции в форме шестигранной пирамиды // Приволжский научный журнал. 2023. № 4. С. 153–160.

4. Газаров А.Р. Применение программного обеспечения Ansys для выявления аэродинамических характеристик зданий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 11. С. 344–347.
5. Белостоцкий А.М., Дубинский С.И., Афанасьева И.Н. Численное моделирование задач строительной аэродинамики. Разработка методик расчета ветровых воздействий и исследование реальных объектов // Вестник МГСУ. 2010. № 4-5. С. 182–185.
6. Ветрянщиков И.А. К вопросу о компьютерном моделировании и анализе аэродинамики группы зданий городского района. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 12. С. 253–255.
7. Singh J., Roy A.K. CFD simulation of the wind field around pyramidal roofed single-story buildings // SN Applied Sciences. 2019. No. 1, 1425. [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1476-2> (accessed 08 July 2025).
8. Февральских А.В. Цифровая поддержка проектирования аэрогидродинамической компоновки скоростного амфибийного судна // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2025. Т. 22, № 1 (247). С. 35–41. DOI: 10.14489/vkit.2025.01.pp.035-041. EDN: LLPGGC
9. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 16 с.
10. Ведяйкина О.И., Хазов П.А., Шилов С.С. Алгоритм цифровой поддержки работоспособности малогабаритных аэродинамических экспериментальных установок // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2025. Т. 25, № 2. С. 62–71. DOI: 10.14529/build250208. EDN: RZJJND
11. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Том 1. М.: Наука, 1973. 536 с.
12. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Том 2. М.: Наука, 1973. 584 с.
13. Хазов П.А., Ведяйкина О.И. Компьютерное моделирование аэродинамического обтекания и оценка пешеходной аэродинамической комфортности комплекса зданий // Омский научный вестник. 2024. № 3 (191). С. 56–63. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-56-63
14. Молчанов А.М. Термодинамика и динамика жидкости и газа. Специальные главы. М., 2019. 152 с.
15. Козелков А.С., Курулин В.В., Пучкова О.Л., Лашкин С.В. Моделирование турбулентных течений с использованием алгебраической модели реинольдсовых напряжений с универсальными пристеночными функциями // Вычислительная механика сплошных сред. 2014. Т. 7, № 1. С. 40–51.
16. Афанасьева И.Н. Адаптивная методика численного моделирования трехмерных динамических задач строительной аэрогидроупругости: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2014. 200 с.
17. Menter F.R., Garbaruk A.V., Egorov Y. Explicit algebraic reynolds stress models for anisotropic wall-bounded flows // Progress in Flight Physics. 2012. Vol. 3, pp. 89–104.
18. Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD. 3rd ed. DCW Industries, Inc. 2006. 522 p.
19. Filonovich M.S., Leal J.B., Rojas-Solórzano L.R. Prediction of compound channel secondary flows using anisotropic turbulence models // River Flow. 1st Edition. CRC Press. 2014. 8 p. [Electronic resource]. Available at: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/b17133-25/prediction-compound-channel-secondary-flows-using-anisotropic-turbulence-models-filonovich-leal-rojas-sol%3%B3rzano> (accessed 16 March 2025).
20. Saïdi I. Ben Hassan, Schmelzer M., Cinnella P., Grasso F. CFD-driven symbolic identification of algebraic Reynolds-stress models // Journal of Computational Physics. 2022. Vol. 457. [Electronic resource]. (in Russ.) Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021999122000997> (accessed 16 March 2025).
21. Turbulence Models in ANSYS® Fluent CFD, 2015. США, Университет Иллинойса: база данных. Данные в формате PDF. [Электронный ресурс]. URL: <https://davis68.github.io/me498cf-fa16/resources/flec06/handout-turbulence.pdf> (дата обращения 16.03.2025).
22. Самохвалов Н.Ю., Хайрулин В.Т., Тихонов А.С. Верификация расчетных трехмерных моделей образования вторичных вихревых течений в межлопаточных каналах турбин газотурбинных двигателей по данным испытаний тестового профиля Т106 // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2017. № 49. С. 41–53.
23. Еременко В.В., Михайлов А.Е., Михайлова А.Б., Горюхин М.О., Красноперов Д.Г. Сравнительный анализ влияния моделей турбулентности при численном моделировании экспериментальной ступени центробежного компрессора // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 4. С. 99–111. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-4-99-111
24. Елисов Н.А., Ишков С.А., Шахов В.Г. Влияние моделей турбулентности на расчётные значения несущих свойств летательного аппарата // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16, № 3. С. 39–46. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-3-39-46
25. Голубков В.Д., Гарбарук А.В. Численное моделирование турбулентного течения во вращающемся канале прямоугольного сечения с поворотом на 90° // Теплофизика высоких температур. 2023. Т. 61, № 1. С. 75–82. DOI: 10.31857/S0040364423010167

References

1. Poddaeva O.I., Fedosova A.N., Savrasov S.A., Kagramanyan A.T. [Experimental study of wind effects on building structures in an aerodynamic tunnel with a small working section]. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzhya* [Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region], 2018, no. 5, pp. 140–143. (in Russ.)
2. Satanov A.A., Simonov A.V., Khazov P.A. [Determination of aerodynamic characteristics of long-span buildings by experimental methods]. *Stroitel'naya mekhanika i konstruksii* [Structural Mechanics and Structures], 2023, no. 1(36), pp. 63–74. (in Russ.)
3. Khazov P.A., Molkov A.S., Mołewa A.A. [Experimental and numerical aerodynamics of a dome structure in the form of a hexagonal pyramid]. *Privolzhsky nauchnyi zhurnal* [Privolzhye Scientific Journal], 2023, no. 4, pp. 153–160. (in Russ.)
4. Gazarov A.R. [The use of Ansys software to identify the aerodynamic characteristics of buildings]. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskie Nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences], 2020, no. 11, pp. 344–347. (in Russ.)
5. Belostotsky A.M., Dubinsky S.I., Afanasieva I.N. [Numerical simulation of problems in structural aerodynamics. Development of calculation techniques for wind loads and investigation of real objects]. *Vestnik MGSU* [Bulletin of the MGSU], 2010, no. 4–5, pp. 182–185. (in Russ.)
6. Vetryanshikov I.A. [On the issue of computer modeling and analysis of urban district group buildings aerodynamics]. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskie Nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences], 2021, no. 12, pp. 253–255. (in Russ.)
7. Singh J., Roy A.K. CFD simulation of the wind field around pyramidal roofed single-story buildings. *SN Applied Sciences*, 2019, no. 1, 1425. [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1476-2> (accessed 08 July 2025).
8. Fevral'skikh A.V. [Digital support for designing the aerohydrodynamic configuration of a high-speed amphibious vessel]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Bulletin of Computer and Information Technologies], 2025, vol. 22, no. 1 (247), pp. 35–41. (in Russ.). DOI 10.14489/vkit.2025.01.pp.035-041. EDN: LLPGGC
9. GOST R 57700.37–2021. Komp'yuternye modeli i modelirovanie. Tsifrovye dvoyniki izdeliy. Obshchie polozheniya [GOST R 57700.37–2021. Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions]. Moscow: Rossiyskiy institut standartizatsii Publ.; 2021. 16 p. (in Russ.)
10. Vedaykina O.I., Khazov P.A., Shilov S.S. [Algorithm for digital support of operability of compact aerodynamic experimental installations]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*, 2025, vol. 25, no. 2, pp. 62–71. (in Russ.). DOI: 10.14529/build250208. EDN: RZJJND
11. Sedov L.I. *Mekhanika sploshnoy sredy. Tom 1* [Mechanics of continuous media. Volume 1]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 536 p. (in Russ.)
12. Sedov L.I. *Mekhanika sploshnoy sredy. Tom 2* [Mechanics of continuous media. Volume 2]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 584 p. (in Russ.)
13. Khazov P.A., Vedaykina O.I. [Computer simulation of aerodynamic flow around and assessment of pedestrian aerodynamic comfort of a building complex]. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2024, no. 3 (191), pp. 56–63. (in Russ.). DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-56-63
14. Molchanov A.M. *Termodinamika i dinamika zhidkosti i gaza. Spetsial'nye glavy* [Thermodynamics and dynamics of fluid and gas. Special chapters]. Moscow, 2019. 152 p. (in Russ.)
15. Kozelkov A.S., Kurulin V.V., Puchkova O.L., Lashkin S.V. [Simulation of turbulent flows using algebraic Reynolds stress model with universal wall functions]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred* [Computational Continuum Mechanics], 2014, vol. 7, no. 1, pp. 40–51. (in Russ.)
16. Afanas'eva I.N. *Adaptivnaya metodika chislennogo modelirovaniya trehmernykh dinamicheskikh zadach stroitel'noy ajerogidrouprugosti: diss. ... kand. tekhn. nauk.* [Adaptive methodology for numerical modeling of three-dimensional dynamic problems of structural aerohydroelasticity. Cand. sci. diss.]. Moscow; 2014. 200 p. (in Russ.)
17. Menter F.R., Garbaruk A.V., Egorov Y. Explicit algebraic reynolds stress models for anisotropic wall-bounded flows. *Progress in Flight Physics*, 2012, vol. 3, pp. 89–104.
18. Wilcox D.C. *Turbulence Modeling for CFD*. 3rd ed. DCW Industries, Inc., 2006. 522 p.
19. Filonovich M.S., Leal J.B., Rojas-Solórzano L.R. Prediction of compound channel secondary flows using anisotropic turbulence models // *River Flow*. 1st Edition. CRC Press. 2014. 8 p. [Electronic resource]. Available at: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/b17133-25/prediction-compound-channel-secondary-flows-using-anisotropic-turbulence-models-filonovich-leal-rojas-sol%C3%B3rzano> (accessed 16 March 2025).
20. Saïdi I. Ben Hassan, Schmelzer M., Cinnella P., Grasso F. CFD-driven symbolic identification of algebraic Reynolds-stress models. *Journal of Computational Physics*, 2022, vol. 457. [Electronic resource]. (in Russ.) Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021999122000997> (accessed 16 March 2025).

21. Turbulence Models in ANSYS® Fluent CFD, 2015. USA, University of Illinois: database. PDF data. [Electronic resource]. Available at: <https://davis68.github.io/me498cf-fa16/resources/flec06/handout-turbulence.pdf> (accessed 16 March 2025).

22. Samokhvalov N.Yu., Khairulin V.T., Tikhonov A.S. [Verification of computational three-dimensional models of secondary vortex flows formation in turbine blade channels of gas turbine engines based on test profile T106 experimental data]. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika* [PNRPU Aerospace Engineering Bulletin], 2017, no. 49, pp. 41–53. (in Russ.)

23. Eremenko V.V., Mikhaylov A.E., Mikhaylova A.B., Goryukhin M.O., Krasnoperov D.G. [Comparative analysis of the influence of turbulence models in numerical simulation of an experimental centrifugal compressor stage]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie* [Samara University Bulletin. Aerospace Technology, Technologies and Mechanical Engineering], 2023, vol. 22, no. 4, pp. 99–111. (in Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-4-99-111

24. Elisov N.A., Ishkov S.A., Shakhov V.G. [Influence of turbulence models on calculated lift properties of aircraft]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie* [Samara University Bulletin. Aerospace Technology, Technologies and Mechanical Engineering], 2017, vol. 16, no. 3, pp. 39–46. (in Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-3-39-46

25. Golubkov V.D., Garbaruk A.V. [Numerical simulation of turbulent flow in a rotating rectangular channel with a 90° turn]. *Teplofizika vysokikh temperatur* [High Temperature Physics], 2023, vol. 61, no. 1, pp. 75–82. (in Russ.). DOI: 10.31857/S0040364423010167

Информация об авторе:

Ведяйкина Ольга Ивановна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей физики и теоретической механики, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (ННГАСУ), Нижний Новгород, Россия; razvnauki@rambler.ru

Information about the author:

Olga I. Vediaikina, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Chair of General Physics and Theoretical Mechanics, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia, razvnauki@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 23.09.2025, принята к публикации 06.10.2025.

The article was submitted 23.09.2025, approved after reviewing 06.10.2025.