

Цифровые двойники в задачах валидации экспериментальных исследований и установок

О. И. Ведяйкина, П. А. Хазов

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Статья посвящена изучению проблемы повышения эффективности физических исследований путем создания цифрового двойника сложной технической установки. Актуальность темы обусловлена необходимостью валидации экспериментальных исследований, вследствие часто сложности визуализации и верификации их результатов. Предложен алгоритм создания цифрового двойника экспериментальной установки на примере малогабаритной дозвуковой аэродинамической трубы, который в дальнейшем может быть использован для проведения виртуальных испытаний, с целью повышения восприятия физики процесса, а также создания методики учета погрешностей реального эксперимента и интеграции цифровых технологий в жизненный цикл установок.

Ключевые слова: цифровой двойник, компьютерное моделирование, геометрическая оптимизация, валидация исследования, валидация экспериментальной установки

Digital twins in the validation of experimental studies and installations

O. I. Vediaikina, P. A. Khazov

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article studies the problem of increasing the efficiency of physical research by creating a digital twin of a complex technical installation. The relevance of this topic is due to the need to validate experimental research, which is often difficult to visualize and verify. The article proposes an algorithm for creating a digital twin of an experimental installation, using the example of a small-sized subsonic wind tunnel, which can be used for conducting virtual tests to improve the understanding of the physics of the process, as well as for creating a methodology for accounting for the errors of real experiments and integrating digital technologies into the life cycle of installations.

Keywords: digital twin, computer modeling, geometric optimization, research validation, experimental setup validation.

Введение

На сегодняшний день одной из наиболее актуальных задач в области инженерии и технологий является разработка эффективных методов, обеспечивающих цифровую поддержку для разнообразных технических объектов, систем, в том числе процессов исследования, практически во всех областях технических наук и промышленности [1–3]. Особое внимание стоит уделить сложным, уникальным и высокотехнологичным экспериментальным установкам, где реализация физических экспериментов часто сталкивается с трудностями, связанными с визуализацией получаемых результатов [4].

Уровень возможностей, которого в настоящее время достигло компьютерное моделирование, позволяет создавать надежные методики и алгоритмы цифровой поддержки экспериментальных исследований и установок, применимых в дальнейшем в инженерной практике [5–8].

Одним из направлений в разработке таких алгоритмов является применение концепций цифровых двойников и цифровых (виртуальных) испытаний [9–11]. Цифровой двойник (ЦД) представляет собой виртуальную копию реального объекта, которая отражает полностью как его геометрию, так и все физические данные, сопровождающие процессы, происходящие в установке. Использование ЦД значительно упрощает отслеживание измеряемых и изучаемых параметров, визуализацию сложных экспериментальных процессов и лежит в основе проведения цифровых испытаний, направленных на определение качественных и количественных характеристик свойств объекта, что, в свою очередь, позволит существенно повысить эффективность физических экспериментов. Предлагаемый алгоритм валидации экспериментальных установок представлен на рисунке 1.

Таким образом, развитие технологий ЦД и методов компьютерного моделирования не только улучшает качество испытаний, содействует поддержанию жизненного цикла экспериментальных установок, но и способствует более глубокому пониманию происходящих физических процессов, что открывает новые возможности для оптимизации процессов в различных отраслях науки.



Рисунок 1. Алгоритм цифровой поддержки в разработке методики валидации экспериментальной установки

Постановка задачи

Создание ЦД технических объектов может служить для валидации процессов, происходящих в них, с целью продления их жизненного цикла. Примером такой экспериментальной установки является дозвуковая малогабаритная аэродинамическая труба.

Проектирование современных зданий и сооружений, особенно тех, что обладают сложной, нестандартной геометрической формой, ставит перед инженерами сложную задачу: правильно оценить аэродинамическую нагрузку на их конструкции. Для получения максимально точных данных традиционно используются модельные эксперименты в крупногабаритных трубах. Результаты экспериментов, проведенных в таких установках, отличаются высокой достоверностью, подтвержденной многолетней практикой [12]. Однако это крайне сложные инженерные сооружения, требующие больших финансовых и трудозатрат. В качестве более экономичной альтернативы могут рассматриваться аэродинамические трубы малого диаметра, но их ограниченные размеры и мощности существенно влияют на качество получаемых результатов: возникают искажения картины обтекания моделей и, соответственно, погрешности в измерениях, что делает их применение в серьезных исследованиях практически невозможным [13, 14]. В контексте всего вышесказанного создание ЦД для такой установки является крайне актуальной задачей, так как цифровые испытания в ней позволят не только выявить недостатки и несовершенства в её работе, но и детально визуализировать их.

ЦД способствует проведению валидации (проверки на соответствие) результатов физических исследований, которые позволят значительно расширить возможности использования малогабаритных установок, сделав их результаты сравнимыми по точности с результатами крупногабаритных аналогов, что впоследствии увеличит их жизненный цикл.

Теория

Валидация экспериментальных исследований осуществляется для вертикальной малогабаритной дозвуковой аэродинамической трубы лаборатории кафедры отопления и вентиляции ННГАСУ с открытой рабочей областью (рис. 2, 3).



Рисунок 2. Аэродинамическая труба – прототип цифрового двойника

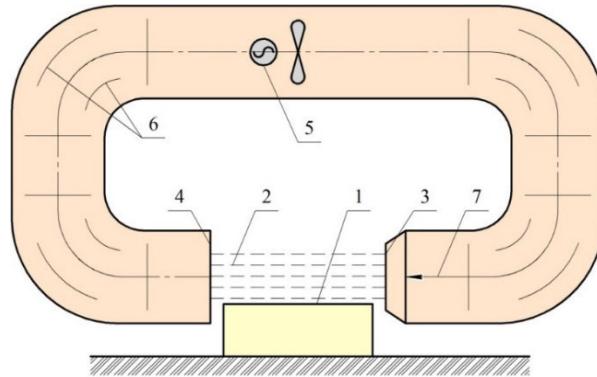


Рисунок 3. Схема аэродинамической трубы: 1 – подмакетник; 2 – рабочая область; 3 – выходное сечение; 4 – входное сечение; 5 – аэродинамическая труба с осевым вентилятором; 6 – направляющие ребра; 7 – направление ветрового потока

Для создания ЦД аэродинамической трубы в ней проводился эксперимент без установки макета в рабочей области с целью изучения картин распределения воздушных потоков. Измерения производились в плоскости выходного и входного сечений аэродинамической трубы, а также в различных точках рабочей области электронным термоанемометром Testo 405v1.

Виртуальные испытания проводились в программном комплексе ANSYS с использованием модуля вычислительной гидрогазодинамики ANSYS CFX с заданием следующих условий:

- размеры расчетной области ограничены реальными размерами помещения, где расположена установка, обладающая свойствами несжимаемой газовой среды;
- все твердые поверхности (труба, подмакетник, пол) имеют условие, обеспечивающее отсутствие проникания воздушных потоков сквозь них;
- вход воздушных потоков осуществляется через сечение выходной части трубы с заданной скоростью, достигающей 12 м/с в выходном сечении рабочей области;
- выход воздушных потоков происходит через сечение во входной части трубы, а также по области вокруг неё;
- расчетная сетка формируется адаптивной, то есть со сгущением к рабочей области и укрупнением на внешних границах;
- остальные параметры выбирались в процессе исследования (рис. 4); для достижения наиболее точного схождения результатов физического и виртуального экспериментов будут описаны ниже.

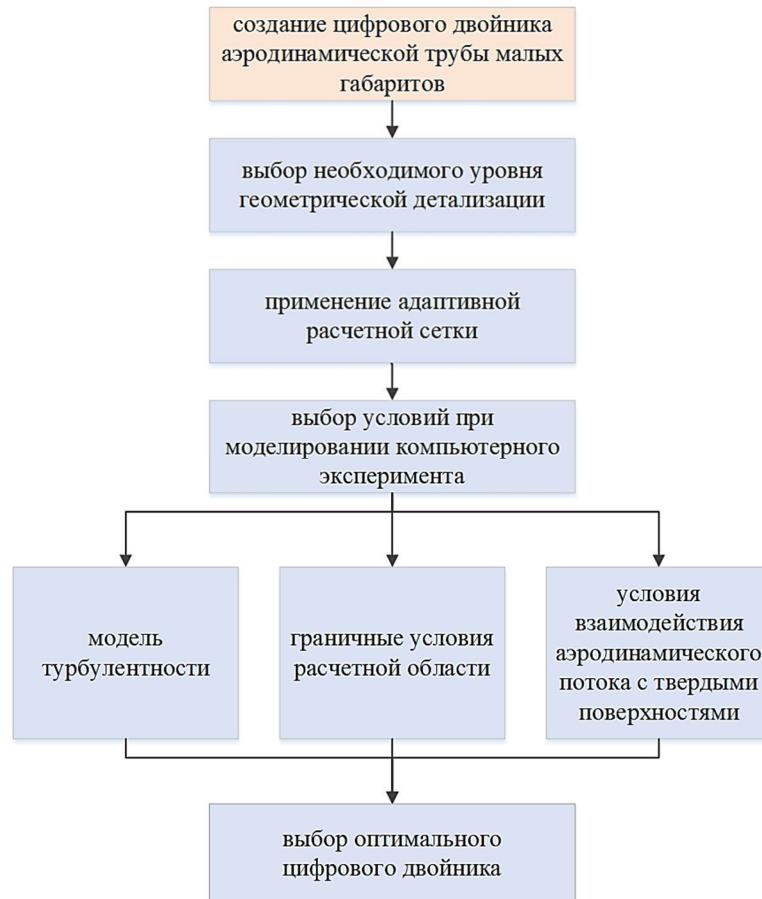


Рисунок 4. Алгоритм создания цифрового двойника на примере малогабаритной аэродинамической трубы

Результаты экспериментов

Первым этапом создания ЦД экспериментальной установки является создание её геометрической модели и установление необходимого уровня геометрической детализации [15]. Уровни отличаются степенью имитации – от коротких выпусков до полной модели (рис. 5), при этом в последнем варианте имеется разрыв в месте установки вентилятора для конструктивной возможности задания ветрового потока при выполнении компьютерного исследования.

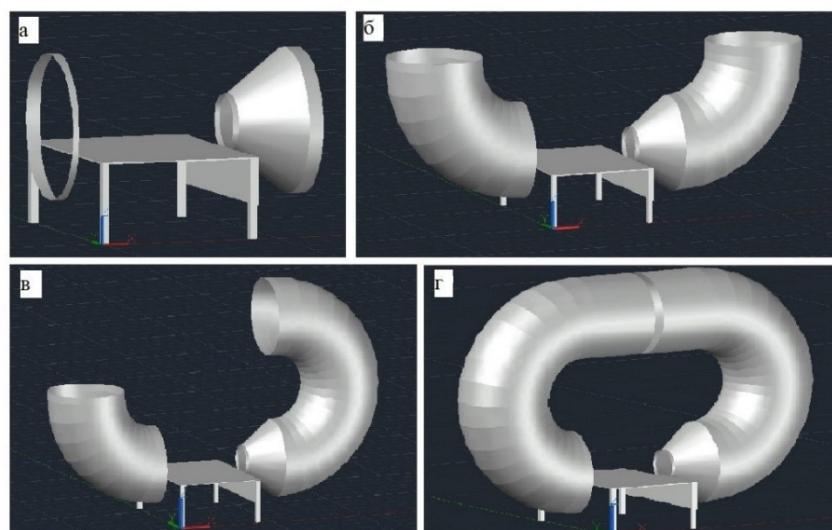


Рисунок 5. Уровни геометрической детализации моделей аэродинамической трубы: а) первый вид – короткие выпуски трубы; б) второй вид – длинные выпуски трубы; в) третий вид – часть трубы с выходным сечением, практически полностью повторяющим конструкцию установки; г) четвертый вид – целая труба

Предложенное альтернативное решение геометрических моделей продиктовано стремлением создать наиболее эффективный ЦД установки, способный достоверно воспроизводить её особенности и протекающие в ней процессы, одновременно минимизируя затраты цифровых ресурсов.

Визуальное распределение ветровых потоков над поверхностью подмакетника достаточно близкое: максимальные показатели модулей скоростей и завихрения возникают в одинаковых областях (рис. 6).

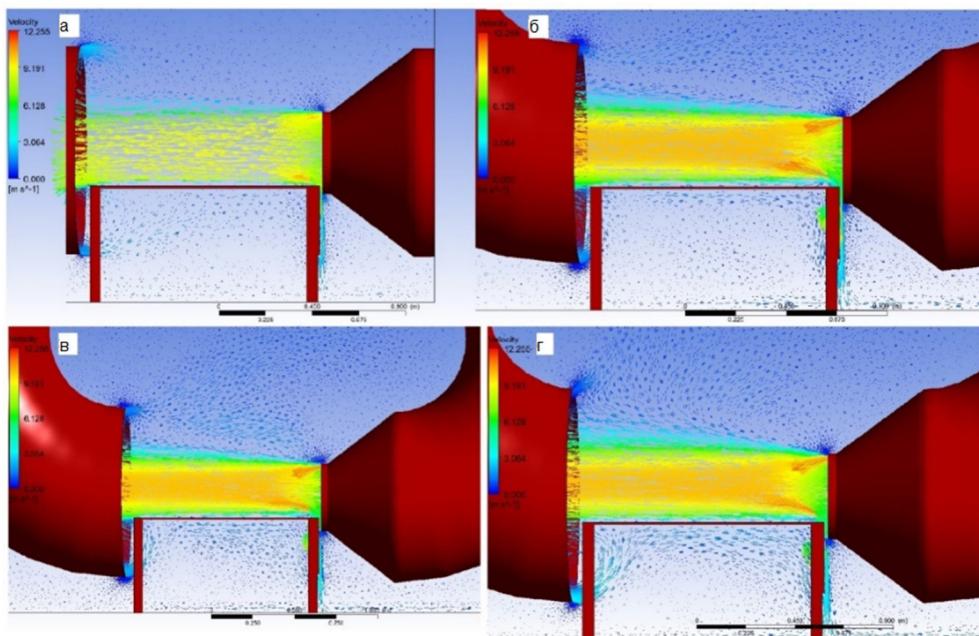


Рисунок 6. Распределение воздушных потоков в рабочей области ЦД аэродинамической трубы при различных уровнях геометрической детализации: *а*) первый вид – короткие выпуски трубы; *б*) второй вид – длинные выпуски трубы; *в*) третий вид – часть трубы с выходным сечением, практически полностью повторяющим конструкцию установки; *г*) четвертый вид – целая труба

Более детальный анализ картины распределения ветровых потоков выявил значительное влияние уровня геометрической детализации (табл. 1). Наиболее отличаются значения в первом виде геометрической модели, при этом расхождения в точечных значениях скоростей достигают почти 50 %. Недостаточная согласованность результатов не даёт возможности исключения из предложенных геометрий, так как даже самый упрощенный и отличающийся в показателях вариант убирать из исследования не представляется целесообразным ввиду важности учёта ресурсоёмкости расчетов каждого варианта.

Таблица 1. Сравнение значений модулей скоростей четырех видов геометрических моделей цифровых двойников

Высота точки от уровня пола, м	Первый вид	Второй вид	Третий вид	Четвертый вид	Максимальная разница, %
Значения скоростей на выходном сечении, м/с					
0,56	2,66	4,69	4,85	5,06	47,43
0,60	9,32	9,51	9,75	9,97	6,52
0,70	8,54	9,71	9,68	9,64	12,06
0,80	8,62	9,73	9,71	9,70	11,42
Значения скоростей в середине рабочей области, м/с					
0,56	7,92	5,06	5,52	6,21	36,14
0,60	8,56	7,43	7,67	7,99	13,24
0,70	9,09	10,14	10,11	10,07	10,39
0,80	9,03	10,01	10,0	9,92	9,85
Значения скоростей на входном сечении, м/с					
0,56	7,07	4,98	5,61	6,77	29,56
0,60	8,20	7,52	7,81	8,21	8,40
0,70	8,30	10,10	10,07	10,0	17,80
0,80	8,14	10,05	10,03	9,79	19,03
Значения максимальных скоростей, м/с					
	11,41	12,09	12,26	12,03	6,93

Следующим критически важным аспектом при создании ЦД является выбор оптимальной модели турбулентности как неотъемлемой части ветрового потока, оказывающего значительное влияние на распределение аэродинамических сил. В CFD-моделировании (Computational Fluid Dynamics – вычислительная гидрогазодинамика), подразделе механики сплошных сред, предназначенному для вычисления характеристик потоковых процессов, существует множество моделей турбулентности, различающихся по сложности и точности.

Для исследования влияния модели турбулентности были выбраны три самые распространенные модели, возможные для выбора в вычислительном модуле гидрогазодинамики ANSYS CFX:

- k-Epsilon ($k-\epsilon$), основанная на решении уравнений энергии турбулентности (k) и скорости её диссипации (ϵ), широко используется для свободных течений, но плохо описывает пристеночные;

- Shear Stress Transport (SST) сочетает в себе преимущества двух моделей: нивелирует недостатки выше рассмотренной модели в областях близких к стенкам, используя модель $k-\omega$;

- Baseline Reynolds Stress (BSL RS) используется для более точного описания турбулентных потоков в сравнении с предыдущими моделями, подходит для высокоточных аэродинамических расчетов, но требует больше вычислительных ресурсов и времени.

Компьютерное моделирование продемонстрировало, что различные модели турбулентности обеспечивают схожие результаты генерируемых воздушных потоков в рабочей области установки (табл. 2). Тем не менее модель SST имеет весомые преимущества: расчёт был осуществлен минимум в два раза быстрее, следовательно, требуется гораздо меньше вычислительной мощности. Кроме того, модель отличается высокой точностью вычислений и демонстрирует наилучшую сходимость погрешностей решений. Иными словами, данная модель позволяет достичь аналогичных результатов, как и более сложные, однако делает это намного эффективнее с точки зрения временных и аппаратных затрат.

Таблица 2. Сравнение значений модулей скоростей при разных моделях турбулентности

Высота точки от уровня пола, м	Модель турбулентности			Максимальная разница, %
	SST	$k-\epsilon$	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
0,70	9,64	9,70	9,68	0,62
0,80	9,70	9,73	9,76	0,60
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
0,70	10,07	10,13	11,12	9,43
0,80	9,92	9,96	9,99	0,79
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
0,70	10,0	10,10	10,07	0,90
0,80	9,79	9,91	10,01	2,12
Значения максимальных скоростей, м/с				
	12,025	11,918	12,082	1,36

Существенное влияние на движение воздушных потоков оказывает условие его взаимодействия с твердыми поверхностями (свойства поверхностей с условием Wall). В ПК ANSYS по умолчанию поверхности с условием Wall имеют свойство No Slip («нет скольжения»), подразумевающее, что скорость потока на границе совпадает со скоростью самой стенки, то есть равна нулю. При этом данным свойством можно пренебречь, если происходит моделирование движения воздушных масс при малых скоростях, поскольку вязкость потока в таком случае пренебрежительно мала, что отражено в свойстве Free Slip («свободное скольжение»), означающее скольжение потока вдоль границы без взаимодействия.

Результаты компьютерного моделирования распределения ветровых потоков наглядно показывают существенное влияние свойств поверхностей (рис. 7). В случае No Slip, предполагающего полное прилипание воздуха к поверхности, наблюдается практически полная остановка потока непосредственно у поверхности подмакетника. Заметно, что после этого начального «замедления» поток остается относительно равномерным по высоте до уровня выходного сечения, демонстрируя минимальное затухание вплоть до входного сечения трубы. Это контрастирует с Free Slip, характеризующимся отсутствием прилипания воздуха к поверхности, где поток демонстрирует существенное затухание с высотой. При этом наблюдается волновой характер течения, более адекватно отражающий реальную картину, так как столкновение потока с поверхностью подмакетника неизбежно приводит к возникновению возмущений и небольшим скачкам скорости. В данном случае скорость потока на поверхности подмакетника не стремится к нулю, поток постепенно затухает к верхней границе рабочей области и ослабевает ко входному сечению трубы.

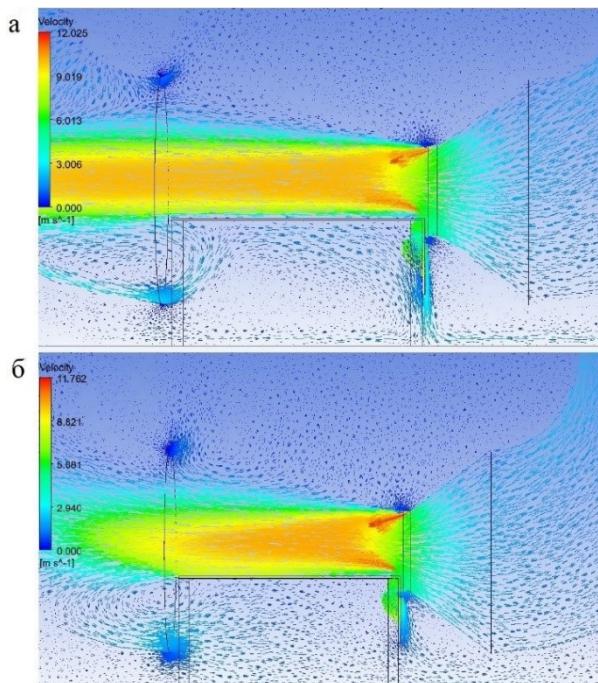


Рисунок 7. Распределение воздушных потоков в рабочей области ЦД аэродинамической трубы при разных свойствах поверхности: *а* – No Slip; *б* – Free Slip

Завершающим сравниваемым параметром являются условия на границах исследуемой расчетной области:

- Symmetry, используемое для моделирования симметричных потоков или симметричной геометрии, часто применяется при воспроизведении натурных аэродинамических экспериментов в строительстве;
- Outlet используется для моделирования свободного выхода потока из расчетной области, при этом давление «выхода» является задаваемым параметром;
- Opening используется также для моделирования свободного выхода потока, но позволяет учитывать также и возможность входа (например, в результате разницы давлений).

Результаты компьютерного эксперимента показали незначительные расхождения в картинах распределения воздушных потоков и возможность применимости всех видов условий в зависимости от решаемой задачи. В конкретной задаче поиска ЦД для дозвуковой малогабаритной аэродинамической трубы наиболее отражающим реальную ситуацию на границах расчетной области можно принять условие Outlet.

Обсуждение результатов

Визуальное распределение ветровых потоков в рабочей области экспериментальной установки (малогабаритная аэродинамическая труба) и её ЦД (четвертый вид геометрической детализации),

полученного в результате выполнения действий алгоритма (рис. 4), достаточно близки, что отражается в схожем градиенте изменения скоростей по вертикальному направлению в рабочей области, а также практически идентичному затуханию к входному сечению (рис. 8). Различия наблюдаются вблизи выходного сечения, что может быть получено вследствие сложности физического замера показаний, связанного с неравномерностью создаваемого ветрового потока в малогабаритной трубе, являющейся её функциональной особенностью. При этом вышеуказанное отличие несущественно, так как установка исследуемого в рамках проведения аэродинамического эксперимента макета на подмакетник осуществляется в центральной части рабочей области.

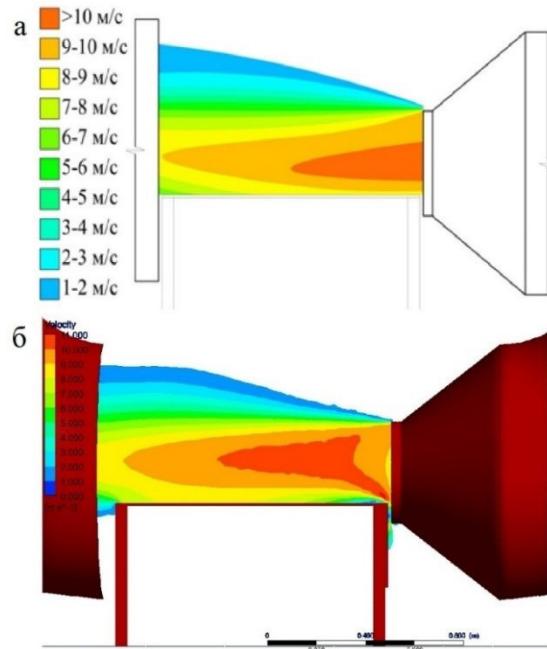


Рисунок 8. Распределение воздушных потоков в рабочей области реальной аэродинамической трубы (а) и её цифрового двойника (б)

Отличия в отдельных точках в реальном потоке и его компьютерном варианте остаются в пределах 15 % (табл. 3), при этом для оценки разницы в усредненных показателях сравниваются значения средних скоростей в каждом из трёх ключевых областей рабочей области и максимальные отличия в этом случае не превышают 5 % – что, безусловно, является показателем достаточно точным для цифрового двойника экспериментальной установки.

Таблица 3. Сравнение значений модулей скоростей реальной аэродинамической трубы и её ЦД

Высота точки от уровня подмакетника (пола), м	Скорости на выходном сечении, м/с			Скорости в середине рабочей области, м/с			Скорости на входном сечении, м/с		
	Реальная труба	ЦД	Разница, %	Реальная труба	ЦД	Разница, %	Реальная труба	ЦД	Разница, %
0,1 (0,57)	8,58	9,57	13,77	8,4	8,37	0,35	6,3	5,5	12,78
0,08 (0,64)	10,7	10,21	4,6						
0,10 (0,66)				10,0	9,88	1,19	8,61	8,46	1,71
0,16 (0,72)	10,5	9,65	8,1						
0,20 (0,76)				9,5	10,06	5,56	9,0	8,36	7,1
0,24 (0,80)	9,6	9,82	2,27						
0,30 (0,86)				7,0	7,33	4,5	6,9	6,32	8,42
0,32 (0,88)	9,0	7,76	13,78						
0,40 (0,96)				2,9	2,83	2,59	3,25	3,55	8,48

Окончание таблицы 3

Высота точки от уровня подмакетника (пола), м	Скорости на выходном сечении, м/с			Скорости в середине рабочей области, м/с			Скорости на входном сечении, м/с		
	Реальная труба	ЦД	Разница, %	Реальная труба	ЦД	Разница, %	Реальная труба	ЦД	Разница, %
0,50 (1,06)				0,8	0,83	3,15	1,3	1,35	3,7
0,60 (1,16)				0,5	0,5	0,8	0,91	0,97	6,31
Среднее значение скорости	9,676	9,4	2,83	5,585	5,68	1,73	4,602	4,41	4,18

Заключение

В ходе исследования был изучен вопрос создания ЦД экспериментальной установки на примере малогабаритной дозвуковой аэродинамической трубы. Этот процесс подразумевает создание точной компьютерной модели физической системы, способной имитировать поведение реальной установки во всех режимах эксплуатации.

Следующим этапом развития данного направления (рис. 1) будет являться использование полученного ЦД для проведения цифровых испытаний и исследований с целью выявления потенциальных ошибок и погрешностей реальных экспериментов, оценка степени их влияния на конечные результаты и разработка методики их учета и коррекции. Это, в свою очередь, даст возможность интегрировать цифровые технологии поддержки полного жизненного цикла сложных исследовательских установок, что обеспечит повышение точности проводимых экспериментальных исследований, сокращение их сроков и оптимизацию затрат на научные изыскания.

Список литературы

1. 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
2. Рутман Ю. Л., Мелешко В. А. Применение пакета ANSYS CFX для исследования аэродинамической неустойчивости сооружения // Вестник гражданских инженеров. 2011. № 1 (26). С. 58–61.
3. Singh J., Roy A. K. CFD simulation of the wind field around pyramidal roofed single-story buildings // SN Applied Sciences. 2019. Vol. 1, iss. 11. Art. 1425 (). DOI: 10.1007/s42452-019-1476-2
4. Ведяйкина О. И., Хазов П. А., Шилов С. С. Алгоритм цифровой поддержки работоспособности малогабаритных аэродинамических экспериментальных установок // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2025. Т. 25, № 2. С. 62–71. DOI: 10.14529/build250208; EDN: RZJJND
5. Идрисова Ю. В., Типеев А. Н., Перевертайло Д. А. Методика разработки цифровой модели мехатронной системы мотор-шпиндель для исследования его виброустойчивости // Materials. Technologies. Design. 2020. Т. 2, № 1(2). С. 59–68. EDN: OMWQMJ
6. Февральских А. В. Компьютерное моделирование аэродинамики пропеллера в российском пакете программ Flowvision // Русский инженер. 2024. № 4(85). С. 32–35. EDN: IPFHNT
7. Ветрянщиков И. А. К вопросу о компьютерном моделировании и анализе аэродинамики групп зданий городского района // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 12. С. 253–255.
8. Deineko A. V., Shamshurin A. I., Kazaryan N. A. Selection of the computational model of wind flow in the problems of computational architectural and civil engineering aerodynamics in accordance with regulatory and technical documents // International journal for computational civil and structural engineering. 2019. Vol. 15, iss. 1. Pp. 14–28.
9. Швачко Е. В., Васильев А. Н., Шишляев В. В. Цифровой двойник скважин – инструмент оптимизации процесса проектирования и строительства // Газовая промышленность. 2024. № 1 (860). С. 36–41. EDN: TWLHBD
10. Сапелкин Р. И., Матренинский С. И., Мищенко В. Я. Цифровой двойник процесса вулканизации материала защитного покрытия из каучукового бетона на поверхности трубного металла // Научный журнал строительства и архитектуры. 2025. № 1(77). С. 102–110. DOI: 10.36622/2541-7592.2025.77.1.010; EDN: JQJBDI

-
11. Кабалдин Ю. Г., Шатагин Д. А., Аносов М. С., Кузьмишина А. М. Цифровой двойник процесса стружкообразования // Вестник машиностроения. 2020. № 11. С. 81–86. DOI: 10.36652/0042-4633-2020-11-81-8; EDN: XKIABS
 12. 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.
 13. Экспериментальное исследование ветрового воздействия на строительные конструкции в аэродинамической трубе с малой рабочей частью / О. И. Поддаева, А. Н. Федосова, С. А. Саврасов, А. Т. Каграманян // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 5. С. 140–143.
 14. Экспериментальное исследование распределения аэродинамических коэффициентов на высотное здание / А. А. Сатанов, М. Л. Поздеев, А. В. Симонов, А. П. Помазов, П. А. Хазов // Приволжский научный журнал. 2022. № 3. С. 43–51.
 15. Ведяйкина О. И. Валидация экспериментальных методов исследований в малогабаритных аэродинамических трубах // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: тезисы докладов IX Международного симпозиума / ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства». Пенза: Изд-во ПГУ, 2025. С. 50–51.