

Научная статья

УДК 629.7

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=186665>

EDN: <https://www.elibrary.ru/FHMIQB>



Низкоскоростная аэродинамическая труба открытого типа с большим углом раствора диффузора для испытаний воздушных винтов

Елена Анатольевна Карпович¹, Сергей Юрьевич Занегин²

^{1, 2} Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Российская Федерация

¹ karpovichea@mai.ru Scopus Author ID: 57212414124; ORCID: 0000-0002-6657-0271;
Researcher WoS ID: AAE-2799-2022

² zaneginsy@mai.ru Scopus Author ID: 56202162500; ORCID: 0000-0001-9867-6639;
Researcher WoS ID: G-2018-2017

Аннотация. Активное развитие беспилотной авиации и интенсивные исследования в области аэротакси диктуют необходимость создания доступных и компактных стендов для динамических испытаний воздушных винтов. Для работы с ними создается проект небольшой аэродинамической трубы открытого типа с мотором мощностью 15 кВт, центробежным вентилятором с окружной скоростью до 960 об/мин и широкоугольным диффузором. Размеры трубы позволят проводить испытания воздушных винтов диаметром до 20 дюймов (0,508 м) при максимальной скорости потока в рабочей части 20 м/с (72 км/ч). При проектировании и расчете аэродинамической трубы использовались MATLAB и CADFlo. В процессе оптимизации геометрии трубы с учетом ограничений по объемному расходу и габаритам варьировалась длина прямого канала между выходом вентилятора и входом в диффузор. При максимально допустимом увеличении длины прямого канала на 43%, наряду с установкой четырех сеток с пористостью 0,61 и решетки с пористостью 0,95, CFD-анализ показал увеличение равномерности потока на 165%. Кроме того, согласно расчетам, увеличение длины прямого канала и использование спрямляющего аппарата обеспечили снижение средней интенсивности турбулентности потока в рабочей части на 61% и уменьшение угла отклонения потока на 16%, при увеличении средней скорости потока на 13%. В настоящее время труба находится на этапе изготовления.

Ключевые слова: аэродинамическая труба открытого типа, диффузор с широким углом раствора, динамические испытания воздушных винтов, качество потока в рабочей части, спрямляющий аппарат

Финансирование: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-19-00624 (<https://rscf.ru/project/23-19-00624/>)

Для цитирования: Карпович Е.А., Занегин С.Ю. Низкоскоростная аэродинамическая труба открытого типа с большим углом раствора диффузора для испытаний воздушных винтов // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 4. С. 31–41. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=186665>

Original article

Open-Circuit Wide-Angle Low-Speed Blower Wind Tunnel for Propellers Testing

Elena A. Karpovich^{1✉}, Sergei Yu. Zanezin²^{1, 2} Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation¹ karpovichea@mai.ru ✉ Scopus Author ID: 57212414124; ORCID: 0000-0002-6657-0271;

Researcher WoS ID: AAE-2799-2022

² zanezinsy@mai.ru Scopus Author ID: 56202162500; ORCID: 0000-0001-9867-6639;

Researcher WoS ID: G-2018-2017

Abstract

This article presents the design, analytical and numerical analysis, as well as key specifications of a compact, open-circuit blower-type wind tunnel, developed for the propellers with the diameters up to 20 inches (0.508 m) dynamic testing under the forward speed of 20 m/s. The primary design objective consisted in achieving a uniform low-turbulent flow in the working section within the stringent spatial and budgetary constraints with the already existing centrifugal blower. The project employs the VTS 14-46-6.3 centrifugal blower equipped with the electric motor of 15 kW with the rated engine speed of 960 rpm. The blower ensures maximum air-flow rate of 20 500 m³/hour and total pressure of 1 790 Pa.

The following configuration for the wind tunnel was selected based on literature analysis: the diffuser with the 30° opening angle follows the blower outlet; settling chamber, a contraction section, and finally the working section are placed behind the diffuser. To simplify manufacturing, the entire wind tunnel is of square cross-section.

Two screens in the diffuser, one screen (honeycomb) and two grids in the settling chamber are installed for the flow control inside the channel.

Application of the diffuser with wide opening angle, as well as a square cross-section is a trade-off decision that prioritizes compactness and manufacturability, which, however, inherently creates a risk of the flow separation and a higher level turbulence in the working section. To optimize the wind tunnel characteristics, a parametric CDF-study, in which the effect of the length of straight section, which couples the blower and diffuser, and the presence of porous media (screens and honeycomb) on the flow quality key indicators was conducted.

The computations indicate that the increase of the straight section length and wire meshes and grid installing enhance significantly the flow uniformity in the working section. The optimized configuration with the straight section length of 900 mm allowed achieving the flow uniformity increase in the working section by 165%, and average turbulence intensity reduction to 1.13%, i.e. by 61%; the flow misalignment reduction by 16%, and average velocity increase in the working section by 13% compared to the basic prototype. Analytically evaluated maximum flow velocity in the working section with the 0.81 × 0.81 m cross-section is 14.7 m/s.

The wind tunnel structure is being built from 6mm plywood with external strengthening ribs. Its settling chamber is modular and consists of several box-like elements. These elements sizes variation allows changing the distance between the meshes. The whole section with honeycomb can be replaced if necessary.

The honeycomb cells are planned for production via 3D-printing (FDM/SLA). The authors suggest dividing cross-section of the entire structure into the sections aliquot to the printing area of the corresponding printer (290 × 290 mm for the FDM, and 290 × 160 mm for the SLA)

Keywords: open-circuit wind tunnel, wide-angle diffuser, propeller dynamic testing, working section flow quality, outlet straightener

Funding: the work was financed by the Russian Science Foundation, project No. 23-19-00624 (<https://rscf.ru/project/23-19-00624>)

For citation: Karpovich E.A., Zanezin S.Yu. Open-Circuit Wide-Angle Low-Speed Blower Wind Tunnel for Propellers Testing. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(4):31–41. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=186665>

List of Figures

Fig 1. The baseline wind tunnel version: max pressure drops, inlet flow speeds, and tunnel part lengths

Fig 2. The required motor power as a function of the flow velocity in the test section

Fig 3. Computational mesh for the wind tunnel model with a 900 mm straight section length. Number of cells ~1.2 × 10⁶

Fig 4. Flow quality parameters in the test section as a function of the straight section length (without porous media modeling)

Fig 5. Flow quality parameters in the test section as a function of the straight section length (four screens with porosity 0.61 and a honeycomb with porosity 0.95)

Fig 6. General view of the designed wind tunnel structure

Fig 7. Diffuser section on temporary supports (a); diffuser inlet with the installed screen (b)

Fig 8. Test sample of a honeycomb section manufactured by the FDM printing

List of Tables

Table 1. Sources of Flow Non-Uniformity in a Wind Tunnel Test Section and Mitigation Methods

Table 2. Target Flow Quality Parameters

Table 3. Specifications of Screens and Honeycomb Employed in This Project

Table 4. Technical Specifications of the Designed Wind Tunnel

Введение

Основная задача при проектировании любой аэродинамической трубы — обеспечить в ее рабочей части однородное низкотурбулентное течение в заданном диапазоне скоростей (чисел Рейнольдса). Такие установки являются важным инструментом для исследований в аэрокосмической промышленности, позволяющим изучать обтекание тел, измерять аэродинамические силы и оптимизировать формы летательных аппаратов. Задача усложняется при испытаниях воздушных винтов, особенно когда взаимодействие высокоэнергетической спутной струи с элементами планера или другими винтами существенно влияет на аэродинамические характеристики модели. Для таких испытаний необходимы сложные экспериментальные методики, позволяющие разделять прямой и косвенный вклад винта в измеряемые силы и моменты [1]. При этом достоверность получаемых экспериментальных данных напрямую зависит от качества потока в рабочей части, которое характеризуется равномерностью поля скоростей, уровнем турбулентности и угловым отклонением течения от оси трубы.

В мировой и российской практике проектирование компактных дозвуковых аэродинамических труб, особенно с открытым контуром, остается актуальной научной и инженерной задачей. Современные исследования сосредоточены на методах управления пограничным слоем и минимизации интенсивности турбулентности в рабочей части труб. Классические работы, такие как исследования Шубауэра и Шпангенберга, показали эффективность установки сеток для предотвращения отрыва потока в диффузорах труб [2]. В последние годы научный интерес сместился в сторону комплексных измерительных систем и испытаний специфических конфигураций. В частности, работы посвящены созданию интегрированных систем управления и сбора данных для испытаний распределенных пропеллерно-крыльевых систем, что требует син-

хронного измерения аэродинамических нагрузок, деформаций и давления [3]. Другие исследования фокусируются на экспериментальном сравнении эффективности воздушных винтов с различным шагом, подтверждая важность точных методик измерения тяги и момента [4]. В России значительное внимание уделяется метрологическому обеспечению подобных экспериментов. Например, в статье [5] представлены результаты исследования калибровки шестикомпонентных вращающихся тензометрических весов для испытаний винтов, что является критически важным для получения достоверных данных об аэродинамических силах и моментах.

Несмотря на обширный теоретический и экспериментальный задел, проблема создания компактной, эффективной и универсальной трубы для динамических испытаний воздушных винтов в условиях ограниченного пространства лаборатории решена не полностью. Применение открытого контура и широкоугольного диффузора, диктуемое соображениями компактности и возможности использования существующего оборудования, неизбежно сопряжено с риском отрыва потока, роста турбулентности и потерь давления. Таким образом, существует противоречие между высокими требованиями к качеству потока (с равномерностью $< 0,5\%$ и турбулентностью $< 0,1\%$ для авиационных исследований [6–8]) и конструктивными ограничениями, обусловленными компактностью схемы.

Целью данного проекта является разработка и обоснование конструктивной схемы компактной аэродинамической трубы с открытым контуром, предназначенной для динамических испытаний воздушных винтов диаметром до 20 дюймов (0,508 м) при скорости набегающего потока 20 м/с. Гипотеза исследования состоит в том, что заданный уровень качества потока в рабочей части может быть достигнут в трубе с диффузором большого угла раствора (30°) благодаря применению оптимизированной комбинации методов управ-

ления пограничным слоем, а именно благодаря установке двух согласованных сеток в диффузоре и системы из хонейкомба и двух сглаживающих сеток в форкамере.

Научная новизна работы заключается в комплексном обосновании конфигурации компактной трубы с квадратным сечением под заданный вентилятор, с фокусом на улучшение качества течения в рабочей части с помощью сеток и решетки. Практическая значимость определяется созданием доступной и трансформируемой экспериментальной трубы, которая позволит проводить достоверные исследования характеристик малогабаритных воздушных винтов, востребованных в беспилотной авиации.

Причины, по которым проектируемая труба имеет открытый контур и диффузор с широким углом раствора, следующие:

- 1) ограниченность располагаемого пространства лаборатории;
- 2) проектирование трубы под существующий центробежный вентилятор (что диктует необходимость располагать вентилятор перед рабочей частью).

Преимущества трубы такого типа [9, 10]:

- 1) компактность;
- 2) отсутствие рециркуляции потока;
- 3) отсутствие потерь давления в поворотных коленах;
- 4) трансформируемость (в частности, простота замены рабочей части).

Одной из основных проблем при использовании широкоугольных диффузоров является отрыв потока на расширяющихся стенках. Отрыв потока вызывает турбулизацию течения и приводит к потерям давления. Исследования Шубауэра и Шпангенберга [2] показали, что установка сеток (экранов) позволяет предотвратить отрыв за счет перераспределения профиля скорости. Последующие работы освещали следующие аспекты проектирования диффузоров:

1. Степень расширения и угол раствора диффузора: повышение степени расширения (отношения площадей) и увеличение угла раскрытия диффузора увеличивают риск отрыва пограничного слоя, что требует применения методов управления пограничным слоем [11, 12].

2. Сетки:

- при заданной степени интенсивности турбулентности установка нескольких сеток эффективнее, чем использование одной сетки [13];
- расчеты перепада давления на сетках до сих пор основываются на фундаментальных уравнениях Коллара [13];

3. Форма стенок диффузора:

- криволинейные стенки (например, диффузоры раструбного типа [14]) снижают риск отрыва потока, однако их изготовление является более сложной задачей;
- диффузоры с прямолинейными стенками в сочетании с оптимизированными сетками представляют собой практичный компромиссный вариант.

4. Методы управления пограничным слоем:

- отсос пограничного слоя через щели (Yang et al. [15]);
- стабилизация потока с помощью запертых вихрей (Haight & O'Donnell [16]);
- использование диффузоров с пирамидальными сетками (Gibbins [17]);
- применение движущихся стенок (Tennant [18]).

Следует отметить, что значительная часть современных экспериментальных исследований вращающихся систем, включая воздушные и ветроэнергетические винты, сосредоточена на изучении динамических и нестационарных эффектов в потоках, что требует высокого качества потока в рабочей части трубы и точных измерительных комплексов, как это показано в актуальных обзорах по данной тематике [19, 20].

На основании анализа литературы была выбрана следующая конфигурация для нашей аэродинамической трубы: за выходным патрубком вентилятора следует диффузор с углом раскрытия 30° ; за диффузором расположены форкамера, конфузор и рабочая часть. Для упрощения производства вся труба выполнена с квадратным поперечным сечением. В рамках настоящей работы была исследована как базовая конфигурация (непосредственно за выходным сечением вентилятора начинается расширяющий канал диффузора), так и варианты с прямым участком разной длины между вентилятором и диффузором.

Для улучшения качества потока внутри канала установлены две сетки в диффузоре, одна решетка (хонейкомб) и две сетки в форкамере.

Хотя использование прямоугольного сечения (со скругленными углами) допустимо, если восстановление полного давления не является критическим фактором [21], в перспективе, для повышения качества потока и снижения энергопотребления, мы рассмотрим возможность улучшения формы поперечного сечения трубы.

Качество потока в рабочей части аэродинамической трубы является ключевым фактором, определяющим точность и достоверность получаемых экспериментальных данных. Источники неравномерности потока в рабочей части и воз-

можные методы их устранения представлены в табл. 1.

Целевые значения перечисленных показателей (параметров качества потока) для различных областей применения представлены в табл. 2.

1. Методика проектирования аэродинамической трубы с центробежным вентилятором

В качестве целевой модели для испытаний был выбран винт диаметром 20 дюймов (508 мм).

Предельные характеристики проектируемой трубы определялись параметрами имеющегося центробежного вентилятора модели ВТС 14-46-6.3, приводимого в действие электродвигателем мощностью 15 кВт с номинальной частотой вращения 960 об/мин. Вентилятор обеспечивает максимальный объемный расход воздуха 20500 м³/ч и полное давление 1 790 Па [22].

1.1. Рабочая часть и диффузор с широким углом раствора

Ключевыми элементами аэродинамической трубы данного типа являются рабочая часть, диффузор, а также устройства для управления качеством потока.

Ширина (гидравлический диаметр) поперечного сечения рабочей части определяется как отношение максимального диаметра винта (0,508 м) к рекомендуемому коэффициенту загромождения трубы

0.625 [23]. Для винта диаметром 20 дюймов это дает ширину рабочей части ~0.81 м.

Длина рабочей части, как правило, — это удвоенный гидравлический диаметр [24], в данном случае она составляет ~1.62 м.

Параметры потока в диффузоре определяются степенью его расширения (отношением площадей), углом раскрытия стенок, формой поперечного сечения и контуром стен. На работу диффузора также влияют условия на входе и выходе, а также наличие устройств для управления пограничным слоем.

В данном проекте из-за ограничений по пространству и требуемой степени сужения используется диффузор с широким углом раскрытия (30°), прямолинейными стенками и квадратным поперечным сечением. Этот выбор является значительным компромиссом, который негативно влияет на уровень турбулентности (а следовательно, и на точность измерений) и на потери давления (увеличивается энергопотребление установки). Для предотвращения сильного отрыва потока в диффузоре будут установлены две изогнутые сетки непосредственно перед расчетной точкой начала отрыва.

Длина диффузора рассчитывается исходя из заданной степени сужения 3, выбранного угла раскрытия (30°), а также известных площадей выходного патрубка вентилятора и рабочей части (0.19 м² и 0.66 м² соответственно).

Таблица 1. Источники неравномерности потока в рабочей части аэродинамической трубы и методы их устранения

Проблема	Причина	Решение
Градиенты скорости	Неэффективная геометрия конфузора (сопла)	Оптимизация степени сужения (> 7 : 1)
Локальные зоны турбулентности	Возмущения от элементов трубы (вентилятор, решетки)	Установка решетки и сеток
Рост толщины пограничного слоя	Трение потока о стенки	Применение отсоса или выдува пограничного слоя, корректировка положения модели, снижение шероховатости стен
Вторичные течения (поперечные потоки)	Турбулизация в связи с кривизной канала	Применение спрямляющего аппарата

Таблица 2. Целевые значения показателей качества потока

Область применения	Равномерность	Интенсивность турбулентности	Угловое отклонение	Ссылка
Авиационные исследования	< 0,5%	< 0,1%	< 0,5°	[6–8]
Автомобильная/промышленная аэродинамика	< 1–2%	< 1–2%	< 1°	[8]
Моделирование атмосферного пограничного слоя	Только латеральная равномерность	Допускается повышенная турбулентность	Не применимо	[6]

1.2. Предотвращение отрыва потока и обеспечение его равномерности: сетки и решетка

Из-за большого угла раскрытия в принятой конструкции диффузора отрыв потока в этой части трубы становится практически неизбежным. В справочнике по гидравлическим сопротивлениям Идельчика перечислены различные способы улучшения течения в широкоугольных диффузорах, такие как:

- отсос или поддув пограничного слоя;
- применение прямых и криволинейных разделителей потока;
- использование ступенчатых диффузоров;
- установка кольцевых ребер.

В частном случае аэродинамических труб основными средствами предотвращения отрыва являются:

- 1) установка хонейкомбов (сот) и сеток из перфорированного металла или, что более распространено, проволоочной сетки;
- 2) выбор достаточной степени сужения конфузора [25].

Как уже упоминалось в разделе 1.1, в данном проекте степень сужения составляет 3, что недостаточно для обеспечения относительно низкого уровня турбулентности в рабочей части (поскольку обычно рекомендуются значения от 8 до 12 [21]). По этой причине

особое внимание было уделено проектированию соответствующих сеток и хонейкомба для данной трубы.

Типичные значения коэффициента пористости для сеток, используемых в аэродинамических трубах, находятся в диапазоне 0,5–0,80 [21].

Для хонейкомба (сот) дополнительным важным параметром является его длина – размер в направлении оси трубы. Согласно данным Меты [21], типичные значения отношения длины хонейкомба к диаметру его ячейки составляют 6–8, а коэффициент пористости – около 0,8. При таких значениях коэффициент потерь в решетке составляет около 0,5.

На основании серии оценочных расчетов для нашего проекта были выбраны параметры сеток и решетки, представленные в табл. 3.

1.3. Базовая геометрия проектируемой аэродинамической трубы

Общая базовая геометрия аэродинамической трубы (без прямого участка между вентилятором и диффузором, для максимального диаметра винта 20 дюймов) представлена на рис. 1. На схеме также показаны аналитически рассчитанные максимальные перепады давления и скорости потока на входе для каждого участка трубы.

Таблица 3. Спецификации применяемых в данном проекте сеток и решетки

Устройства	Коэффициент пористости	Размер ячейки, мм	Диаметр проволоки (толщина полосы), мм	Число Рейнольдса	Коэффициент потерь давления	Длина, мм
Сетка	0,61	1	0,22	118	0,40	—
Решетка	0,93	19	0,45	4501	0,50	150

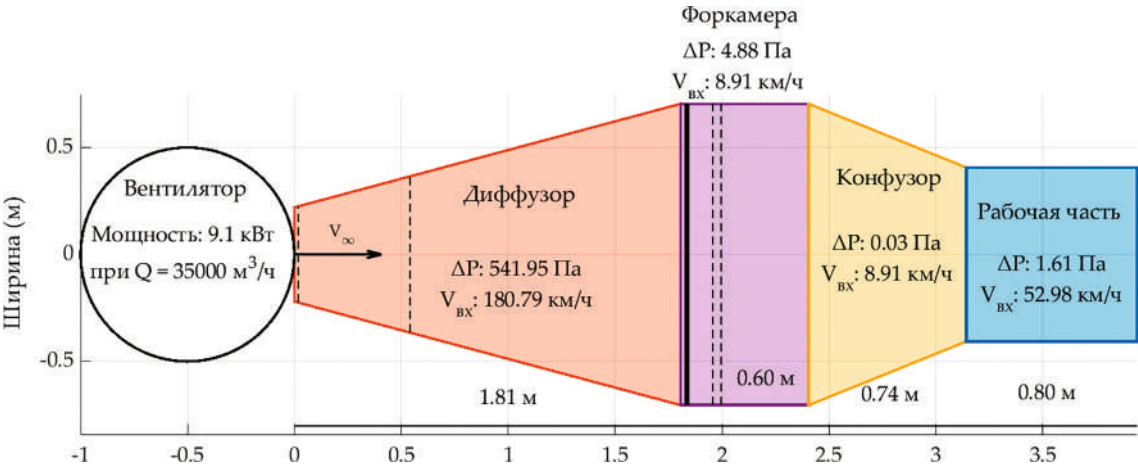


Рис. 1. Базовый вариант аэродинамической трубы: максимальные перепады давления, скорости потока на входе, длины частей трубы

2. Оценка характеристик спроектированной аэродинамической трубы

2.1. Аналитический расчет

На рис. 2 показана зависимость требуемой мощности электродвигателя от максимально достижимой скорости потока в рабочей части при фиксированном объемном расходе воздуха (диаметр винта 20 дюймов).

На графике обозначены предельные значения: максимальный объемный расход — 35 000 м³/ч, максимальная мощность двигателя — 15 кВт.

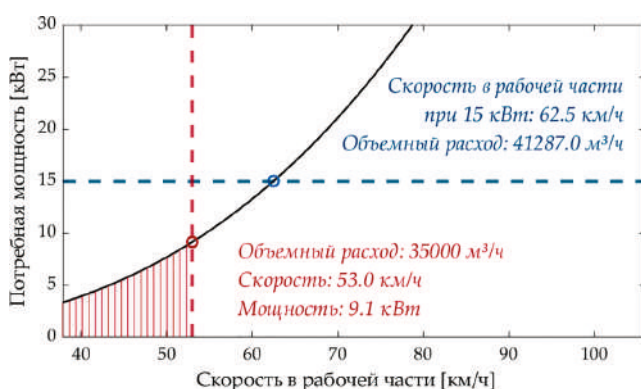


Рис. 2. Зависимость требуемой мощности двигателя от скорости потока в рабочей части

2.2. Расчет с помощью CFD

Целями CFD-анализа в рамках данного проекта были:

- 1) оценка скорости и параметров качества потока в рабочей части трубы;
- 2) оценка влияния сеток и решетки на характеристики трубы;
- 3) исследование влияния длины прямого участка на работу трубы; под прямым участком подразумевается прямой канал, соединяющий выход вентилятора и вход в диффузор.

Исходя из поставленных целей, рассчитывались параметры работы трубы с вентилятором на максимальных оборотах (1200 об/мин) в шести конфигурациях:

- с сетками (коэффициент пористости 0,61) и хонейкомбом (коэффициент пористости 0,95) или без них;
- при трех длинах прямого участка: 20, 680 и 900 мм.

В процессе обработки результатов собирались и визуализировались следующие данные:

- 1) распределение скорости, статического давления и интенсивности турбулентности вдоль осевой линии трубы (для сравнения результатов CFD с предыдущими аналитическими расчетами в MATLAB);

- 2) компоненты скорости, динамическое давление и интенсивность турбулентности в сетке из $5 \times 5 = 25$ точек в контрольном сечении, необходимые для расчета параметров качества потока. Эти данные также планируется верифицировать натурными измерениями.

Поскольку задача решалась в стационарной постановке, данные по интенсивности турбулентности служат только для ориентировочной оценки и сравнения конфигураций.

Рассчитываемые критерии качества потока:

- 1) равномерность скорости потока в рабочей части (влияет на мощность, требуемую для вращения вентилятора);
- 2) равномерность средней интенсивности турбулентности в рабочей части (влияет на аэродинамические характеристики винта);
- 3) угловая погрешность (несоосность) потока (влияет на измеряемые характеристики винта).

Для численных расчетов мы использовали пакет CADCAD [26], который позволяет моделировать сложные течения с приемлемой точностью при ограниченных вычислительных ресурсах и времени.

Был установлен максимально доступный глобальный уровень детализации сетки, равный 7.

Исследование сеточной зависимости показало следующее:

- 1) при начальном размере сетки более 5×10^5 ячеек ее дальнейшее сгущение не влияло на результат.
- 2) практически реализуемый размер сетки при имеющейся вычислительной мощности (AMD Ryzen 5 5600H, 16 ГБ ОЗУ) — до $1,5 \times 10^6$ ячеек, что соответствовало ~90 минутам расчетного времени на одну конфигурацию.

Для более точного определения важных локальных особенностей потока были построены две дополнительные локальные сетки с уровнем детализации 2:

- 1) локальная сетка вокруг рабочей части;
- 2) локальные сетки вокруг твердых тел, моделирующих пористые среды (четыре сетки и хонейкомб).

Пример расчетной сетки представлен на рис. 3.

Далее представлена зависимость критериев качества потока в рабочей части от длины прямого

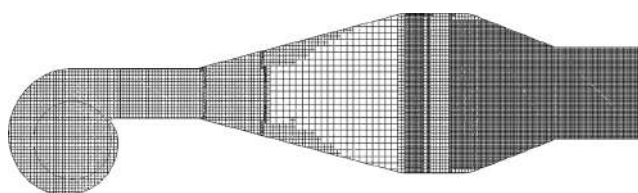


Рис. 3. Расчетная сетка для модели аэродинамической трубы с длиной прямого участка 900 мм. Число ячеек $\sim 1,2 \times 10^6$

участка для двух случаев: без моделирования пористых сред (сетки и хонейкомб) и с моделированием (соответственно, рис. 4 и 5).

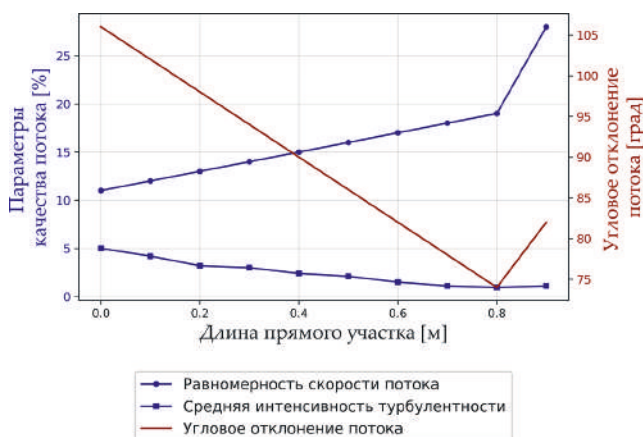


Рис. 4. Параметры качества потока в рабочей части в зависимости от длины прямого участка (без моделирования пористых сред)

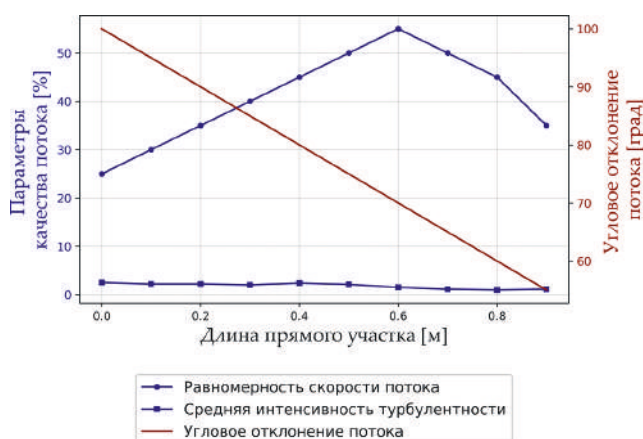


Рис. 5. Параметры качества потока в рабочей части в зависимости от длины прямого участка (четыре сетки с пористостью 0,61 и решетка с пористостью 0,95)

3. Конструирование и изготовление

Конструкция аэродинамической трубы была выбрана максимально простой, с квадратным поперечным сечением, как и у выходного патрубка вентилятора. Это решение позволяет изготовить трубу в кратчайшие сроки (рис. 6).

Труба изготовлена из фанеры толщиной 6 мм. Для увеличения жесткости большие поверхности стенок усилены внешним ребрами жесткости из деревянных реек. На рис. 7,а показана основная секция диффузора на временных опорах, а на рис. 7,б — входная часть диффузора с предварительно установленной сеткой.

Форкамера выполнена по модульному принципу, она состоит из нескольких коробчатых

элементов. Изменяя размеры этих элементов (их длину в осевом направлении), можно регулировать расстояние между сетками. При необходимости весь отсек с хонейкомбом может быть заменен.

Ячейки хонейкомба планируется изготовить с помощью 3D-печати; рассматриваются технологии FDM (рис. 8) и SLA. Для сборки всей конструкции предлагается разделить поперечное сечение на секции, кратные площади печати соответствующего принтера (290 × 290 мм для FDM и 290 × 160 мм для SLA).

Для измерения тяги и крутящего момента планируется использовать уже существующие в лаборатории стенды собственной разработки.

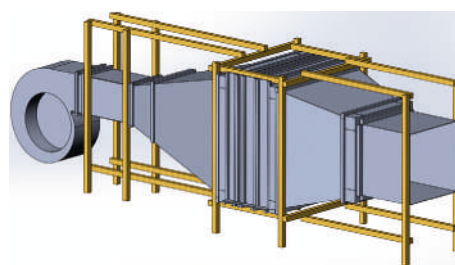


Рис. 6. Общий вид конструкции проектируемой аэродинамической трубы

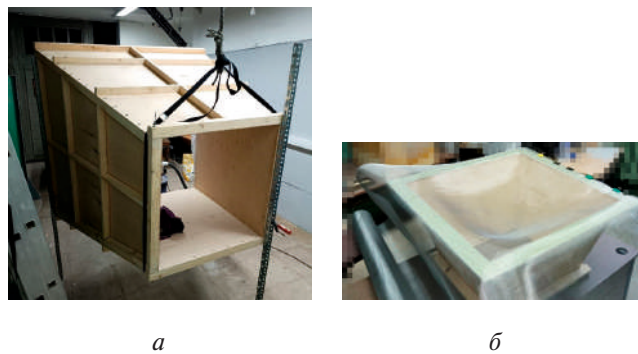


Рис. 7. Секция диффузора на временных опорах (а) и входная часть диффузора с установленной сеткой (б)



Рис. 8. Тестовый образец секции хонейкомба, изготовленный методом FDM-печати

Таблица 4. Технические характеристики проектируемой аэродинамической трубы

Общие параметры установки	
Максимальный диаметр испытуемого винта	20 дюймов
Полная длина канала	4,8 м
Угол раскрытия диффузора	30°
Параметры рабочей (измерительной) части	
Размеры (ширина × высота × длина), квадратное сечение	0.81 × 0.81 × 0.8 м
Максимальная скорость потока (аналитический / численный расчет)	53 / 36 км/ч
Интенсивность турбулентности	1,13%
Несоосность потока	92 °
Параметры центробежного вентилятора (ВТС 14-46-6,3)	
Доступная мощность привода	15 кВт
Максимальный объемный расход	35000 м³/ч
Диаметр выходного патрубка	0,68 м
Параметры устройств для управления качеством потока	
Четыре сетки	1 × 1 мм, диаметр проволоки 0,24 мм, коэффициент пористости 0,61
Решетка	19 × 19 × 150 мм, толщина материала 0,45 мм, коэффициент пористости 0,93

Регулирование объемного расхода (скорости потока) в аэродинамической трубе будет осуществляться с помощью промышленного преобразователя частоты (инвертора), управляющего частотой вращения вентилятора центробежного нагнетателя.

Выводы

Полученные результаты аналитических (MATLAB) и численных (CADFlo) расчетов позволяют заключить, что выбранная стратегия управления пограничным слоем подтверждает выдвинутую гипотезу и помогает решить основную проблему проектирования – улучшение качества потока в компактной установке с широкоугольным диффузором.

Расчетные данные показывают, что благодаря увеличению длины прямого участка на 43% в сочетании с установкой комплекта из четырех сеток и решетки наблюдается некоторое улучшение ключевых параметров. Рост равномерности потока на 165% и снижение средней интенсивности турбулентности на 61% свидетельствуют о возможности подавления отрыва потока в диффузоре и стабилизации течения. Такой результат соответствует положениям классических работ [7, 21].

Уменьшение несоосности потока на 16% позволит повысить достоверность результатов будущих экспериментов с винтами; увеличение средней скорости течения в рабочей части на 13% при тех же затратах энергии даст возможность проводить

испытания в более широком диапазоне режимов.

Проектируемая аэродинамическая труба позволит решать задачи в интересах разработчиков малых летательных аппаратов и БПЛА.

Итоговая геометрия и расчетные параметры проектируемой аэродинамической трубы приведены в табл. 4.

Список источников

1. Степанович Ю.С. Анализ взаимодействия воздушных винтов с планером легкого транспортного самолета // Научный вестник МГТУ ГА. 2021. Т. 24. № 5. С. 76-88. DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-5-76-88
2. Schubauer G.B., Spangenberg W.G. Effect of screens in wide-angle diffusers. Report NASA-TN-1610, 1948.
3. Wei W., Zhitao Z., Changchuan X., et al. Measurement and control system design for propeller-wing system experiments // International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics (17-21 June 2024; Hague, Netherlands).
4. Czyż Z., Karpiński P., Skiba K., et al. Wind Tunnel Performance Tests of the Propellers with Different Pitch for the Electric Propulsion System // Sensors. 2022. Vol. 22. No. 1: 2. DOI: 10.3390/s22010002
5. Петровевич В.В., Лютов В.В., Манвелян В.С. и др. Исследования по калибровке шестикомпонентных вращающихся тензометрических весов для испытаний винтов летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 4. С. 48-61. DOI: 10.34759/vst-2021-4-48-61

6. Moonen P., Blocken B., Carmeliet J. Indicators for the evaluation of wind tunnel test section flow quality and application to a numerical closed-circuit wind tunnel // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2007. Vol. 95. No. 9-11, pp. 1289-1314. DOI: 10.1016/j.jweia.2007.02.027
7. Bass R. Small Scale Wind Tunnel Testing of Model Propellers // 24th AIAA Aerospace Science Meeting (06-09 January 1986; Reno, NV, USA). DOI: 10.2514/6.1986-392
8. González Hernández M.A., López A.I.M., Jarzabek A.A., et al. Design Methodology for a Quick and Low-Cost Wind Tunnel // In book: Ahmed N.A. (ed) *Wind Tunnel Designs and Their Diverse Engineering Applications*. IntechOpen; 2013, pp. 3-28. DOI: 10.5772/54169
9. Dryden H.L. The Design of Low Turbulence Wind Tunnels. Report NACA-TR-940, 1949.
10. Azzawi I.D.J. Design and characterizing of blower wind tunnel using experimental and numerical simulation // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2023. Vol. 237. No. 15, pp. 3582-3596. DOI: 10.1177/09544100231195190
11. Gelder T., Moore R., Samz J. Wind Tunnel Turning Vanes of Modern Design. NASA Technical Memorandum 87/46 AIAA_86-0044, 1986.
12. Kline S.J., Moore C.A., Cochran D.L. Wide-angle diffusers of high performance and diffuser flow mechanisms // *Journal of the Aeronautical Sciences*. 1957. Vol. 24, pp. 469-471.
13. Collar A.R. The effect of a gauze on the velocity distribution in a uniform duct. ARC Reports and Memoranda, 1939. No. 1867.
14. McLellan C.H., Nichols M.R. An investigation of diffuser resistance combinations in duct systems. Aeronautical Research Committee Technical Report NACA-WR-L-329, 1942.
15. Yang T., Hudson W.G., Nelson C.D. Design and experimental performance of short curved wall diffusers with axial symmetry utilizing slot suction. NASA Technical Reports Server NASA CR-2209, 1973.
16. Haight C.H., O'Donnell R.M. Experimental mating of trapped vortex diffusers with large area ratio thrust augmentors. ARL TR 74-0115, Air Force Systems Command, 1974.
17. Gibbings J.C. The pyramid gauze diffuser // *Archive of Applied Mechanics*. 1973. Vol. 42, pp. 225-233. DOI: 10.1007/BF00533610
18. Tennant J.S. A subsonic diffuser with moving walls for boundary layer control // *AIAA Journal*. 1973. Vol. 11. No. 2, pp. 240-241. DOI: 10.2514/3.6735
19. Fontanella A., Facchinetti A., Di Carlo S., et al. Wind tunnel investigation of the aerodynamic response of two 15 MW floating wind turbines // *Wind Energy Science*. 2022. Vol. 7. No. 4, pp. 1711-1729. DOI: 10.5194/wes-7-1711-2022
20. He R., Sun H., Gao X., et al. Wind tunnel tests for wind turbines: a state-of-the-art review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 166: 112675. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112675
21. Mehta R.D. The aerodynamic design of blower tunnels with wide-angle diffusers // *Progress in Aerospace Sciences*. 1979. Vol. 18, pp. 59-120. DOI: 10.1016/0376-0421(77)90003-3
22. Технические характеристики вентилятора ВЦ 14-46-6,3. URL: https://ventilator.spb.ru/catalog/obshcheobmennyye-ventilyatory/radialnye/radialnye_ventilyatory_vts_14-46/vts_14-46_6-3/
23. Дубов Б.С., Радциг А.Н., Семенчиков Н.В. и др. Моделирование условий полета летательных аппаратов при испытаниях в аэродинамических трубах: Учеб. пособие. М.: Изд-во МАИ, 2004. 74 с.
24. Barlow J.B., Rae W.H., Pope A. Low-Speed Wind Tunnel Testing. 3rd ed. Wiley-Interscience, 1999. 736 p.
25. Farrell C., Youssef S. Experiments on Turbulence Management Using Screens and Honeycombs // *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*. 1996. Vol. 118. No. 1, pp. 26-32. DOI: 10.1115/1.2817505
26. CADFlo. URL: <https://cadflo.ru/product/cadflo>

References

1. Stepanovich YuS. Analysis of the propellers-airframe interaction of the light transport aircraft. *Civil Aviation High Technologies*. 2021;24(5):76-88. (In Russ.). DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-5-76-88
2. Schubauer GB, Spangenberg WG. *Effect of screens in wide-angle diffusers*. Report NASA-TN-1610; 1948.
3. Wei W, Zhitao Z, Changchuan X, et al. Measurement and control system design for propeller-wing system experiments. *International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics (June 17-21, 2024; Hague, Netherlands)*.
4. Czyż Z, Karpiński P, Skiba K, et al. Wind Tunnel Performance Tests of the Propellers with Different Pitch for the Electric Propulsion System. *Sensors*. 2022;22(1):2. DOI: 10.3390/s22010002
5. Petronevich VV, Lyutov VV, Manvelyan VS, et al. Studies on six-component rotating strain-gauge balance calibration for aircraft propellers testing. *Aerospace MAI Journal*. 2021;28(4):48-61. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2021-4-48-61
6. Moonen P, Blocken B, Carmeliet J. Indicators for the evaluation of wind tunnel test section flow quality and application to a numerical closed-circuit wind tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2007;95(9-11):1289-1314. DOI: 10.1016/j.jweia.2007.02.027
7. Bass R. Small Scale Wind Tunnel Testing of Model Propellers. *24th AIAA Aerospace Science Meeting (January 06-09, 1986; Reno, NV, USA)*. DOI: 10.2514/6.1986-392
8. González Hernández MA, López AIM, Jarzabek AA, et al. Design Methodology for a Quick and Low-Cost Wind Tunnel. In book: Ahmed N.A. (ed) *Wind Tunnel Designs and Their Diverse Engineering Applications*. IntechOpen; 2013, p. 3-28. DOI: 10.5772/54169

9. Dryden HL. *The Design of Low Turbulence Wind Tunnels*. Report NACA-TR-940; 1949.
10. Azzawi IDJ. Design and characterizing of blower wind tunnel using experimental and numerical simulation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: *Journal of Aerospace Engineering*. 2023;237(15):3582-3596. DOI: 10.1177/09544100231195190
11. Gelder T, Moore R, Samz J. *Wind Tunnel Turning Vanes of Modern Design*. NASA Technical Memorandum 87/46 AIAA_86-0044, 1986.
12. Kline SJ, Moore CA, Cochran DL. Wide-angle diffusers of high performance and diffuser flow mechanisms. *Journal of the Aeronautical Sciences*. 1957;24:469–471.
13. Collar AR *The effect of a gauze on the velocity distribution in a uniform duct*. ARC Reports and Memoranda; 1939. No. 1867.
14. McLellan CH, Nichols MR. *An investigation of diffuser resistance combinations in duct systems*. Aeronautical Research Committee Technical Report NACA-WR-L-329; 1942.
15. Yang T, Hudson WG, Nelson CD. *Design and experimental performance of short curved wall diffusers with axial symmetry utilizing slot suction*. NASA Technical Reports Server NASA CR-2209; 1973.
16. Haight CH, O'Donnell RM. *Experimental mating of trapped vortex diffusers with large area ratio thrust augmentors*. ARL TR 74-0115, Air Force Systems Command; 1974.
17. Gibbings JC. The pyramid gauze diffuser. *Archive of Applied Mechanics*. 1973;42:225 –233. DOI: 10.1007/BF00533610
18. Tennant JS. A subsonic diffuser with moving walls for boundary layer control. *AIAA Journal*. 1973;11(2):240-241. DOI: 10.2514/3.6735
19. Fontanella A, Facchinetti A, Di Carlo S, et al. Wind tunnel investigation of the aerodynamic response of two 15 MW floating wind turbines. *Wind Energy Science*. 2022;7(4):1711–1729. DOI: 10.5194/wes-7-1711-2022
20. He R, Sun H, Gao X, et al. Wind tunnel tests for wind turbines: a state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;166:112675. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112675
21. Mehta R.D. The aerodynamic design of blower tunnels with wide-angle diffusers. *Progress in Aerospace Sciences*. 1979;18:59-120. DOI: 10.1016/0376-0421(77)90003-3
22. *Technical characteristics of the VTs 14-46-6,3*. (In Russ.). URL: https://ventilator.spb.ru/catalog/obshcheobmennye-ventilyatory/radialnye/radialnye_ventilyatory_vts_14-46/vts_14-46_6-3/
23. Dubov BS, Radtsig AN, Semenchikov NV, et al. *Modeling of flight conditions of aircraft during tests in wind tunnels*. Moscow: MAI; 2004. 74 p. (In Russ.).
24. Barlow J.B., Rae W.H., Pope A. *Low-Speed Wind Tunnel Testing*. 3rd ed. Wiley-Interscience; 1999. 736 p.
25. Farell C, Youssef S. Experiments on Turbulence Management Using Screens and Honeycombs. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*. 1996;118(1):26-32. DOI: 10.1115/1.2817505
26. *CADFlo*. URL: <https://cadflo.ru/product/cadflo>

Статья поступила в редакцию / Received 24.11.2025
Одобрена после рецензирования / Revised 05.12.2025
Принята к публикации / Accepted 06.12.2025