

УДК 533.697.5

Doi: 10.31772/2712-8970-2025-26-3-368-378

Для цитирования: Брызгунов П. А., Григоров В. А., Гришин Л. Е. Повышение эффективности безлопастных вентиляторов посредством нанесения продольных цилиндрических канавок на стенки диффузора // Сибирский аэрокосмический журнал. 2025. Т. 26, № 3. С. 368–378. Doi: 10.31772/2712-8970-2025-26-3-368-378.

For citation: Bryzgunov P. A., Grigorov V. A., Grishin L. E. [Increasing the efficiency of bladeless fans by applying longitudinal cylindrical grooves on the diffuser walls]. *Siberian Aerospace Journal*. 2025, Vol. 26, No. 3, P. 368–378. Doi: 10.31772/2712-8970-2025-26-3-368-378.

Повышение эффективности безлопастных вентиляторов посредством нанесения продольных цилиндрических канавок на стенки диффузора

П. А. Брызгунов*, В. А. Григоров, Л. Е. Гришин

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Российская Федерация, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14

*E-mail: bryzgunovpa@mpei.ru

Аннотация. В работе исследуется возможность повышения эффективности безлопастных вентиляторов за счёт нанесения продольных цилиндрических канавок на внутренние стенки диффузора. Безлопастные вентиляторы, являющиеся нагнетателями типа струйных насосов, в настоящее время рассматриваются в качестве перспективных движителей для малых летательных аппаратов с электрическими и газотурбинными двигателями. Ключевым параметром их эффективности является степень повышения расхода, зависящая от геометрии и аэродинамического совершенства воздушного тракта. В настоящем исследовании было проведено численное моделирование с целью оценки влияния геометрических параметров цилиндрических канавок на аэродинамические характеристики вентилятора. В качестве параметров рассматривались диаметры дуг, образующих канавки (3, 6, 9 мм) и угловой шаг установки (2°, 4°, 6°). Аэродинамические расчеты были выполнены в трёхмерной периодической постановке с использованием программного пакета ANSYS CFX с применением модели турбулентности $k-\omega$ SST. Показано, что при фиксированном полном давлении воздуха на выходе из кольцевой щели расход первичного воздуха остаётся неизменным для всех конфигураций. Наибольшее повышение эффективности достигнуто при диаметре канавок 6 мм и угловом шаге 2°: расход вторичного воздуха увеличился на 2 %, а тяга – на 4 % по сравнению с базовой моделью без канавок. Анализ полей турбулентной кинетической энергии и визуализации вихревых структур выявил, что данная конфигурация обеспечивает наименьшую интенсивность турбулентности и масштаб вихревых структур в пограничном слое, что способствует более эффективной передаче импульса от струи к окружающему воздуху. Канавки меньшего диаметра (3 мм) практически не оказывают влияния на эффективность, а при увеличении диаметра (9 мм) приводят к дополнительной турбулизации потока и снижению производительности. Результаты могут быть использованы при разработке высокоэффективных двигательных установок для беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: безлопастной вентилятор, эффект Коанда, инжекция воздуха, продольные цилиндрические канавки, турбулентная кинетическая энергия, аэродинамическое сопротивление.

Increasing the efficiency of bladeless fans by applying longitudinal cylindrical grooves on the diffuser walls

P. A. Bryzgunov^{*}, V. A. Grigorov, L. E. Grishin

National Research University "MPEI"
14, Krasnokazarmennaya St., Moscow, 111250, Russian Federation

^{*}E-mail: bryzgunovpa@mpei.ru

Abstract. The paper investigates the possibility of increasing the efficiency of bladeless fans by applying longitudinal cylindrical grooves to the inner walls of the diffuser. Bladeless fans, which are jet pump-type superchargers, show promise as propulsion systems for small aircraft with electric and gas turbine engines. The key parameter determining their efficiency is the flow entrainment ratio, which depends on the geometry and aerodynamic quality of the air passage. In this study, we perform numerical simulations to assess how the geometric parameters of the cylindrical grooves affect the fan's aerodynamic performance. We consider the diameters of the arcs forming the grooves (3, 6, and 9 mm) and the angular step of their placement (2°, 4°, and 6°) as variable parameters. We carry out aerodynamic calculations in a three-dimensional periodic setup using the ANSYS CFX software package with the $k-\omega$ SST turbulence model. Our results show that, at a fixed total pressure at the outlet of the annular gap, the primary airflow rate remains constant across all configurations. The highest efficiency occurs with a groove diameter of 6 mm and an angular pitch of 2°: in this case, the secondary airflow increases by 2 %, and thrust rises by 4 % compared to the base model without grooves. We analyze turbulent kinetic energy fields and visualize vortex structures, revealing that this configuration produces the lowest turbulence intensity and smallest vortex scales in the near-wall region, which enhances momentum transfer from the jet to the surrounding air. Grooves with a smaller diameter (3 mm) have almost no effect on performance, while larger grooves (9 mm) increase flow turbulence and reduce efficiency. Engineers can use these findings to develop highly efficient propulsion systems for unmanned aerial vehicles.

Keywords: bladeless fan, Coanda effect, air injection, longitudinal cylindrical grooves, turbulent kinetic energy, aerodynamic drag.

Введение

Безлопастные вентиляторы, получившие в настоящее время широкое распространение в сфере вентиляции и кондиционирования, являются нагнетателями класса струйных насосов и по принципу работы схожи с инжекторами. Название «безлопастной» отражает лишь внешний вид вентилятора, так как крыльчатка устанавливается в специальном кожухе. На рис. 1 представлена типичная конструкция безлопастного вентилятора, включающая в себя подводящий канал, внутреннее пространство кольцевидной формы, заканчивающееся кольцевой щелью, а также диффузор. При работе такого типа вентилятора воздух 1 нагнетается высокооборотистой крыльчаткой и направляется в подводящий канал 1, после чего во внутреннем пространстве 2 равномерно распределяется по площади кольцевой щели 3, за счет значительного сужения которой ускоряется. Высокоскоростной поток воздуха направляется кольцевой щелью 3 вдоль стенок диффузора. При выборе подходящих геометрических параметров струя воздуха не отрывается от стенок диффузора и прилипает к ним за счет эффекта Коанда. При этом импульс скоростной струи частично передается невозмущенному потоку, из-за чего в горловине диффузора 4 создается разрежение и туда поступает дополнительный вторичный воздух, который вместе с первичным направляется на выход диффузора 5. Таким образом, возможно значительное повышение расхода воздуха вплоть до 20–25 раз [1].

Очевидно, что в силу закона сохранения импульса, использование безлопастных вентиляторов не позволяет достичь большей энергоэффективности в сравнении с традиционными лопастными нагнетателями, однако их несомненным преимуществом является более ровный поток

воздуха на выходе, имеющий значительно меньшую турбулентность, что достигается при ускорении первичного воздуха в узкой кольцевой щели.

Данное преимущество обуславливает значительный в последние 10 лет интерес к безлопастным вентиляторам как к перспективным движителям малых летательных аппаратов как на электрической тяге, так и на газотурбинной. В случае использования газотурбинной тяги, по существу, реализуется турбовентиляторный двигатель, где турбина используется для привода крыльчатки нагнетателя. Примером подобного проекта являются летательные аппараты старта Jetoptera (США) [2].

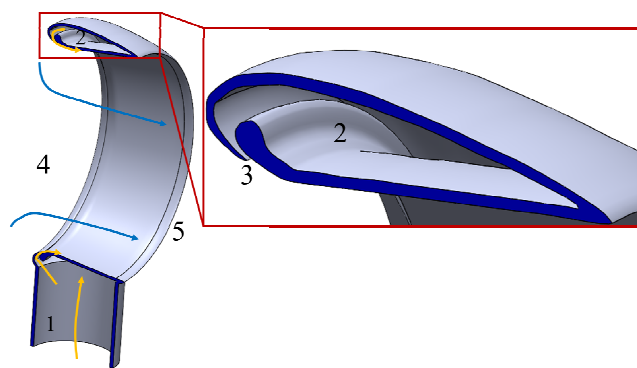


Рис. 1. Устройство безлопастного вентилятора:
1 – подводящий канал; 2 – внутреннее пространство; 3 – кольцевая щель;
4 – горловина диффузора; 5 – выход диффузора

Fig. 1. Bladeless fan structure:
1 – supply channel; 2 – technology space; 3 – annular gap; 4 – diffuser throat; 5 – outlet diffuser

В случае малых летательных аппаратов мультикоптерного типа применение безлопастных вентиляторов позволяет также повысить безопасность аппарата, так как подобные движители не имеют наружных вращающихся частей, ввиду чего устойчивы к попаданию мелких и крупных камней, птиц и антидроновым сетям. Примерами научных работ по данной тематике являются статьи [3; 4], которые посвящены разработке и созданию прототипов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с безлопастными движителями на основе электродвигателей, систем их автоматического управления. Интерес представляют также патенты [5; 6], в которых описываются концепты и конструктивные особенности подобных БПЛА.

Одной из ключевых характеристик безлопастного вентилятора является коэффициент увеличения расхода U , определяемый как отношение расхода воздуха на выходе из диффузора к расходу первичного воздуха, выпускаемого через кольцевую щель. При фиксированном расходе первичного воздуха и давлении на входе в кольцевую щель данный параметр в наибольшей мере определяет создаваемую тягу, так как от расхода воздуха на выходе зависит также и скорость на срезе диффузора. В соответствии с основным уравнением инжекции коэффициент U может быть найден как

$$U = \sqrt{\frac{\Phi}{1 + \zeta}}, \quad (1)$$

где Φ – отношение площади сечения кольцевой щели к площади горловины диффузора; ζ – коэффициент сопротивления кольцевой щели и диффузора.

Таким образом, теоретическое значение U зависит только от отношения площадей Φ и гидравлического совершенства воздушного тракта. Исследованию влияния геометрических параметров безлопастного вентилятора на его эффективность посвящено значительное количество работ, в которых рассматривается как влияние формы вентилятора и угла раскрытия диффузора [7], так и площади кольцевой щели, горловины и выходного сечения диффузора [8–14].

По результатам анализа данных работ, детальный обзор которых представлен в статье [14], было установлено, что среди вышеперечисленных параметров в наибольшей мере влияет отношение площадей Φ и в целом данное влияние при отсутствии срыва или отклонения струи соответствует теоретической формуле (1). При фиксированном диаметре горловины и расходе первичного воздуха уменьшение площади проходного сечения кольцевой щели приводит к повышению U , но при этом необходимо обеспечить повышения давления на входе, что приводит к повышенным затратам энергии.

Однако на коэффициент ζ диффузора помимо угла раскрытия также может оказывать влияние обработка его поверхности с целью подавления вихреобразования. При течении воздуха вдоль стенок диффузора, как правило, формируется турбулентный пограничный слой, при этом в вихревых структурах теряется часть изначальной кинетической энергии струи, что приводит к передаче меньшего ее количества невозмущенному воздуху и, соответственно, к снижению инжекции.

Для повышения аэродинамического совершенства поверхностей применяются различные модификации, такие как, например, установка лунок [15], поперечных канавок [16], а также продольных ребер [17]. Установка лунок и поперечных канавок позволяет снизить сопротивление на 5–10 % за счет формирования в них вихрей, в которых создается разрежение, позволяющее минимизировать отрыв потока. Установка же продольных ребер на поверхности позволяет уменьшить масштаб и энергию образующихся вихревых структур, посредством чего возможно снижение аэродинамического сопротивления порядка 5–6 %. Предполагается, что нанесение канавок позволит снизить турбулентность потока по схожему механизму без уменьшения площади сечения диффузора.

Задачей настоящего исследования является исследование аэродинамических характеристик безлопастного вентилятора в зависимости от геометрических параметров продольных канавок цилиндрической формы, нанесенных на стенки диффузора по направлению потока.

Объект и методика исследования

В качестве базовой была выбрана геометрия безлопастного вентилятора, описанная в патенте [18], причем диаметр горловины D составил 540 мм, длина диффузора L – 240 мм, а угол раскрытия диффузора – 14° . Базовая конструкция была дополнена цилиндрическими канавками с диаметром дуги d , нанесенными на стенки диффузора по направлению течения среды с угловым шагом α (рис. 2).

В настоящей работе рассматривались конфигурации вентиляторов с диаметрами канавок 3, 6, 9 мм при угловых шагах 2° , 4° , 6° в сравнении с базовой моделью без канавок.

С целью сокращения вычислительной трудоемкости ввиду осесимметричности течения в диффузоре исходная геометрия была упрощена и численное моделирование производилось в трехмерной периодической постановке. На рис. 3 представлен пример расчетной сетки, число элементов сетки составило 3,5 млн, включая тетраэдрические элементы в основной зоне потока и призматические – в пристеночной. При этом средние значения y_+ первой пристеночной ячейки составили 1,8; минимальные – 0,1; максимальные – 3,7. Таким образом, было обеспечено условие $y_+ < 5$, необходимое для использования выбранной модели турбулентности $k-\omega$ SST [19]. Для построения сетки использовалась программа ANSYS Meshing.

После построения сеточной модели была осуществлена настройка решателя, в качестве которого был применен пакет ANSYS CFX. На рис. 4 представлен эскиз расчетной модели с обозначенными граничными условиями. На входе первичного воздуха было задано граничное условие (ГУ) типа inlet по полному давлению, на боковых поверхностях расчетной области была задана периодичность (rotational periodicity), на поверхностях связи с окружающей средой – давление с типом ГУ opening. Тип opening был выбран по причине того, что в программе ANSYS CFX использование данной настройки приводит к снижению невязки расчета при наличии обратных токов как с всасывающей, так и с нагнетающей стороны вентилятора. Все остальные поверхности были заданы как непроницаемые стенки.

Для всех моделей вентиляторов были поставлены одинаковые значения избыточного давления воздуха на входе в щель 20 кПа. Избыточное давление окружающей среды было принято равным 0.

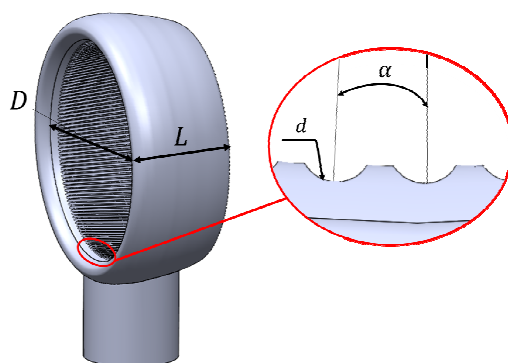


Рис. 2. Геометрия и ключевые размеры исследуемых моделей вентиляторов

Fig. 2. Geometry and key dimensions of the studied fan models

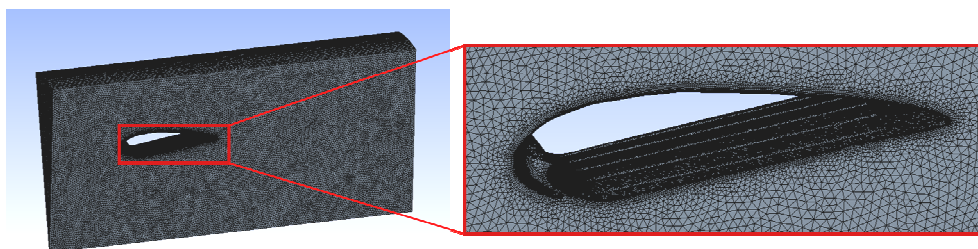


Рис. 3. Пример расчетной сетки

Fig. 3. Example of a computational grid

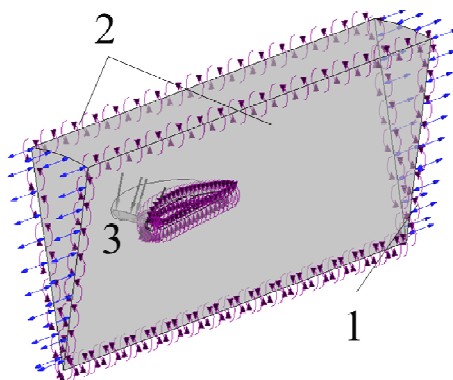


Рис. 4. Эскиз расчетной модели с обозначением граничных условий:
1 – ГУ окружающей среды; 2 – ГУ периодичности; 3 – ГУ входа первичного воздуха

Fig. 4. Sketch of the calculation model with boundary conditions:
1 – ambient GB; 2 – periodicity GB; 3 – primary air inlet GB

Результаты исследования

По результатам проведенного численного моделирования, при фиксированном давлении на входе все модели вентиляторов обеспечивают одинаковых расход первичного воздуха, составивший 0,79 кг/с (здесь и далее величины расходов и тяги приведены в пересчете на полный круг вентилятора).

На рис. 5 представлена эпюра скорости течения на выходе из диффузора применительно к рассмотренным моделям вентилятора. Как видно из рис. 5, наиболее заполненной является эпюра скорости, соответствующая конфигурации с диаметром канавок 6 мм и угловым шагом 2° . В случае данной геометрии обеспечивается наименьшая площадь сечения со скоростью менее 10, что говорит о лучшей передаче импульса от скоростной пристеночной струи невозмущенному воздуху.

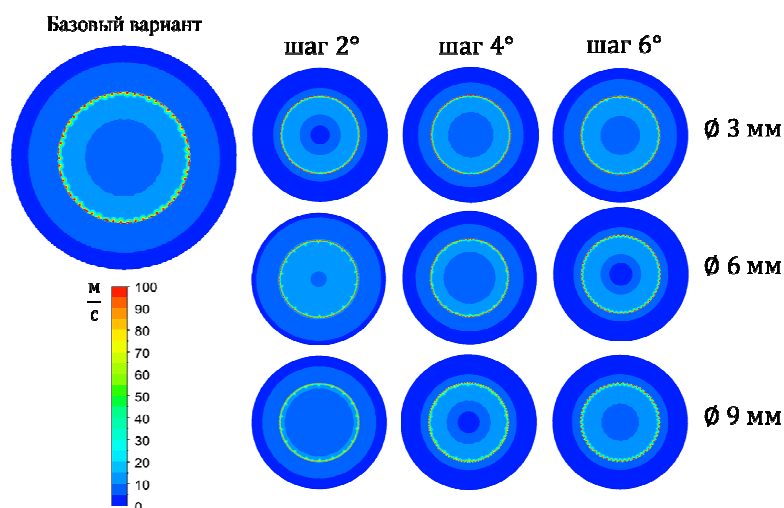


Рис. 5. Эпюры полей скорости в сечении модели, соответствующем выходу из диффузора

Fig. 5. Velocity field diagrams in the model section corresponding to the diffuser outlet

Конфигурации с диаметром канавок 6 мм и угловым шагом 2° также соответствует наибольший расход (рис. 6). Как видно из рис. 6, это единственная геометрия, обеспечивающая повышение эффективности в сравнении с базовой с увеличением расхода на 2 %. Увеличение расхода на выходе из диффузора на 2 % позволяет повысить создаваемую им как двигателем тягу на 4 % без изменения расхода и давления первичного воздуха (рис. 7). Данное повышение эффективности является небольшим, однако оно обеспечивается без повышения расхода и давления первичного воздуха на входе в отличие от уменьшения толщины щели.

При диаметрах канавок 3 мм показатели эффективности остаются практически без изменений, лишь незначительно снижаясь. Это позволяет сделать вывод о том, что диаметр 3 мм является малым и добавление канавок с таким диаметром на 0,5–1 % снижают аэродинамическую эффективность. При диаметре канавок 6 мм повышение эффективности происходит только при минимальном шаге 2° , в таком случае канавки по геометрии вырождаются в ребра. При большом диаметре канавок 9 мм происходит значительное снижение эффективности, что говорит о неприемлемости их использования.

С целью выяснения причин различной эффективности канавок при разном шаге и диаметре были построены поля турбулентной кинетической энергии (ТКЭ) на поверхностях, формирующихся при течении вихревых структур (рис. 8), а также графики зависимости средней по площади вихревых структур ТКЭ от диаметра канавок и углового шага между ними (рис. 9). Как видно из рис. 8, при диаметре канавок 3 мм распределение ТКЭ схоже с таковым в базовом случае, при этом средняя ТКЭ также совпадает с базовой конфигурацией. При диаметре канавок 3 мм и шаге 2° средняя ТКЭ ниже на 7 %, однако на рис. 8 видно, что для данной модели вентилятора несколько больше масштаб вихревых структур, в частности, имеется значительный вихревой валик на выходной кромке. В случае канавок с диаметром 6 мм для шагов 4° и 6° можно увидеть небольшое снижение средней ТКЭ (на 5 и 10 % соответственно), однако виден немного больший в сравнении с базовым масштаб вихревых структур. При диаметре канавок 9 мм при всех значениях углового шага наблюдаются более крупные в сравнении с базовым

случае вихревые структуры, имеющие, к тому же, ТКЭ в 2,7 раз больше. Это говорит о том, что при больших диаметрах канавки дополнительно турбулизируют поток, вследствие чего снижается эффективность вентилятора.

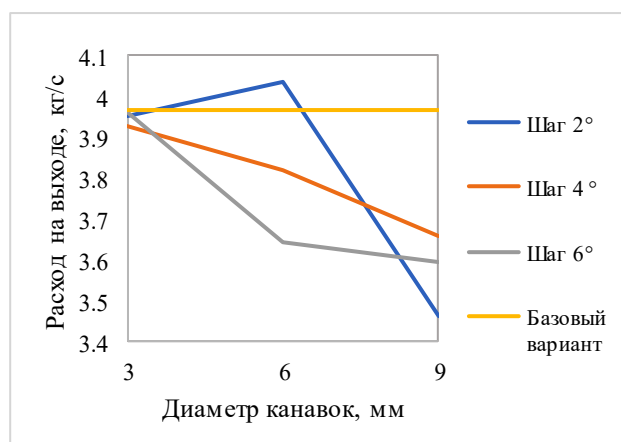


Рис. 6. Зависимость расхода воздуха на выходе из диффузора от диаметра канавок и углового шага их размещения

Fig. 6. Dependence of air flow at the diffuser outlet on the diameter of the grooves and the angular pitch of their placement

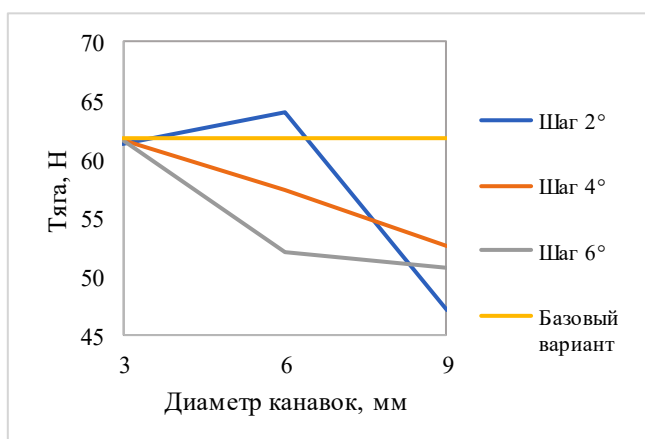


Рис. 7. Зависимость создаваемой вентилятором тяги от диаметра канавок и углового шага их размещения

Fig. 7. Dependence of the draft created by the fan on the diameter of the grooves and the angular pitch of their placement

Выявленный ранее оптимальный вариант с диаметром канавок 6 мм и шагом 2° имеет наименьшую среди рассмотренных конфигураций среднюю ТКЭ (меньше базовой на 15 %), а также небольшой масштаб вихревых структур. Снижение интенсивности турбулентности можно объяснить формированием маломасштабных, но имеющих достаточную энергию, парных вихревых жгутов в канавках, под воздействием которых, ввиду создаваемого ими разрежения, поток прижимается к стенке, что снижает интенсивность вихрей на удалении от стенки. Однако данная гипотеза требует экспериментального подтверждения.

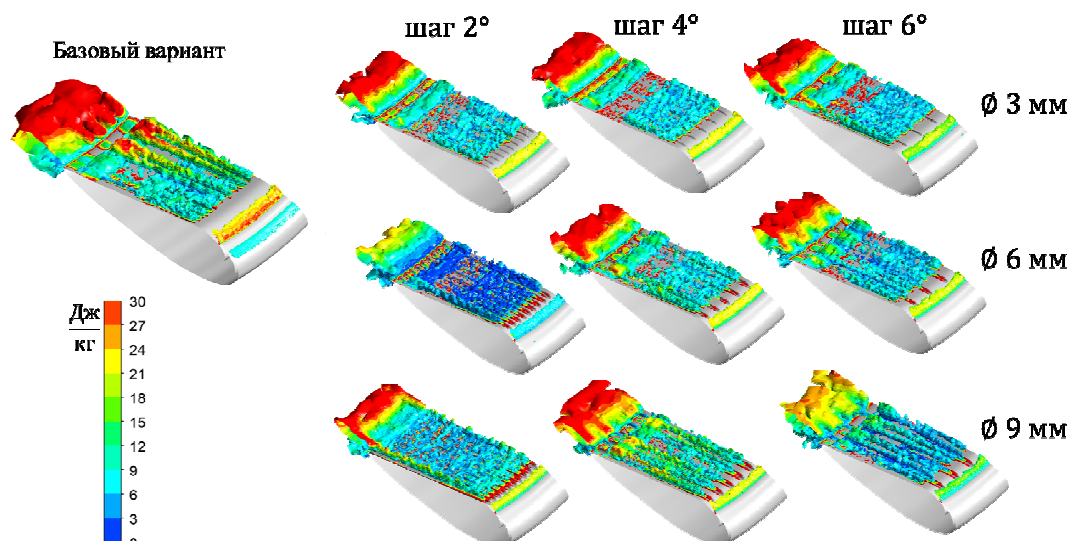


Рис. 8. Визуализация вихревых структур и распределения ТКЭ при течении воздуха в моделях вентиляторов

Fig. 8. Visualization of vortex structures and TKE distribution during air flow in fan models

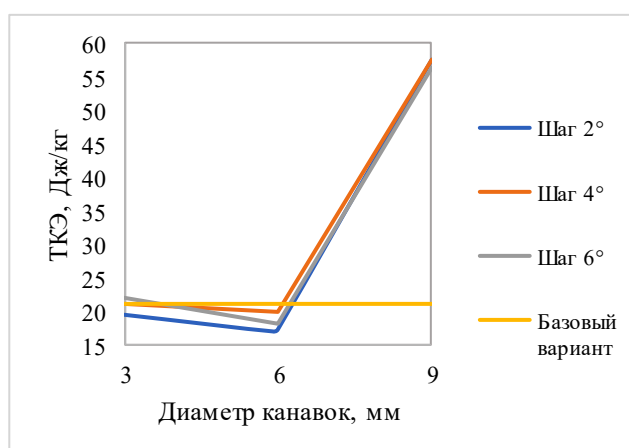


Рис. 9. Зависимость средней по площади поверхности вихревых структур ТКЭ от диаметра канавок и углового шага их размещения

Fig. 9. Dependence of the average surface area of the vortex structures of the TKE on the diameter of the grooves and the angular pitch of their placement

Заключение

В рамках данной работы была проведена оптимизация диаметра и углового шага установки цилиндрических канавок, нанесенных на стенки диффузора безлопастного вентилятора. Установлено, что наибольший расход имеет конфигурация с диаметром канавок 6 мм и шагом 2°, при ее использовании обеспечивается небольшое повышения эффективности: увеличение расхода на 2 % и тяги на 4 % выше в сравнении с базовой геометрией вентилятора. Повышение эффективности обеспечивается за счет уменьшения интенсивности и масштаба вихревых структур, чего не наблюдается при анализе других конфигураций.

Одной из потенциальных областей применения результатов исследования является создание перспективных двигательных установок для малых летательных аппаратов, использующих безлопастные вентиляторы в качестве движителей.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта «Разработка технических решений, обеспечивающих повышение эффективности авиационных газотурбинных двигателей» при поддержке гранта Национального исследовательского университета «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024–2026 гг.

Acknowledgment. The work was conducted within the project “Development of technical solutions to improve the efficiency of aircraft gas turbine engines” with the support of a grant from the National Research University “MPEI” for the scientific research program “Priority 2030: Technologies of the Future” in 2024–2026.

Библиографические ссылки

1. Numerical investigation of geometric parameter effects on the aerodynamic performance of a Bladeless fan / M. Jafari, H. Afshin, B. Farhanieh et al. // Alexandria Engineering Journal. 2016. Vol. 55, No. 1. P. 223–233. DOI: 10.1016/j.aej.2015.11.001.
2. Jetoptera J-2000 (concept design) [Электронный ресурс]. URL: <https://evtol.news/jetoptera-j2000> (дата обращения: 12.08.2025).
3. Design study of a rotorless Unmanned Aerial Vehicle / H. Xu, L. Jiang, Z. Cao et al. // 2023 4th International Seminar on Artificial Intelligence, Networking and Information Technology (AINIT) 2023 4th International Seminar on Artificial Intelligence, Networking and Information Technology (AINIT), Nanjing, China, 2023. P. 58–62.
4. Improving Safety: Design and Development of a Bladeless Thruster for Autonomous Multicopters / D. Valdenegro, A. Capunay, D. Gonzalez et al. // 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS) 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Dallas, USA, 2018. P. 158–167.
5. Пат. US20190127065A1 United States, ^{МПК} B64C39/024. Bladeless unmanned aerial vehicle: N US16007854 / A. Capunay et al. ; заявл. 13.06.2018 ; опубл. 02.05.2019.
6. Пат. US20200086988A1 United States, ^{МПК} B64C39/024. Aerial vehicles with bladeless propellers: N US16493847 / S. K. Chintala, S. Rasakatla ; заявл. 13.03.2018 ; опубл. 19.03.2020.
7. Ravi D., Rajagopal T. K. R. Numerical Investigation on the Effect of Geometric Shape and Outlet Angle of a Bladeless Fan for Flow Optimization using CFD Techniques // International Journal of Thermofluids. 2022. Vol. 15. P. 100174. DOI: 10.1016/j.ijft.2022.100174.
8. Numerical analysis of bladeless ceiling fan: An effective alternative to conventional ceiling fan / K. Mehmood, A. Shahzad, J. Masud et al. // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2022. Vol. 221. P. 104905. DOI: 10.1016/j.jweia.2022.104905.
9. Design and CFD Analysis of Bladeless Ceiling Fan / H. Aslam, M. Z. Arif, M. Ali et al. // 2021 International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technologies (IBCAST), Bhurban, Pakistan, 2021. P. 782–787.
10. Numerical Aerodynamic Evaluation and Noise Investigation of a Bladeless Fan / M. Jafari et al. // Journal of Applied Fluid Mechanics. 2015. Vol. 8, No. 1. P. 134–142. DOI: 10.36884/jafm.8.01.21872.
11. Influence of Coanda surface curvature on performance of bladeless fan / G. Li, Y. Hu, Y. Jin et al. // Journal of Thermal Science. 2014. Vol. 23, No. 5. P. 422–431. DOI: 10.1007/s11630-014-0725-3.
12. Determination of Optimum Outlet Slit Thickness and Outlet Angle for the Bladeless Fan Using the CFD Approach / V. Joshi, W. Noronha et al. // Energies. 2023. Vol. 16. No. 4. DOI: 10.3390/en16041633.
13. Parametric Study of a Bladeless Fan Geometry: Investigating the Influence of Geometry Parameters on Discharge Ratio and Thrust Force. Parametric Study of a Bladeless Fan Geometry [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/abs/2406.03305> (дата обращения: 12.08.2025).
14. Исследование характеристик «безлопаточных» вентиляторов применительно к двигателям беспилотных летательных аппаратов / П. А. Брызгунов, В. А. Григоров, Л. Е. Гришин и др. // Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение». 2025. № 2 (9). С. 86–93.

15. Stolt A. J., Ullah A. H., Estevadeordal J. Study of Leading-Edge Dimple Effects on Airfoil Flow Using Tomographic PIV and Temperature Sensitive Paint // *Fluids*, 2019. Vol. 4, No. 4. DOI: 10.3390/fluids4040184.
16. Numerical Study on the Influence of Transverse Grooves on the Aerodynamic Performance of Micro Air Vehicles Airfoils / Z. Li, Y. Zuo, H. Zhang et al. // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. DOI: 10.3390/app132212371.
17. Chamorro L. P., Arndt R. E. A., Sotiropoulos F. Drag reduction of large wind turbine blades through riblets: Evaluation of riblet geometry and application strategies // *Renewable Energy*. 2013. Vol. 50. P. 1095–1105.
18. Пат. CA2698490C Canada, ^{МПК} F04D29/44 A fan: N CA2698490A / P. D. Gammack, F. Nicolas, K. J. Simmonds ; заявл. 26.08.2008 ; опубл. 12.07.2016.
19. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // *AIAA Journal*. 1994. Vol. 32, No. 8. P. 1598–1605.

References

1. Jafari M., Afshin H., Farhanieh B., Sojoudi A. Numerical investigation of geometric parameter effects on the aerodynamic performance of a Bladeless fan. *Alexandria Engineering Journal*. 2016, Vol. 55, No. 1, P. 223–233. DOI: 10.1016/j.aej.2015.11.001.
2. Jetoptera J-2000 (concept design). Available at: <https://evtol.news/jetoptera-j2000> (accessed 01.02.2011).
3. Xu H., Jiang L., Cao Z., Bao X. Design study of a rotorless Unmanned Aerial Vehicle. *2023 4th International Seminar on Artificial Intelligence, Networking and Information Technology (AINIT) 2023 4th International Seminar on Artificial Intelligence*, Nanjing, China, 2023. P. 58–62.
4. Valdenegro D., Capunay A., Gonzalez D., Carrillo L. R. G., Rangel P. Improving Safety: Design and Development of a Bladeless Thruster for Autonomous Multicopters. *2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Dallas, USA, 2018. P. 158–167.
5. Capunay A. et al. *Bladeless unmanned aerial vehicle*. Patent USA, No. US20190127065A1, 2018.
6. Chintala S. K., Rasakatla S. *Aerial vehicles with bladeless propellers*. Patent USA, No. US20200086988A1, 2018.
7. Ravi D., Rajagopal T. K. R. Numerical Investigation on the Effect of Geometric Shape and Outlet Angle of a Bladeless Fan for Flow Optimization using CFD Techniques. *International Journal of Thermofluids*. 2022, Vol. 15, P. 100174. DOI: 10.1016/j.ijft.2022.100174.
8. Mehmood K., Shahzad A., Masud J., Akram F., Mumtaz M.N., Shams T.A. Numerical analysis of bladeless ceiling fan: An effective alternative to conventional ceiling fan. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2022, Vol. 221, P. 104905. DOI: 10.1016/j.jweia.2022.104905.
9. Aslam H., Arif M.Z., Ali M., Javed A. Design and CFD Analysis of Bladeless Ceiling Fan. *2021 International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technologies (IBCAST)*, Bhurban, Pakistan, 2021. P. 782–787.
10. Jafari M. et al. Numerical Aerodynamic Evaluation and Noise Investigation of a Bladeless Fan. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2015, Vol. 8, No. 1. DOI: 10.36884/jafm.8.01.21872.
11. Li G., Hu Y., Jin Y., Setoguchi T., Kim H.D. Influence of Coanda surface curvature on performance of bladeless fan. *Journal of Thermal Science*. 2014, Vol. 23, No. 5, P. 422–431. DOI: 10.1007/s11630-014-0725-3.
12. Joshi V., Noronha et al. Determination of Optimum Outlet Slit Thickness and Outlet Angle for the Bladeless Fan Using the CFD Approach. *Energies*. 2023, Vol. 16, No. 4, P. 1633. DOI: 10.3390/en16041633.
13. *Parametric Study of a Bladeless Fan Geometry: Investigating the Influence of Geometry Parameters on Discharge Ratio and Thrust Force*. Available at: <https://arxiv.org/abs/2406.03305> (accessed: 12.08.2025).

14. Bryzgunov P. A., Grigorov V. A., Grishin L. E., Ivanova E. A. [Study of the small multicopters bladeless propulsors characteristics]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Seriya "Aviatsionno-raketnoe i energeticheskoe mashinostroenie"*. 2025, Vol. 9, No. 2, P. 86–93. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-2-86-93 (In Russ.)
15. Stolt A. J., Ullah A. H., Estevadeordal J. Study of Leading-Edge Dimple Effects on Airfoil Flow Using Tomographic PIV and Temperature Sensitive Paint. *Fluids*. 2019, Vol. 4, P. 184. DOI: 10.3390/fluids4040184.
16. Li Z., Zuo Y., Zhang H., He L. et al. Numerical Study on the Influence of Transverse Grooves on the Aerodynamic Performance of Micro Air Vehicles Airfoils. *Applied Sciences*. 2023, Vol. 13. DOI: 10.3390/app132212371.
17. Chamorro L. P., Arndt R. E. A., Sotiropoulos F. Drag reduction of large wind turbine blades through riblets: Evaluation of riblet geometry and application strategies. *Renewable Energy*. 2013, Vol. 50, P. 1095–1105.
18. Gammack P. D., Nicolas F., Simmonds K. J. *A fan*. Patent Canada, No. CA2698490C C, 2016.
19. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994, Vol. 32, No. 8, P. 1598–1605.

© Брызгунов П. А., Григоров В. А., Гришин Л. Е., 2025

Брызгунов Павел Александрович – кандидат технических наук, ассистент; Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт». E-mail: bryzgunovpa@mpei.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3710-5116>.

Григоров Владислав Алексеевич – инженер; Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт». E-mail: grigorovva@mpei.ru. <https://orcid.org/0009-0009-2666-4044>.

Гришин Леонид Евгеньевич – студент; Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт». E-mail: grishinly@mpei.ru. <https://orcid.org/0009-0001-7469-2041>.

Bryzgunov Pavel Aleksandrovich – Cand. Sc., assistant lecturer; National Research University “Moscow Power Engineering Institute”. E-mail: bryzgunovpa@mpei.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3710-5116>.

Grigorov Vladislav Alekseevich – engineer; National Research University “Moscow Power Engineering Institute”. E-mail: grigorovva@mpei.ru. <https://orcid.org/0009-0009-2666-4044>.

Grishin Leonid Evgenievich – student; National Research University “Moscow Power Engineering Institute”. E-mail: grishinly@mpei.ru. <https://orcid.org/0009-0001-7469-2041>.

Статья поступила в редакцию 02.09.2025; принята к публикации 03.09.2025; опубликована 13.10.2025

The article was submitted 02.09.2025; accepted for publication 03.09.2025; published 13.10.2025

Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution 4.0
The article can be used under the Creative Commons Attribution 4.0 License