

Научная статья
УДК 629.7
URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=187574>
EDN: <https://www.elibrary.ru/RQGWSM>



Малозумный вентилятор для системы вентиляции орбитальной станции

Алексей Яковлевич Чашин^{1✉}, Кирилл Владимирович Кротов², Александр Иванович Хаустов³
^{1, 2, 3} Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Российская Федерация
¹ chashchin_mai@outlook.com[✉]
² krotovkv@ya.ru
³ sinna286@mail.ru

Аннотация. Рассматривается проблема снижения уровня шума вентиляционных систем на орбитальных станциях за счет применения вентиляторов с тороидальной формой лопастей. Приводятся результаты численного моделирования течения воздуха через элементы вентиляторов с тороидальной и стандартной формой лопастей. Установлено, что уровень шума разработанного тороидального вентилятора на 13% меньше, чем у вентилятора, эксплуатирующегося на МКС в настоящее время.

Ключевые слова: орбитальная станция, система вентиляции, тороидальный вентилятор, вычислительная газодинамика, аэродинамические характеристики, уровень звукового давления

Для цитирования: Чашин А.Я., Кротов К.В., Хаустов А.И. Малозумный вентилятор для системы вентиляции орбитальной станции // Вестник Московского авиационного института. 2026. Т. 33. № 1. С. 31-38.
URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=187574>

Original article

Low-Noise Fan for the Orbital Station Ventilation System

Aleksei Ya. Chashchin^{1✉}, Kirill V. Krotov², Aleksandr I. Khaustov³
^{1, 2, 3} Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation
¹ chashchin_mai@outlook.com[✉]
² krotovkv@ya.ru
³ sinna286@mail.ru

Abstract

The long-term practice of operating orbital stations (OS) has demonstrated that noise is one of the significant adverse factors of space flight. High-intensity aerospace noise is a common biological irritant that leads to a shift in astronauts' auditory thresholds, sleep disorders, decreased performance, and discomfort. It is known that the main contribution to the noise occurrence onboard the OS is made by the life support systems, and mainly by ventilation systems. The main sources of noise in ventilation systems are the vane fans. The main reason for this is that the determining factor in the design of fans for the ventilation and air conditioning system (HVAC) OS is their overall characteristics minimization. This leads, in turn, to the rotation speed increase and, as a result, to a

significant increase in the noise level. The OS ventilation system noise reduction on the way of its propagation by the sound insulation requires significant economic costs and leads to an increase in the spacecraft launch mass. The work is relevant due to the need for developing the low-noise fans for low-volume control systems of minimal mass and size.

The article considers the problem of the noise level reduction of ventilation systems at orbital stations by fans with toroid blade shape. An IMV fan (intermodular ventilation fan) installed in the American segment of the ISS orbital station and providing airflow between the modules is used as a fan with a standard blade shape. The AC-2 toroid fan was developed as the IMV fan modification with toroid blade shape.

To determine both aerodynamic and noise characteristics of the fans, mathematical modeling of airflow in IMV and AC-2 fan models was performed with the ANSYS FLUENT software package. The Scale Adaptive Simulation (SAS) model integrated into the software package was used to simulate the turbulent flow. The aerodynamic noise of the fans was being computed at a distance of 1 meter from the fan outlet section after reaching 6 fan revolutions. Computing was being performed at the same values of the total pressure, flow rate and rotational speed. The Fox-Williams-Hawkings acoustic analogy was used for the noise computing. Computational results allowed plotting curves of the flow-pressure and noise characteristics of the fans. The fan noise frequency characteristics were obtained by the fast Fourier transform. It was found that the developed toroid fan, as an IMV fan analog, allows achieving the sound pressure reduction over the entire frequency range. The final noise reduction was 13%.

Keywords: orbital station, ventilation system, toric fan, computational gas-dynamics, aerodynamic characteristics, sound pressure level

For citation: Chashchin A. Ya., Krotov K. V., Khaustov A. I. Low-Noise Fan for the Orbital Station Ventilation System. *Aerospace MAI Journal*. 2026;33(1):31-38. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=187574>

List of Figures

- Fig. 1. The IMV fan in the American segment of the ISS [13]
- Fig. 2. The IMV fan prototype model
- Fig. 3. The developed AC-2 toroid fan model
- Fig. 4. Grid model of the IMV fan flow part
- Fig. 5. Grid model of the of the AC-2 fan flow part
- Fig. 6. Fans' aerodynamic characteristics
- Fig. 7. Speeds distribution in the IMV fan flow part
- Fig. 8. Speeds distribution in the AC-2 fan flow part
- Fig. 9. Total pressure distribution in the IMV fan flow part
- Fig. 10. Total pressure distribution in the AC-2 fan flow part
- Fig. 11. The $p_r(t)$ acoustic pressure variation
- Fig. 12. The fans noise characteristics

Введение

Важнейшей задачей космической биологии и медицины является создание безопасных условий труда экипажей пилотируемых космических аппаратов благодаря уменьшению негативного влияния факторов космического полета на организм космонавтов. Многолетняя практика эксплуатации орбитальных станций (ОС) продемонстрировала, что одним из значимых неблагоприятных факторов космического полета является шум [1]. Исследования, проведенные на Международной космической станции (МКС), показали, что шум на орбитальных станциях на 10–15 дБА превышает предельно допустимые уровни, установленные ГОСТ Р 50804-95. Средний уровень шума в рабочих отсеках МКС колеблется от 62 до 74 дБА, а средний уровень воздействия шума в условиях сна – от 54 до 62 дБА [2, 3]. Данные исследований также показали, что уровни шума

зависят от деятельности и задач, выполняемых членом экипажа.

Особенностью шума на МКС является доминирование в шумовом спектре низкочастотного шума, вызванного работой различных систем и оборудования. Низкочастотный шум оценивается как значительно более раздражающий, чем широкополосный шум, при сопоставимых уровнях звукового давления. Доказано, что такой шум оказывает неблагоприятное воздействие практически на все органы (дыхание, слух, зрение) и системы человека (центральная и вегетативная нервная и др.) и может стать причиной профессиональных заболеваний (нейросенсорной тугоухости, вестибулопатии, вегетативных нарушений и др.) [4, 5]. Частота шума и его интенсивность являются определяющими параметрами при формировании ответной реакции в организме человека. Взаимодействие низкочастотных акустических колебаний

с анатомическими структурами человека вызывает такие физические эффекты в тканях и органах человека, как дифракция, резонанс и др., что приводит к анатомическим повреждениям тканей, активации рецепторов (механо-, вестибулорецепторов и др.). Научные исследования показали, что шум оказывает физиологическое воздействие, такое как нарушение нормального цикла сна (удлинение времени засыпания, сокращение продолжительности глубокой и быстрой фазы сна, дневная усталость, бессонница и т. д.), а также последствия на следующий день (чрезмерная дневная сонливость, утомляемость, снижение производительности труда, а также риск несчастных случаев и т. д.). Симпатическая нервная система (вегетативное возбуждение) активируется в пределах 45–55 дБА, а порог пробуждения составляет около 60 дБА, что соответствует уровню шума, с которым сталкиваются члены экипажа МКС. Посменная работа также является фактором риска нарушения сна и других последствий для здоровья. Крупнейшие промышленные катастрофы, такие как катастрофы на Три-Майл-Айленде, в Бхопале, Чернобыле и на Exxon Valdez, произошли во время ночной смены. В качестве основных факторов, способствовавших каждому инциденту, названы: график работы, усталость и сонливость [6]. Таким образом, уменьшение уровня шума является определяющим требованием при проектировании систем жизнеобеспечения любой космической станции. Известно, что основной вклад в возникновение шума на борту ОС вносят системы вентиляции (СВ), в которых главными источниками шума являются лопастные вентиляторы [7, 8], поэтому постоянно ведутся исследования, направленные на уменьшение уровня шума вентиляторов [9].

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки малошумных вентиляторов для СВ ОС минимальных массогабаритных размеров. Новизна работы заключается в разработке малошумного вентилятора с тороидальной формой лопастей, который можно будет установить в систему вентиляции ОС [10]. Такая форма лопастей реализована лишь в открытых аэро- и гидродинамических системах – пропеллерах БПЛА и винтах морских судов [11, 12]. Сведений о применении тороидального вентилятора в закрытых системах, каковой и является система вентиляции ОС, не найдено.

Методы

За основу для разработки нового тороидального вентилятора взята система межмодульной вентиляции (СМВ) американского сегмента МКС, обеспечивающая течение потоков воздуха между

модулями сегмента МКС [13]. В СМВ установлен осевой вентилятор IMV (рис. 1), имеющий лопасти стандартной формы, приводимый во вращение электродвигателем, который монтируется к вентиляционным трубопроводам. Параметры рабочей точки вентилятора IMV при частоте вращения $n = 8500$ об/мин: подача $Q = 235$ м³/ч; повышение давления $\Delta p = 250$ Па.

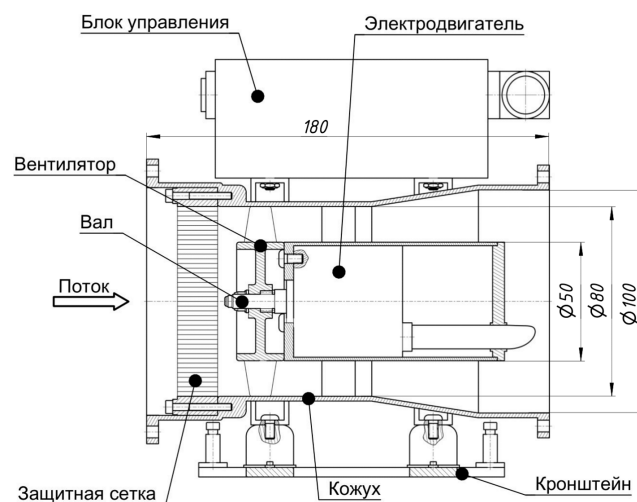


Рис. 1. Вентилятор IMV в американском сегменте МКС [13]

На основе имеющихся сведений о проточной части вентилятора IMV, с использованием программных средств для интерактивного проектирования лопастных машин, разработана модель прототипа вентилятора IMV (рис. 2).

В качестве аналога вентилятора IMV авторами спроектирован тороидальный вентилятор, разработана его 3D-модель и методом прототипирования изготовлен вентилятор АЧ-2, имеющий лопасти тороидальной формы (рис. 3). Вентиляторы имеют одинаковые геометрические размеры и могут быть установлены в действующую на МКС систему межмодульной вентиляции.

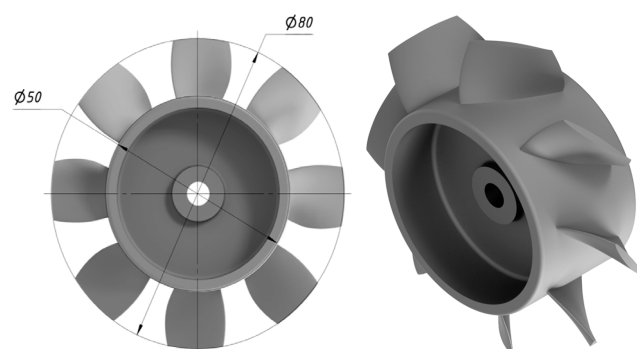


Рис. 2. Модель прототипа вентилятора IMV

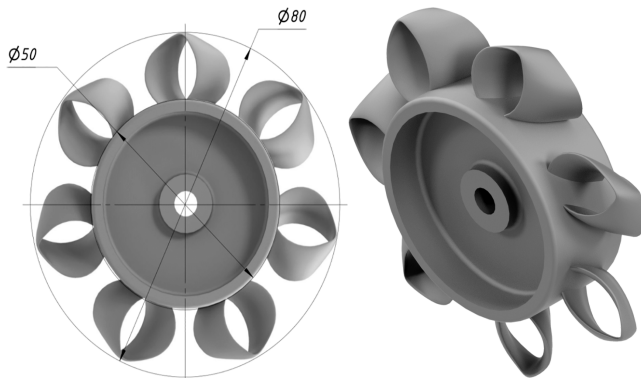


Рис. 3. Модель разработанного тороидального вентилятора АЧ-2

Решение аэродинамической задачи основывается на решении системы дифференциальных уравнений сохранения массы, количества движений, энергии и состояния [14, 15].

Для решения этих уравнений и определения шумовых характеристик вентиляторов проведено математическое моделирование течения воздуха в моделях вентиляторов IMV и АЧ-2 с использованием программного пакета Ansys Fluent [16], который применяется для решения гидродинамических задач, в том числе и задач аэроакустики [17]. Для решения системы уравнений Ansys использует метод конечных объемов (МКО). МКО является сеточным методом, поэтому для моделирования работы IMV и АЧ-2 созданы неструктурированные полиэдрические сетки с количеством ячеек $\sim 2,5 \cdot 10^6$ (рис. 4 и 5). Для учета вращения использовалась технология подвижных сеток, реализованная в программном обеспечении.

С целью «замыкания» системы дифференциальных уравнений для турбулентной вязкости использована модель масштабируемого адаптивного моделирования $k-\omega$ SST SAS. Эта модель успешно применяется на практике для выбора воздухозаборника силовой установки, моделирования характе-

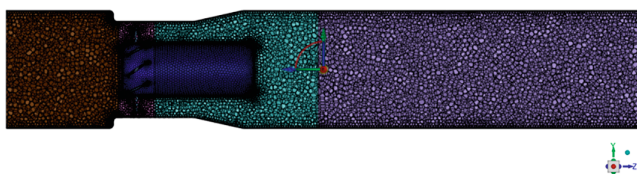


Рис. 4. Сеточная модель проточной части вентилятора IMV

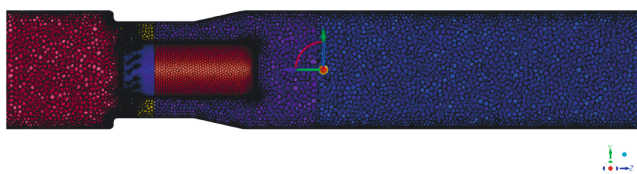


Рис. 5. Сеточная модель проточной части вентилятора АЧ-2

ристик кольцевых сопел, определения шумовых характеристик лопастных машин [18–21]. Таким образом, выполнена настройка и подготовка модели для расчета в программе Ansys Fluent.

На первом этапе расчета определены аэродинамические характеристики вентиляторов. Выходными параметрами являлись значения полного давления на входе и на выходе вентилятора, которые вычислялись с помощью поверхностного интеграла посредством осреднения значения полного давления по потоку [22, 23]:

$$\frac{\int \bar{p}^* \rho(\bar{W}, \bar{n}) dA}{\int \rho(\bar{W}, \bar{n}) dA} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i^* \rho_i(\bar{W}_i, \bar{n}_i) A_i}{\sum_{i=1}^n \rho_i(\bar{W}_i, \bar{n}_i) A_i}, \quad (1)$$

где \bar{p}^* – осредненное значение полного давления на поверхности; p_i^* – значение полного давления на i -й ячейке поверхности; A – площадь поверхности; \bar{n} – нормаль к поверхности A ; \bar{W} – скорость потока; \bar{W}_i – скорость потока на i -й ячейке поверхности; A_i – площадь поверхности i -й ячейки; \bar{n}_i – нормаль к поверхности A_i .

Изменение полного давления Δp , которое создавалось вентилятором, вычислялось как

$$\Delta p = \bar{p}_{\text{вых}}^* - \bar{p}_{\text{вх}}^*, \quad (2)$$

где $\bar{p}_{\text{вых}}^*$, $\bar{p}_{\text{вх}}^*$ – полное давление на выходе и входе вентилятора.

На втором этапе расчета определены шумовые характеристики вентиляторов с использованием акустической аналогии Фокса Вильямса–Хоукинга, которая описывает распространение звуковых волн в аэродинамической системе. Расчет проводился на нестационарном режиме моделирования с шагом по времени равным $6,25 \cdot 10^{-5}$ с. Данные обработаны с помощью быстрого (дискретного) преобразования Фурье (англ. *Fast Fourier transform*) для получения спектральной составляющей шума вентиляторов [16]:

$$p_f = \sum_{n=1}^{N-1} p_n e^{-\frac{2\pi i f n}{N}}, \quad f=1, 2, \dots (N-1), \quad (3)$$

где p_f – акустическое давление на частоте f ; p_n – значение акустического давления в момент времени t .

Уровень звукового давления L_i на i -й частоте рассчитан как [24]:

$$L_i = 10 \lg \left(\frac{p_f^2}{p_0^2} \right), \quad (4)$$

где $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Эквивалентный уровень шума L_A , откорректированный по шкале А, определялся по уравнению [24]:

$$L_A = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{0,1(L_i+k_i)} \right), \quad (5)$$

где k_i — частотная коррекция по шкале А, взятая по ГОСТ 31295.2-2005.

При сравнении уровня шума вентиляторов использовался параметр относительного снижения уровня шума:

$$L_{\%} = \left(1 - \frac{L_A^{AЧ-2}}{L_A^{IMV}} \right) \cdot 100\%, \quad (6)$$

где $L_A^{AЧ-2}$ — эквивалентный уровень шума вентилятора АЧ-2; L_A^{IMV} — эквивалентный уровень шума вентилятора IMV.

Результаты

Аэродинамические характеристики вентиляторов представлены на рис. 6, из которого видно, что вентилятор IMV развивает более высокие значения повышения давления на малых расходах в сравнении с тороидальным колесом АЧ-2 (максимальное давление IMV составляет 420 Па, а АЧ-2 — 300 Па). С другой стороны, вентилятор АЧ-2 работает в более широком диапазоне расходов, чем IMV (диапазон рабочих расходов АЧ-2 составляет 160–280 м³/ч, тогда как у IMV он составляет 160–320 м³/ч), что очень важно для систем вентиляции МКС, так как работа вентиляторов регулируется в широком диапазоне изменения его расхода в зависимости от режимов работы оборудования и систем жизнеобеспечения МКС.

На рис. 7–10 представлены распределения скоростей и полных давлений при работе вентиляторов в рабочей точке в проточных частях вентиляторов.

В проточной части и выходном сечении вентилятора АЧ-2 распределение скоростей и давлений более равномерное, чем у вентилятора IMV. Следствием этого может быть уменьшенная флюктуация

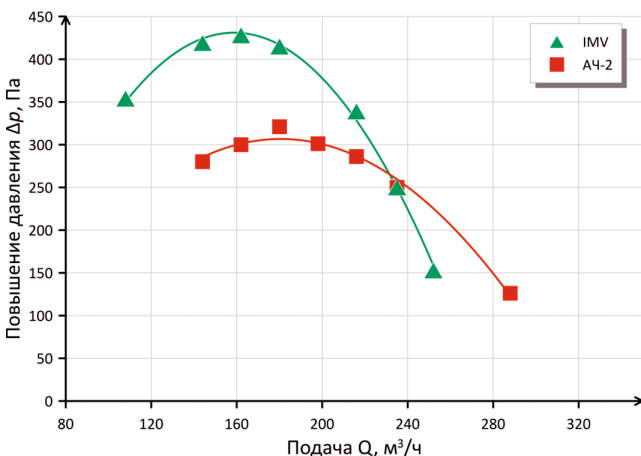


Рис. 6. Аэродинамические характеристики вентиляторов

давлений на выходе тороидального рабочего колеса, что приводит к уменьшению уровней звуковой мощности.

На рис. 11 показана зависимость акустического давления p_r от времени, полученное в результате математического моделирования вентиляторов IMV и АЧ-2. Для последующего анализа зависимость $p_r(t)$ приведена к виду $L_i(f)$ (рис. 12) посредством преобразований, описанных уравнениями (3) и (4).

На рис. 12 представлено сравнение шумовых характеристик вентиляторов IMV и АЧ-2 в рабочей точке: расход — 235 м³/ч, повышение давления — 250 Па. Шум определялся на оси трубопровода на расстоянии 1 м от выходного сечения. Как видно

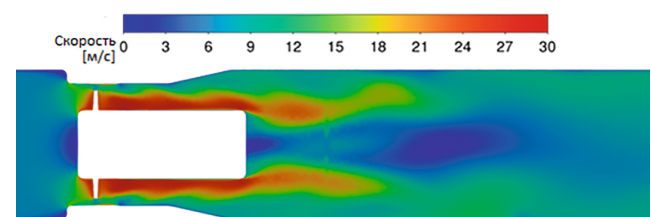


Рис. 7. Распределение скоростей в проточной части вентилятора IMV

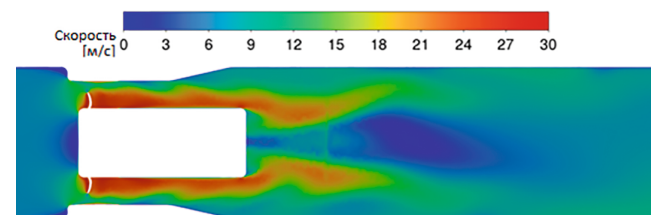


Рис. 8. Распределение скоростей в проточной части вентилятора АЧ-2

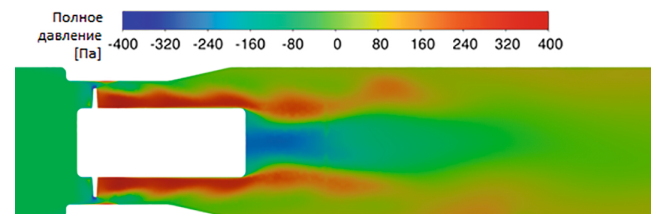


Рис. 9. Распределение полного давления в проточной части вентилятора IMV

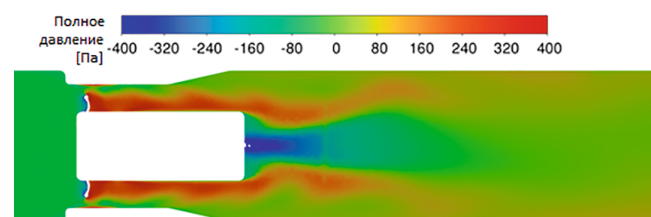


Рис. 10. Распределение полного давления в проточной части вентилятора АЧ-2

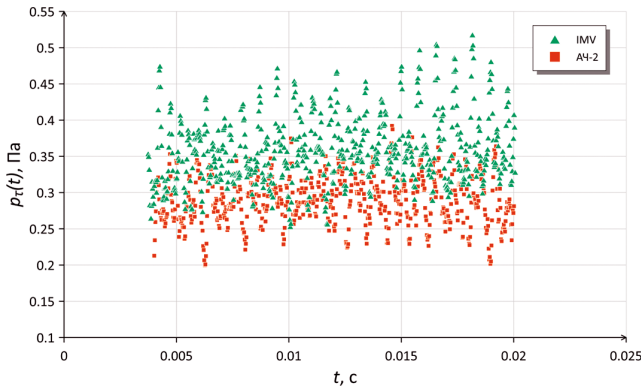


Рис. 11. Изменение акустического давления $p_{\tau}(t)$

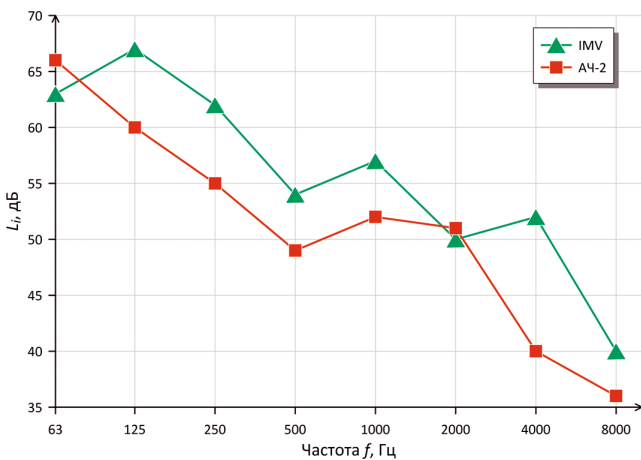


Рис. 12. Шумовые характеристики вентиляторов

из рис. 12, уровень звукового давления монотонно уменьшается при увеличении частоты, при этом уровень звукового давления вентилятора АЧ-2 ниже во всем диапазоне частот. Эквивалентный уровень шума вентилятора IMV составляет 63 дБА, тогда как для тороидального вентилятора АЧ-2 этот параметр составляет 55 дБА. Относительное снижение уровня шума (уравнение (6)) благодаря использованию тороидального вентилятора АЧ-2 составляет приблизительно 13%.

Обсуждение

Причиной возникновения шума лопаточных вентиляторов являются колебания давления на поверхности лопастей. В вентиляторах классической формы лопасти располагаются консольно, при этом колебания давления воздуха имеют наибольшую амплитуду и частоту на концевой части (периферии), что приводит к повышению уровня шума на средних частотах (от 250 до 8000 Гц) [8]. В тороидальном вентиляторе лопасти образуют замкнутую неконсольную поверхность [10]. За счет жесткости лопастей у вентилятора отсутствует как таковая концевая часть, а флюктуация давления воздуха

при этом равномерно распределяется по всей высоте аэродинамического профиля, уменьшая тем самым уровни звукового давления.

Выводы

Анализ публикаций показал, что шум на орбитальной станции остается одним из значимых неблагоприятных факторов, действующих на космонавтов в космическом полете. При этом уровень шума превышает допустимые уровни в среднем на 10–15 дБА, а в критически возможных случаях, например при избыточном тепловыделении от приборов или систем жизнеобеспечения, может превышать его на 25 дБА. В настоящее время реализованы практически все возможные методы уменьшения уровня шума от систем вентиляции, а для дальнейшего его уменьшения требуется увеличение стартовой массы шумоизоляции. Поэтому разработка малошумных вентиляторов является актуальной задачей ввиду необходимости снижения неблагоприятного влияния шума на экипаж.

Численные методы, использованные в работе, позволяют с высокой точностью и достоверностью определять уровень шума, вызванного работой вентиляторов: расчетные значения уровня шума, вызванного вентилятором, отличаются от уровня шума, измеренного датчиками звукового давления на МКС, в пределах от +5,7% до –7,9%.

Разработанный тороидальный вентилятор как прототип вентилятора IMV, установленного в системе вентиляции американского сегмента МКС, показал снижение уровня шума во всем диапазоне частотной характеристики до 13%, что позволит не превышать допустимый уровень звукового давления в сегментах орбитальной станции.

Список источников

1. Богатова Р.И., Агуреев А.Н., Волков А.А. и др. Проблема шума в пилотируемых космических аппаратах // Космическая биология и авиакосмическая медицина: Сборник тезисов докладов XI Конференции (22–26 июня 1998; Москва). М.: Слово, 1998. С. 199.
2. Limardo J.G., Allen C.S., Danielson R.W. Status: Crewmember Noise Exposures on the International Space Station // 45th International Conference on Environmental Systems (12–16 July 2015; Bellevue, Washington). ICES-2015-239.
3. Allen C.S. International Space Station Acoustics – A Status Report // 53rd International Conference on Environmental Systems (21–25 July 2024; Louisville, Kentucky). ICES-2024-354.
4. Иванов Н.И., Зинкин В.Н., Сливина Л.П. Биомеханические механизмы действия низкочастотных акустических колебаний на человека // Российский журнал

- биомеханики. 2020. Т. 24. № 2. С. 216–231. DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2020.2.09
5. Васильева И. Н., Беспалов В.Г., Зинкин В.Н. Низкочастотный шум как вредный фактор, повышающий частоту хромосомных aberrаций и усиливающий клеточную гибель // Медицина труда и промышленная экология. 2017. № 3. С. 23–26.
 6. Williamson A., Lombardi D.A., Folkard S., et al. The link between fatigue and safety // Accident Analysis and Prevention. 2011. Vol. 43. No. 2, p. 498–515. DOI: 10.1016/j.aap.2009.11.011
 7. Баженова Л.А. Источники шума аэродинамического происхождения в воздушных машинах // Акустический журнал. 2018. Т. 64. № 3. С. 369–378. DOI: 10.7868/S0320791918030024
 8. Гусев В.П., Лешко М.Ю., Пестерева М.Ю. Генерация аэродинамического шума в элементах систем вентиляции // АВОК. 2006. № 3. С. 10–22.
 9. Разработаны малошумные вентиляторы для МКС, https://zoom.cnews.ru/rnd/news/line/razrabotany_maloshumnye_ventilyatory_dlya_mks
 10. Хаустов А.И., Кротов К.В., Чащин А.Я. Применение тороидальных вентиляторов как способ снижения шума вентиляционных систем на орбитальных станциях // 23 Международная конференция «Авиация и космонавтика» (18–22 ноября 2024; Москва): Сборник тезисов докладов. М.: Изд-во «Перо», 2024. С. 224–225.
 11. Кокорев А.Д. Разработка и исследование тороидальной формы винта для БПЛА // Наука настоящего и будущего. 2023. Т. 2. С. 30–33.
 12. Месропян А.В., Шабельник Ю.А. К вопросу об эффективности рабочего процесса петлевидных гребных винтов // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7. № 2. С. 15–21. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-2-15-21
 13. Wieland P.O. Living Together in Space: The Design and Operation of the Life Support System on the International Space Station. NASA Report NASA/TM-1998-206956-Vol-1.
 14. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Физматлит, 1994. 441 с.
 15. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: в 2 т. / Пер. с англ. С.В. Сенина, Е.Ю. Шальмана; Под ред. Г.Л. Подвидза. М.: Мир, 1990. 727 с.
 16. ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide, https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm
 17. Cortez D., de Souza Papini G. NACA 0012 Aeroacoustic Study Using ANSYS Fluent // In: Iano Y., Saotome O., Kemper Vásquez G.L., et al. Smart Innovation, Systems and Technologies. Vol 295 Proceedings of the 7th Brazilian Technology Symposium (BTSym'21). Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-08545-1_9
 18. Новгородцев Е.В., Кажан В.Г., Колтоков Н.Г. и др. Расчетные исследования по выбору воздухозаборника силовой установки, размещенной в корневой части крыла магистрального самолета // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 4. С. 7–18. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177602>
 19. Сабирзянов А.Н., Ахметзянов А.С., Коновалов Р.Д. Численное моделирование газодинамической составляющей коэффициента расхода кольцевых сопел с прямым критическим сечением // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 3. С. 147–154.
 20. Proskurov S., Lummer M., Delfs J.W., et al. Installed Fan Noise Simulation of a Supersonic Business Aircraft // Aerospace. 2023. Vol. 10. No. 9, pp. 773. DOI: 10.3390/aerospace10090773
 21. Bacci D., Saddington A.J. Influence of Door-Gap on Aeroacoustics and Structural Response of a Cavity // American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal. 2024. Vol. 62. No. 3, pp. 1021–1036. DOI: 10.2514/1.J063534
 22. Theory for the Rotating Machinery Interfaces. URL: https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.cfd/cfd Ug fluidflow_single.06.104.html
 23. Пятунин К.Р., Архарова Н.В., Ремизов А.Е. Опыт моделирования шума вентиляторов авиационных двигателей методом граничных элементов // Акустический журнал. 2016. Т. 62. № 4. С. 493–502. DOI: 10.7868/S0320791916040158
 24. ГОСТ ISO 3744-2024. Акустика. Определение уровней звуковой мощности и звуковой энергии источников шума по звуковому давлению. М.: Российский институт стандартизации, 2024. 70 с.

References

1. Bogatova RI, Agureev AN, Volkov AA, et al. The problem of noise in manned spacecraft. *Materialy XI Konferentsii "Kosmicheskaya biologiya i aviakosmicheskaya meditsina"* (June 22–26, 1998; Moscow). Moscow: Slovo; 1998. p. 199. (In Russ.).
2. Limardo JG, Allen CS, Danielson RW. Status: Crewmember Noise Exposures on the International Space Station. *45th International Conference on Environmental Systems (July 12–16, 2015; Bellevue, Washington)*. ICES-2015-239.
3. Allen CS. International Space Station Acoustics – A Status Report. *53rd International Conference on Environmental Systems (July 21–25, 2024; Louisville, Kentucky)*. ICES-2024-354.
4. Ivanov NI, Zinkin VN, Slivina LP. Biomechanical mechanisms of action of low-frequency acoustic vibrations on a person. *Russian Journal of Biomechanics*. 2020;24(2):216–231. (In Russ.). DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2020.2.09
5. Vasil'eva IN, Bespalov VG, Zinkin VN. Low-frequency noise as a hazard increasing occurrence of chromosomal aberrations and promoting cell death. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2017;(3):22–26. (In Russ.).

6. Williamson A, Lombardi DA, Folkard S, et al. The link between fatigue and safety. *Accident Analysis and Prevention*. 2011;43(2):498-515. DOI: 10.1016/j.aap.2009.11.011
7. Bazhenova LA. Sources of noise of aerodynamic origin in aircrafts. *Akusticheskii zhurnal*. 2018;64(3):369-378. (In Russ.). DOI: 10.7868/S0320791918030024
8. Gusev VP, Leshko MYu, Pestereva MYu. Generation of aerodynamic noise in elements of ventilation systems. *AVOK*. 2006;(3):10-22. (In Russ.).
9. *Low-noise fans have been developed for the ISS*, https://zoom.cnews.ru/rnd/news/line/razrabotany_maloshumnye_ventilyatory_dlya_mks (In Russ.).
10. Khaustov AI, Krotov KV, Chashchin AY. The use of toroidal fans as a way to reduce the noise of ventilation systems at orbital stations. *Materialy XXIII Mezhdunarodnoi konferentsii "Aviatsiya i kosmonavtika" (November 18-22, 2024; Moscow)*. Moscow: Pero; 2024. p. 224-225. (In Russ.).
11. Kokorev AD. Development and research of a toroidal screw shape for a UAV. *Nauka nastoyashchego i budushchego*. 2023;2:30-33. (In Russ.).
12. Mesropyan AV, Shabelnik JuA. The question of the efficiency of the workflow of loop propellers. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2023;7(2):15-21. (In Russ.). DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-2-15-21
13. Wieland PO. *Living Together in Space: The Design and Operation of the Life Support System on the International Space Station*. Report NASA/TM-1998-206956-Vol-1.
14. Belotserkovskii OM. *Numerical modeling in continuum mechanics*. 2nd ed. Moscow: Fizmatli; 1994. 441 p. (In Russ.).
15. Tannehill JC, Anderson DA, Pletcher RH. *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*. 2nd ed. Taylor & Francis; 1997. 816 p.
16. *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide*, https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm
17. Cortez D, de Souza Papini G. NACA 0012 Aeroacoustic Study Using ANSYS Fluent. In: Iano Y, Saotome O, Kemper Vásquez GL, et al. *Smart Innovation, Systems and Technologies. Vol. 295 Proceedings of the 7th Brazilian Technology Symposium (BTSym'21)*. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-08545-1_9
18. Novogorodtsev EV, Kazhan VG, Koltok NG, et al. Computational studies on the air intake of the power plant mounted in the mainline aircraft wing root. *Aerospace MAI Journal*. 2023;30(4):7-18. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177602>
19. Sabirzyanov AN, Akhmetzyanov AS, Kononov RD. Numerical modeling of the flow coefficient gas-dynamic component of annular nozzles with straight critical section. *Aerospace MAI Journal*. 2023;30(3):147-154. (In Russ.).
20. Proskurov S, Lummer M, Delfs JW, et al. Installed Fan Noise Simulation of a Supersonic Business Aircraft. *Aerospace*. 2023;10(9):773. DOI: 10.3390/aerospace10090773
21. Bacci D, Saddington AJ. Influence of Door-Gap on Aeroacoustics and Structural Response of a Cavity. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*. 2024;62(3):1021-1036. DOI: 10.2514/1.J063534
22. *Theory for the Rotating Machinery Interfaces*. URL: https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.cfd/cfd_ug_fluidflow_single.06.104.html
23. Pyatunin KR, Arkharova NV, Remizov AE. The experience of modeling the noise of aircraft engine fans by the boundary element method. *Akusticheskii zhurnal*. 2016;62(4):493-502. (In Russ.). DOI: 10.786X/S0320791916040158
24. *Acoustics. Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure. Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane. State Standard ISO 3744-2024*. Moscow: Rossiiskii institut standartizatsii; 2024. 70 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию / Received 06.02.2025
Одобрена после рецензирования / Revised 01.12.2025
Принята к публикации / Accepted 01.12.2025