

УДК 629.048.4:613.644

**ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМА СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ  
И ОХЛАЖДЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСЧЕТНЫХ  
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ АППАРАТНО-  
ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ**

VEHICLE VENTILATION AND COOLING SYSTEM NOISE  
STUDY USING COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL  
HARDWARE AND SOFTWARE TOOLS AND METHODS

**Шмелев А. В.<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, **Подымако М. Э.<sup>2</sup>**,  
**Хитриков С. В.<sup>1</sup>**, **Колесникович А. Н.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,  
г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ОАО «Могилевлифтмаш», г. Могилев, Республика Беларусь  
А. Shmialiou<sup>1</sup>, Ph.D. in Engineering, М. Padymaka<sup>2</sup>,  
S. Khitrikov<sup>1</sup>, A. Kalesnikovich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy  
of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Joint Stock Company Mogilevliftmash, Mogilev, Belarus

*Описаны основы формирования методических подходов совершенствования системы вентиляции и охлаждения транспортного средства с использованием расчетных и экспериментальных аппаратно-программных средств. Экспериментальные исследования включают использование метода бимформинга, реализуемого с использованием микрофонных решеток. Расчеты основаны на применении таких численных методов решения задач газодинамики, например, метода контрольных объемов и метода Фокса Уильямса-Хокингса для расчета акустических показателей аэродинамического шума, формируемого вентиляторами. Сочетание расчетных и экспериментальных подходов позволяет точно локализовать источники повышенного шума, валидировать получаемые данные и определить наиболее эффективные изменения конструкций систем.*

*The methodological bases formation for vehicle ventilation and cooling systems improvement based on computational and experimental*

*hardware and software are described. Experimental studies include the use of the beamforming technique implemented microphone array analysis. Calculations are based on the use of numerical methods for solving flow dynamics, for example, the control volume method and the Ffowcs Williams-Hawkings method for calculating the acoustic characteristics of aerodynamic noise generated by fans. The combination of computational and experimental approaches makes it possible to precisely localize sources of increased noise, validate obtained data, and determine the most effective changes in system designs.*

*Ключевые слова: транспортное средство, система вентиляции, охлаждения, шум, бимформинг, метод контрольных объемов, метод Фокса Уильямса-Хокингса.*

*Keywords: vehicle, ventilation system, cooling system, noise, beamforming, control volume method, Ffowcs Williams-Hawkings method.*

## ВВЕДЕНИЕ

Работа систем вентиляции и охлаждения транспортных средств зачастую сопровождается нежелательным излучением звуков различной интенсивности и частоты, формирующих шум. Для исключения или минимизация негативного влияния шума на организм человека нормируют его величину и длительность воздействия. Поэтому при создании данных узлов и систем машин, работа которых сопровождается повышенным шумом, разработчики стремятся определить и реализовать комплекс решений, обеспечивающих минимизацию шумового воздействия на человека и окружающую среду.

Источники шума разделяют в зависимости от особенностей формирования шума, его интенсивности и частотного состава. При этом источники с четко выраженной тональной составляющей оказывают более выраженное негативное воздействие на человека по сравнению с широкополосным шумом [1]. К таким источникам относятся системы охлаждения и вентиляции. Основными компонентами этих систем, генерирующими шум выраженной тональности, являются лопастные вентиляторы. Это касается, в том числе, радиальных вентиляторов, которые формируют аэродинамический шум с дипольным типом, характеризующимся перепадом давления на лопатках и корпусе вентилятора при их аэродинамическом взаимодействии [2]. Создаваемый таким образом шум имеет четкие то-

нальные составляющие, соответствующие лопаточной частоте вентилятора и ее гармоникам.

Современные подходы исследования шума машин и различного оборудования с целью его минимизации можно разделить на два основных. Первый это – экспериментальный, основывающийся на применении современных аппаратных средств к которым относятся микрофонные решетки и специальное программное обеспечение для обработки и анализа получаемой информации [3–5]. Второй – расчетный с использованием аппаратных, программных и методических средств численного моделирования аэродинамических процессов и анализа соответствующих акустических показателей [6–8].

Для наиболее эффективного комплексного решения прикладных задач проектирования и совершенствования систем вентиляции транспортных средств необходимо сочетание расчетных и экспериментальных методов. Следовательно, актуальной задачей исследования является формирование методических основ расчетно-экспериментальной совершенствования системы вентиляции транспортного средства по аэродинамическим и акустическим критериям.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ШУМА ВЕНТИЛЯТОРА СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ И ОХЛАЖДЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Общая схема расчетно-экспериментальных исследований приведена на рисунке 1. На начальной стадии расчетными методами и средствами, проводится поиск и определение наиболее эффективных изменений исследуемой системы. На следующей стадии данные решения проверяются экспериментальными методами и средствами. В зависимости от проводимых изменений конструкций используются стендовые испытания вентилятора, либо испытания полнокомплектного транспортного средства.

В стендовых условиях эффективно оценивается влияние изменения лопаточной системы вентилятора и конструкции его корпуса на аэродинамические и акустические характеристики. Условия проведения таких испытаний и варианты схем испытательных установок приведены в ГОСТ 10921-2017 [9]. Испытания в составе транспортного средства позволяют определить значения аэродинамических и акустических показателей, таких как нормируемые значения шума

и контролируемые эксплуатационные показатели (величина объемного расхода, температура охлаждаемых узлов и систем на определенных режимах работы). В ходе испытаний с применением микрофонных решеток на основе технологии бимформинга [3,4], имеется возможность локализации источников и зоны акустического излучения с наибольшей интенсивностью, исследования акустических путей передачи и распространения шума.

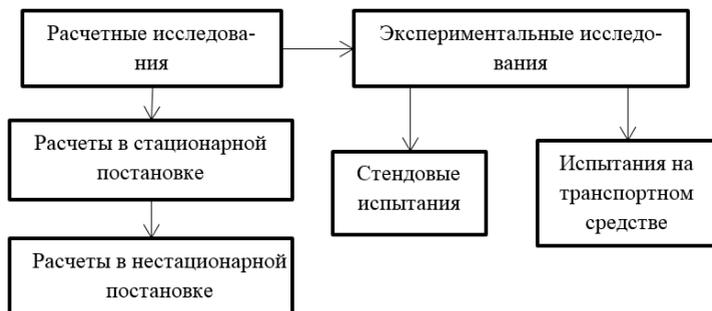


Рисунок 1 – Общая схема расчетно-экспериментальных исследований

Ключевой особенностью рассматриваемого подхода является применение программных и методических средств численного моделирования аэродинамических процессов, расчета и анализа соответствующих акустических показателей. Согласно приведенной на рисунке 1 схеме, поиск эффективных решений при доводке системы или отдельного вентилятора может проводиться в два этапа. На первом этапе расчеты проводятся в стационарной постановке, что позволяет относительно оперативно оценить характер влияния вносимых изменений на контролируемые показатели и характеристики, к которым относятся значения объемного или массового расхода воздуха в зависимости от частоты оборотов лопаточного колеса. На втором этапе выполняются нестационарные расчеты, в результате которых вычисляются как показатели расхода, так и характеристики изменения давлений во времени, необходимые для последующей оценки показателей шума.

Численные расчеты аэродинамических показателей вентиляторов выполняются с применением методов конечных элементов, конечных разностей и контрольных объемов [11]. Последний метод основан на интегрировании систем дифференциальных уравнений

в частных производных. При этом он позволяет находить решения в случаях, когда дифференциальные уравнения не имеют на всем пространстве непрерывные решения. В настоящее время этот метод получил достаточно широкое распространение и применяется в таких известных программных комплексах как ANSYS FLUENT, STAR-CCM+ и др. Для оценки акустических показателей, включая тональный шум, успешно применяется метод Фокса Уильямса-Хокинга (Ffowcs Williams-Hawkins method) [12]. Необходимый комплекс расчетных методов реализован в программном комплексе ANSYS FLUENT, что позволяет на его основе формировать систему исследований и поиска эффективных решений по совершенствованию систем охлаждения и вентиляции транспортных средств.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совершенствование систем вентиляции и охлаждения по показателям шума наиболее эффективно реализуется путем сочетания расчетных и экспериментальных методов исследований. К экспериментальным методам относятся метод исследования с помощью микрофонной решетки и метод бимформинга для обработки регистрируемых сигналов, что позволяет локализовать и определить особенности источников наибольшего шума. Численные методы расчета показателей газодинамических процессов позволяют детально исследовать влияние различных конструктивных особенностей исследуемых систем как по эксплуатационным параметрам, например, объемному расходу воздуха, его температуре так и определить необходимые характеристики излучаемого шума.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности: ГОСТ 12.1.003-2014. – Введ. 01.11.15. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 27 с.
2. Neise, W. Review of fan noise generations mechanisms and control methods / W. Neise // Fan Noise—An International INCE Symposium (CETIM) / Senlis, France, 1992. – P. 45–56.
3. Minck, O. Noise analysis using a microphone array / O. Minck, N. Binder, O. Cherrier, L. Lamotte, V. Pommier-Budinger // Fan 2012 – International Conference on Fan Noise, Technology, and Numerical

Methods, 18 April 2012 - 20 April 2012 (Senlis, France) / Senlis, France, 2012. – P. 1–8.

4. Štramberský R. Model of the Far-Field Acoustic Localisation / R. Štramberský, V. Pavelka, M. Weisz, R. Guráš // 22nd International Carpathian Control Conference / IEEE. – 2021. – P. 1–6.

5. Ballesteros, J. A. Identification and analysis of the noise sources of an engine settled in a car using array-based techniques / J. A. Ballesteros, M. D. Fernandez, E.s Sarradj, M. J. Ballesteros // International Journal of Vehicle Noise and Vibration / 2018, Vol.14 № 2. – P. 171 – 190.

6. Wei, Y. Effects of Inclined Volute Tongue Structure on the Internal Complex Flow and Aerodynamic Performance of the Multi-Blade Centrifugal Fan / Y. Wei, J.J. Wang, J. Xu, Z. Wang, J. Luo, H. Yang, Z. Zhu, W. Zhang // Journal of Applied Fluid Mechanics / 2022, Vol. No 3. – 15 p.

7. Tan, C. CFD Analysis of the Aerodynamics and Aeroacoustics of the NASA SR2 Propeller / C. Tan, S. Voo, W. L. Siau, S. Dso, J. Alderton, A. Boudjir, F. Mendonça // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2014: Power for Land, Sea and Air / Dusseldorf, 2014. – p. 1–11.

8. Darvish, M. Tonal Noise Reduction in a Radial Fan With Forward-Curved Blades / M. Darvish, B. Tietjen, D. Beck, S. Frank // Journal of Turbomachinery / 2018. – P.1–10.

9. Вентиляторы радиальные и осевые. Методы аэродинамических испытаний: ГОСТ 10921-2017 (ISO 5801:2007, NEQ). – Введ. 01.07.19. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 49 с.

10. Hald, J. Combined NAH and Beamforming using the same microphone array / J. Hald // Sound & Vibration / 2004. – P. 18–25.

11. Numerical methods in fluid mechanics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/Numerical\\_methods\\_in\\_fluid\\_mechanics](https://en.wikipedia.org/wiki/Numerical_methods_in_fluid_mechanics). – Дата доступа: 11.05.2022.

12. Li, S. / Validation of numerical prediction method of BPF noise for industrial centrifugal fans / S. Li, W. Wang, Q. Liu, X. Li // HVAC&R Research. 20 (4) / Taylor & Francis. – London, 2014. – P. 435–443.

Представлено 11.05.2022