

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 697.921.4



DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-171-178 Оригинальная статья /Original article

Анализ формирования воздушных потоков в сопловом клапане
Д.В. Абрамкина¹, А.О. Иванова¹, Д.Ф. Карпов², Х.М. Вафаева³, А.С. Воронов⁴

¹Московский государственный строительный университет,

¹129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 25, Россия,

²Вологодский государственный университет,

²160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15, Россия,

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

³195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29 литера Б, Россия,

⁴Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы,

⁴117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Россия

Резюме. Цель. Для проведения корректной оценки воздействия систем вентиляции на акустическую обстановку помещения необходимо определять длину вихревой зоны, формирующейся при прохождении воздушного потока через дросселирующие устройства. В статье рассматриваются результаты моделирования соплового клапана с изменяющимся проходным сечением в процессе его открытия и закрытия. **Метод.** Анализ сценариев формирования воздушного потока при различных положениях регулирующей диафрагмы производился с помощью метода вычислительной гидродинамики (CFD) в программном комплексе Ansys Fluent. **Результат.** При уменьшении площади проходного сечения наблюдается резкое локальное повышение скорости воздушного потока, а также формирование вихревых зон и обратных течений, возникающих вследствие эффекта эжекции. **Вывод.** Наличие сложных турбулентных потоков в вентиляционной сети приводит к повышению уровней звукового давления и шума, проникающему в обслуживаемое помещение. Выявленные значительные отклонения от максимальной рекомендуемой скорости в зависимости от сценария открытия клапана подчеркивают важность учета дросселирующих устройств при проведении акустических расчетов. Анализ длины участка стабилизации течения позволяет определить оптимальное месторасположение соплового клапана и исключить размыкание вихревой зоны при совместном взаимодействии местных сопротивлений (воздухораспределительных устройств, тройников, отводов и клапанов постоянного расхода воздуха). Для снижения риска возникновения повышенных шумов рекомендуется размещение соплового клапана на прямом участке воздуховода, длиной не менее одного калибра до и трех калибров после дросселирующего устройства.

Ключевые слова: шум, шумовые характеристики, ирисовый клапан, сопловой клапан, вихревая зона

Для цитирования: Д.В. Абрамкина, А.О. Иванова, Д.Ф. Карпов, Х.М. Вафаева, А.С. Воронов. Анализ формирования воздушных потоков в сопловом клапане. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(4):171-178. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-171-178

Analysis of air flow formation in a nozzle valve
D.V. Abramkina¹, A.O. Ivanova¹, D.F. Karpov², Kh.M. Vafaeva³, A.S. Voronov⁴

¹ Moscow State University of Civil Engineering,

¹ Yaroslavl's highway, 26, Moscow 129337, Russia,

² Vologda State University,

² 15 Lenin St., Vologda 160000, Russia,

³ Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,

³ 29 letter B Polytechnique St., Saint-Petersburg 195251, Russia,

⁴ Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba,

⁴ 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow 117198, Russia

Abstract. Objective. To accurately assess the impact of ventilation systems on the acoustic environment of a room, it is necessary to determine the length of the vortex zone that forms as the air flow passes through throttling devices. The article examines the results of modeling a nozzle valve with a variable cross-section during its opening and closing processes. **Method.** The analysis of airflow formation scenarios at various positions of the control diaphragm was performed using Computational Fluid Dynamics (CFD) in the Ansys Fluent software package. **Result.** As the cross-sectional flow area decreases, a sharp local increase in air flow velocity is observed, along with the formation of vortex zones and reverse flows resulting from the ejection effect. **Conclusion.** The presence of complex turbulent flows in the ventilation network leads to increased sound pressure levels and noise penetrating the serviced space. Significant deviations from the recommended maximum velocity, depending on the valve opening scenario, highlight the importance of considering throttling devices in acoustic calculations. Analyzing the length of the flow stabilization section enables optimal placement of the nozzle valve, preventing the vortex zone from breaking up due to the combined influence of local resistances (air distribution devices, tees, bends, and constant airflow valves). To reduce the risk of increased noise, it is recommended to position the nozzle valve on a straight duct section, with a length of at least one duct diameter before and three duct diameters after the throttling device.

Keywords: noise, noise characteristics, iris valve, nozzle valve, vortex zone

For citation: D.V. Abramkina, A.O. Ivanova, D.F. Karpov, Kh.M. Vafaeva, A.S. Voronov. Analysis of air flow formation in a nozzle valve. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(4):171-178. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-171-178

Введение. Зачастую акустические расчеты, выполненные с использованием формул из справочных материалов, оказываются недостаточно точными, что приводит к необходимости моделирования воздушных потоков, проходящих через отдельные элементы вентиляционной сети. Моделирование учитывает конструктивные особенности различных клапанов, фасонных изделий и воздухораспределительных устройств. Ирисовый клапан, используемый для регулировки расхода воздуха, отличается особой конструкцией, представляющей собой множество радиально расположенных лопастей, которые могут сжиматься или расширяться, изменяя площадь поперечного сечения воздушного потока. Размещение регулирующих лепестков под углом в виде сопла позволяет достичь более плавного регулирования воздушного потока и широко применяется в системах, требующих точного контроля параметров воздуха.

При оценке эффективности работы ирисовых клапанов специалисты сталкиваются с рядом трудностей, связанных с их аэродинамическими и акустическими характеристиками. Одной из главных проблем является корректное определение сопротивления клапана при различных степенях его открытия, что имеет решающее значение для прогнозирования его влияния на расход воздуха и перепады давления в системе. В отличие от стандартных заслонок и дроссельных устройств, ирисовые клапаны с наклонными лопатками имеют сложную геометрию, которая затрудняет расчет аэродинамических коэффициентов без использования численного моделирования или испытаний [1]. Отсутствие достоверных данных в каталогах производителей по характеристикам клапанов при различных положениях створок дополнительно усложняет процесс проектирования [2]. Паспорта и протоколы испытаний далеко не всегда содержат полные и точные сведения, что приводит к искажению представлений о технических и акустических свойствах устройства. В результате это может вызвать неправильный подбор оборудования при проектировании и возникновение шума в процессе эксплуатации.

Особое внимание следует уделить конструктивным особенностям каждого типа регулирующего устройства. Например, при акустическом расчете таких устройств, как ирисовый или сопловой клапан, можно отметить частично закрытую диафрагму, где создаются зоны турбулентности и высокоскоростные вихревые потоки. Эти явления генери-

руют аэродинамический шум, интенсивность которого зависит от степени настройки клапана. Турбулентные зоны образуются вследствие неравномерного распределения потока, а возникающие вихри усиливают шум, создавая дополнительные акустические нагрузки на систему [3, 4]. Таким образом, конструкция и положение диафрагмы или створки дросселирующего устройства существенно влияют на общую шумовую обстановку в помещении [5-7]. Можно отметить, что развитие и применение методов компьютерного моделирования для регулирующих устройств является актуальной задачей. Современные подходы вычислительной гидродинамики позволяют исследовать поведение клапанов при различных режимах работы и повысить точность расчетов. Эти методы открывают возможности для оптимизации конструкции ирисовых клапанов и их применения в системах вентиляции, что особенно важно для создания энергоэффективных и малошумных инженерных систем [8-9].

Постановка задачи. Объектом исследования являются сопловые клапаны систем вентиляции. Предмет исследования – шум, генерируемый регулируемыми устройствами в вентиляционной сети. Целью исследования является определение длины вихревой зоны и определение зависимости уровня шума от скорости воздушного потока и степени открытия клапана при помощи инструментов компьютерного моделирования.

Для достижения этой цели требуется провести моделирование воздушных потоков, проходящих через частично закрытую диафрагму клапана, и оценить параметры, влияющие на формирование аэродинамического шума.

Методы исследования. Для проведения компьютерного моделирования была разработана 3D модель соплового клапана с регулирующими лопатками (Рис. 1)

В ходе исследования были проанализированы следующие сценарии: 1 — диафрагма в положении минимального открытия (площадь поперечного сечения отверстия для прохода воздуха $f_0 = 0,001 \text{ м}^2$), 2 — диафрагма на средней степени открытия ($f_0 = 0,004 \text{ м}^2$) и 3 — полностью открытая диафрагма ($f_0 = 0,012 \text{ м}^2$).

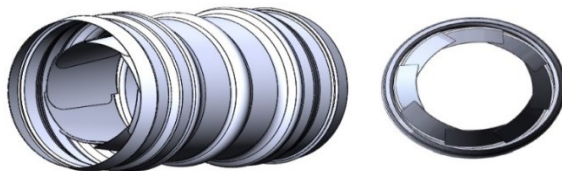


Рис. 1. Модель соплового клапана

Fig. 1. Model of ventilation nozzle damper

Математическое моделирование в данном исследовании проводится с использованием программного комплекса ANSYS Fluent. Этот комплекс позволяет выполнять анализ параметров воздушных потоков на основе метода вычислительной гидродинамики (CFD). В ANSYS Fluent моделирование воздушных потоков осуществляется с помощью численного решения уравнений Навье-Стокса, которые описывают поведение жидкости и газа [10-14].

Изначально были заданы входные параметры, такие как расход, угол открытия диафрагмы и скорость движения набегающего воздушного потока, они задаются для воспроизведения различных режимов работы соплового клапана. Пространство внутри клапана делится на сетку (домен), состоящую из небольших элементов, на которых решаются уравнения движения. Для более точного описания турбулентных зон и вихрей, возникающих при частичном открытии клапана, применяются турбулентные модели (k-ε модель), которые позволяют учитывать влияние турбулентности на поведение воздушного потока [15].

Обсуждение результатов. На основании полученных данных компьютерного моделирования можно проанализировать распределение скорости воздушного потока и уровни акустического давления при разной степени открытия клапана. Изначально были

заданы следующие условия: расход воздуха составил $60 \text{ м}^3/\text{ч}$, средняя скорость потока воздуха $1,4 \text{ м/с}$, проходное сечение клапана с диаметром 125 мм .

На рис. 2 представлены результаты моделирования скорости воздушного потока при прохождении соплового регулирующего устройства при 1 сценарии. За счет сужения поперечного сечения происходит локальное увеличение скорости воздуха, в разы превышающее рекомендуемые значения для жилых и общественных зданий согласно СП 60.13330.2020 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха».

За регулирующим устройством формируется замкнутая турбулентная зона, являющаяся источником повышенного шума. При длине прямого участка за сопловым клапаном, соответствующей трем калибрам, происходит смыкание ядра струи, последующее снижение скорости и выравнивание воздушного потока. Влияние эффекта эжекции приводит к формированию циркуляционных течений, отмеченных фиолетовым цветом на рис. 2.

Размещение фасонных элементов (тройников, отводов), клапанов постоянного расхода воздуха и воздухораспределительных устройств в пределах вихревой зоны приводит к ее размыканию и увеличению уровней звукового давления. Появление вторичных шумов вследствие формирования турбулентных завихрений в вентиляционной сети может значительно снизить эффективность работы шумоглушителей [16].

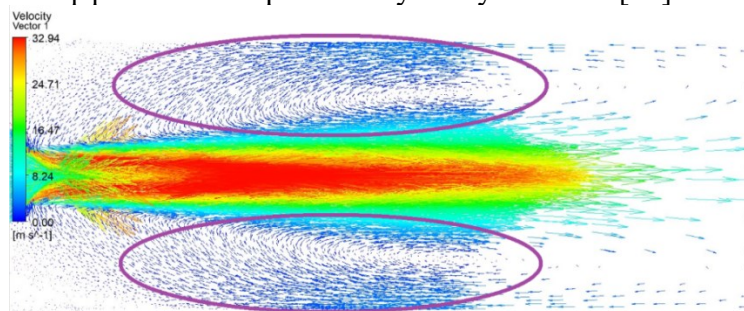


Рис. 2. Формирование воздушных потоков при минимальном открытии диафрагмы на сопловом клапане (сценарий 1)

Fig. 2. Formation of air flows with minimum opening of the diaphragm on the nozzle valve (scenario 1)

Сопловой клапан имеет разные настройки для точного регулирования потока воздуха. Сравним результаты при среднем (промежуточном) открытии диафрагмы (сценарий 2). Максимальная скорость воздушного потока за дросселирующим устройством составила $5,25 \text{ м/с}$ (рис. 3). Длина смыкания вихревой зоны также соответствует трем калибрам.

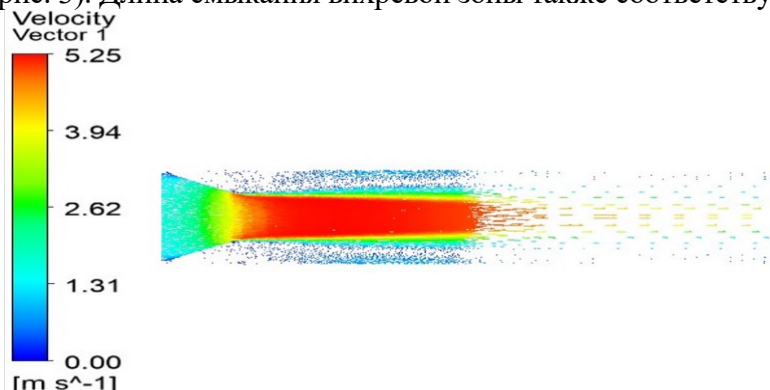


Рис. 3. Формирование воздушных потоков при среднем открытии диафрагмы на сопловом клапане (сценарий 2)

Fig. 3. Formation of air flows with medium opening diaphragm on the nozzle valve (scenario 2)

Последний вариант – полное открытие лепесткового затвора соплового клапана (рис. 4).

Аналогично предыдущим сценариям, наблюдается локальное повышение скоростей потока. Небольшие застойные зоны возникают в пристеночной области вентиляци-

онного канала, в результате срыва потока при прохождении лопаток. Отдельно стоит отметить увеличение скорости потока до соплового клапана, что может приводить к шуму в случае близкого расположения местных сопротивлений до дросселирующего устройства.

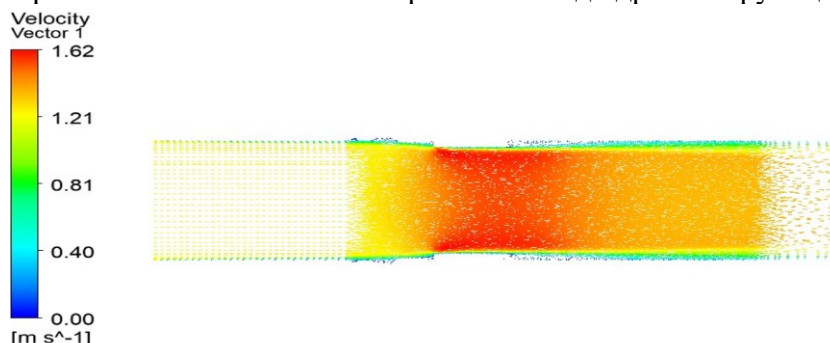


Рис. 4. Формирование воздушных потоков при полном открытии диафрагмы на сопловом клапане (сценарий 3)

Fig. 4. Formation of air flows with full opening of the diaphragm on the nozzle valve (scenario 3)

Вывод. При компьютерном моделировании воздушных потоков в сопловом клапане самым неблагоприятным сценарием являлось минимально открытая область диафрагмы (1 сценарий). При наличии сложной разветвленной вентиляционной трассы ближайшие ответвления к приточной установке попадают в особую зону риска. Именно эта часть системы будет максимально подвержена повышенному шуму, распространяющемуся от вентилятора по воздухопроводной сети.

Для осуществления аэродинамической увязки системы при проведении пуско-наладочных работ ближайшее ответвление будет характеризоваться наибольшей степенью закрытия дросселирующего устройства. Размещение воздухораспределителя в зоне стабилизации воздушного потока после соплового клапана приведет к неблагоприятной акустической обстановке в помещении.

Было выявлено, что при уменьшении проходного сечения во время закрытия створок диафрагмы при сценарии 1 и 2 разница в максимальной скорости составила 15,9 %. Среднее процентное отклонение 2 и 1 сценария равна 30,9% соответственно. Эта разница подчеркивает необходимость учета степени закрытия регулирующего устройства при проведении акустических расчетов.

Современные методы физического и математического моделирования [17-24], в том числе с использованием различных моделей турбулентности [25-27] могут обеспечить точный прогноз уровней шумового воздействия. Внедрение новых материалов и конструкций вентиляционных устройств приводит к необходимости проведения комплексных акустических исследований [28].

Библиографический список:

1. Лешко М.Ю. К вопросу шумообразования дросселирующих устройств. Вестник МГСУ. 2011. № 3. С. 82–86.
2. Lan L., Sun Y., Wyon D.P., Wargocki P. Pilot study of the effects of ventilation and ventilation noise on sleep quality in the young and elderly. Indoor air. Vol. 31 (4). DOI: 10.1111/ina.12861
3. Meira L.S., Souza F. Numerical investigation of the flow-induced noise in a turbulent flow inside an HVAC duct. 12th Spring School on Transition and Turbulence. 2020. DOI: 10.26678/ABCM.EPTT2020.EPT20-0063
4. Geyer T. F., Lucius A., Schrödter M., Schneider M., Sarraj E. Reduction of turbulence interaction noise through airfoils with perforated leading edges. Acta Acustica united with Acustica. 2019. Vol. 105. Pp. 109-122. DOI: 10.3813/AAA.919292
5. Kopania J.M., Grzegorz B., Gaj P., Wójciak K. Acoustical parameters of the different fixing of blade ventilation damper into the duct. 10th Convention of the European Acoustics Association Forum Acusticum 2023. 2023. Pp. 4575-4579. DOI: 10.61782/fa.2023.1192

6. Kopania J.M., Grzegorz B., Gaj P., Wójciak K. Aeroacoustical study of the serrated ventilation dampers. *Vibrations in Physical Systems*. 2022. Vol. 3 (33). 2022313. DOI: 10.21008/j.0860-6897.2022.3.13
7. Skorik T., Galkina N., Glazunova E. Verification of the ventilation dampers' aerodynamic characteristics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 913. 042043. DOI: 10.1088/1757-899X/913/4/042043
8. Nering K. Perception of Structure-Borne Sound in Buildings in Context of Vibration Comfort of Human in the Buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2020. Vol. 960. No. 022033. DOI: 10.1088/1757-899X/960/2/022033
9. Kopania J. M., Bogusławski G., Gaj P. Wójciak K. Acoustical parameters of the different fixing of blade ventilation damper into the duct. 10th Convention of the European Acoustics Association Turin, Italy. 2024. Pp. 4575–4579. DOI: 10.61782/fa.2023.1192
10. Kapre A.V., Dodia Y. Flow analysis of butterfly valve using CFD. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2015. Vol. 4 (11). Pp. 95-99.
11. Millers R., Pelite U. Survey of control characteristics of circular air dampers in variable air volume ventilation systems. *Energy Procedia*. 2016. Vol. 96. Pp. 296-300. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.09.152.
12. Malet J., Radosavljevic M., Mbaye M., Costa D., Wiese J., Gehin E. Flow characterization of various singularities in a real-scale ventilation network with rectangular ducts. *Building and Environment*. 2022. Vol. 222. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109223
13. Shihao W., Ran G., Hongming G., Haimeng L., Meng W., Sikai Z., Angui L. Air damper with Controlling Capacity Unrelated to duct system resistance. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 43. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102388.
14. Busu N.A., Isa M.A., Hariri A., Hussein M. Air damper effect on temperature and airflow distribution in enhancing thermal comfort performance. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2022. Vol. 100 (1). Pp. 152-164. DOI: 10.37934/arfmts.100.1.152164
15. Rasuo B., Dinulovic M., Trninic M., et.al. A study of aerodynamic noise in air duct systems with turning vanes. *FME Transaction*. 2021. Vol. 49(2). Pp. 308-314. DOI: 10.5937/fme2102308R
16. Wang H., Zhang R., Luo W. Investigation on characteristics of secondary noise for the duct. *Xibei Gongye Daxue Xuebao/Journal of Northwestern Polytechnical University*. 2017. Vol. 35(6). Pp.998-1004
17. Абрамкина, Д.В. Сравнительный анализ методик акустического расчета дросселирующих устройств / Д.В. Абрамкина, А.О. Иванова, Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, Х.М. Вафаева // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2024. – Т. 51. – № 3. – С. 172–179. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-3-172-179>.
18. Borovkov, Alexey & Vafaeva, Khristina Maksudovna & Vatin, Nikolai & Ponyaeva, Irina. (2024). Synergistic Integration of Digital Twins and Neural Networks for Advancing Optimization in the Construction Industry: A Comprehensive Review. *Construction Materials and Products*. 7. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-4-7>.
19. Гизатуллин, З.М. Физическое моделирование помехоустойчивости электронных средств при электромагнитном воздействии промышленных макроисточников / З.М. Гизатуллин, М.Г. Нуриев, Р.М. Гизатуллин // Радиотехника и электроника. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 97–102. – DOI 10.7868/S0033849417010144. – EDN YNJNET.
20. Гизатуллин, З.М. Физическое моделирование электромагнитных помех в электронных средствах при воздействии электромагнитных полей высоковольтных линий электропередачи / З.М. Гизатуллин, М.Г. Нуриев, Р.М. Гизатуллин // Электротехника. – 2018. – № 5. – С. 45-48. – EDN YWNYGO.
21. Простая методика исследования электромагнитного излучения от электронных средств / З.М. Гизатуллин, М.Г. Нуриев, М.С. Шкиндеров, Ф.Р. Назметдинов // Журнал радиоэлектроники. – 2016. – № 9. – С. 7. – EDN XAAFVF.
22. Гибадуллин, Р.Ф. Анализ параметров промышленных сетей с применением нейросетевой обработки / Р.Ф. Гибадуллин, Д.В. Лекомцев, М.Ю. Перухин // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2020. – № 1. – С. 80-87. – DOI 10.14357/20718594200108. – EDN EKNKRS.
23. Разработка аппаратно-программного модуля обнаружения объектов для встраиваемых систем / Р.Ф. Гибадуллин, И.Н. Смирнов, Н.В. Хевронин [и др.]//Вестник Технологического университета. – 2018. – Т. 21, № 6. – С. 118-122. – EDN XUALTF.
24. Гибадуллин, Р.Ф. Построение сети на основе технологии GPON / Р.Ф. Гибадуллин, А.П. Никитин, М.Ю. Перухин // Вестник Технологического университета. – 2017. – Т. 20, № 5. – С. 104-108. – EDN YNEHLV.
25. Trninic M., Rasuo B., Dinulovic M. Air duct modification towards outlet pressure drop and vibration level reduction. 2020. *Tehnika*. Vol. 75(4). Pp. 457-466. DOI: 10.5937/tehnika2004457T
26. Nering K., Nering K. Validation of Modified Algebraic Model during Transitional Flow in HVAC Duct. *Energies*. 2021. Vol. 14. No 3975 DOI: 10.3390/en14133975
27. Lucic M. Design and CFD simulation of the exhaust manifold of the Formula Student vehicle. *International Scientific Journal "Machines. Technologies. Materials"*. 2023. Iss. 2. Pp. 54-57

28. Zekic S., Gomez-Agustina L., Aygun H., Chaer I. Measurement methods of acoustics properties for alternative ventilation ducts. Inter Noise 2020. Seoul 23 - 26 Aug 2020 International Institute of Noise Control Engineering.

References:

1. Leshko M.Yu. On the issue of noise generation of throttling devices. *Vestnik MGSU*. 2011;3:82–86. (In Russ)
2. Lan L., Sun Yu., Vayon D.P., Wargotsky P. Pilot study of the effect of ventilation and ventilation noise on sleep quality in young and elderly people. *Indoor Air*. 31(4). DOI: 10.1111/ina.12861
3. Meira L.S., Souza F. Numerical study of flow-generated noise in a turbulent flow inside an HVAC duct. 12th Spring School on Transition Period and Turbulence. 2020. DOI: 10.26678/ABCM.EPTT2020.EPT20-0063
4. Geyer TF, Lucius A, Schroedter M, Schneider M, Sarraj E. Reduction of turbulent interaction noise using airfoils with perforated leading edges. *Acta Acustica merged with Acustica*. 2019;105:109-122. DOI: 10.3813/AAA.919292
5. Kopania JM, Grzegorz B, Gaj P, Wujczak K. Acoustic parameters of different mountings of a vane ventilation damper in a duct. 10th Congress of the European Acoustics Association Forum Acusticum 2023. 2023; 4575-4579. DOI: 10.61782/fa.2023.1192
6. Kopania J.M., Grzegorz B., Gaj P., Wujczak K. Aeroacoustic study of toothed ventilation dampers. *Vibrations in Physical Systems*. 2022; 3 (33): 2022313 . DOI: 10.21008/j.0860-6897.2022.3.13
7. Skorik T., Galkina N., Glazunova E. Testing the aerodynamic characteristics of ventilation dampers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;913:042043. DOI: 10.1088/1757-899X/913/4/042043
8. Nehring K. Perception of structure-borne sound in buildings in the context of human vibration comfort in buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 960:022033. DOI: 10.1088/1757-899X/960/2/022033
9. Kopania J.M., Boguslavsky G., Gaj P., Wujczak K. Acoustic parameters of different duct mountings of vane ventilation dampers. *10th Congress of the European Acoustics Association Turin, Italy*. 2024: 4575–4579. DOI: 10.61782/fa.2023.1192
10. Kapre A.V., Dodia Y. Flow Analysis of a Rotary Damper Using Computational Fluid Dynamics. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2015; 4(11): 95-99 .
11. Millers R., Pelite U. A Review of Control Characteristics of Circular Air Dampers in Variable Air Volume Ventilation Systems. *Energy Procedia*. 2016; 96: 296-300. DOI: 10.1016/j.egypro. 2016.09.152.
12. Malet J., Radosavljevic M., Mbaye M., Costa D., Wiese J., Gehin E. Flow characterization of different features in a real ventilation network with rectangular ducts. *Building and Environment*. 2022;222. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109223
13. Shihao W., Ran G., Hongming G., Haimeng L., Meng W., Sikai Z., Angui L. *Air damper with control capacity not related to the duct system resistance*. *Journal of Structural Engineering*. 2021;43. DOI: 10.1016/j.job.2021.102388.
14. Busu N.A., Isa M.A., Hariri A., Hussain M. Effect of Air Damper on Temperature and Airflow Distribution to Enhance Thermal Comfort Performance. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2022;100(1):152-164. DOI: 10.37934/arfm.100.1.152164
15. Rasuo B., Dinulovic M., Trninic M., et.al. Investigation of Aerodynamic Noise in Turning Vane Duct Systems. *FME Transaction*. 2021;49(2):308-314. DOI: 10.5937/fme2102308R
16. Wang H., Zhang R., Luo W. Study on Secondary Noise Characteristics for Duct. *Xibei Gongge Daxue Xuebao. Journal of the North-West Polytechnic University*. 2017;35(6):998-1004
17. Abramkina, D.V. Comparative analysis of the methodology for acoustic calculation of throttling devices / D.V. Abramkina, A.O. Ivanova, D.F. Karpov, M.V. Pavlov, H.M. Vafaeva. *Herald of the Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2024;51(3):172 - 179. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-3-172-179>. (In Russ)
18. Borovkov Alexey and Vafaeva, Kristina Maksudovna and Vatin, Nikolay and Ponyaeva Irina. (2024). Synergistic Integration of Digital Twins and Neural Networks to Advance Optimization in the Construction Industry: A Comprehensive Review. *Construction Materials and Products*. 7. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-4-7>.
19. Gizatullin, Z.M. Physical Modeling of Noise Immunity of Electronic Equipment under Electromagnetic Exposure of Industrial Macrosources / Z.M. Gizatullin, M.G. Nuriev, R.M. Gizatullin. *Radio Engineering and Electronics*. 2018;63(1):97-102. DOI 10.7868/S0033849417010144. - EDN INGNET. (In Russ)
20. Gizatullin Z.M. Physical modeling of electromagnetic effects in electronic devices under the influence of electromagnetic fields of high-voltage power lines / Z.M. Gizatullin, M.G. Nuriev, R.M. Gizatullin // *Electrical engineering*. 2018; 5: 45-48. - EDN YVNIGO. (In Russ)

21. A simple technique for studying electromagnetic radiation from electronic devices / Z.M. Gizatullin, M.G. Nuriev, M.S. Shkinderov, F.R. Nazmetdinov. *Journal of Radio Electronics*. 2016;9:7. - EDN XAAFVF. (In Russ)
22. Gibadullin R.F. Analysis of industrial network parameters using neural network processing. R.F. Gibadullin D.V. Lekomtsev, M.Yu. Peruhin. *Artificial Intelligence and Decision Making*. 2020;1:80-87. - DOI 10.14357/20718594200108. - EDN EKNKRS. (In Russ)
23. Development of a hardware and software module for object detection for embedded systems / R.F. Gibadullin I.N. Smirnov, N.V. Hevronin [et al.] *Bulletin of the Technological University*. 2018; 21(6): 118-122. - EDN XUALTF. (In Russ)
24. Gibadullin, R.F. Building a network based on GPON technology / R.F. Gibadullin, A.P. Nikitin, M.Yu. Peruhin. *Bulletin of the Technological University*. 2017; 20(5.): 104-108. - EDN YHEHLV. (In Russ)
25. Trninic M., Rasuo B., Dinulovic M. Air duct modification towards outlet pressure drop and vibration level reduction. *Tehnika*. 2020;75(4): 457-466. DOI: 10.5937/Tehnika 2004457T
26. Nering K., Nering K. Validation of Modified Algebraic Model during Transitional Flow in HVAC Duct. *Energies*. 2021; 14: 3975 DOI: 10.3390/en14133975
27. Lucic M. Design and CFD simulation of the exhaust manifold of the Formula Student vehicle. *International Scientific Journal "Machines. Technologies. Materials"*. 2023; 2: 54-57
28. Zekic S., Gomez-Agustina L., Aygun H., Chaer I. Measurement methods of acoustics properties for alternative ventilation ducts. *Inter Noise 2020*. Seoul 23 - 26 Aug 2020 International Institute of Noise Control Engineering.

Сведения об авторах:

Абрамкина Дарья Викторовна, кандидат технических наук, доцент, доцент, кафедра теплогазоснабжения и вентиляции; dabramkina@ya.ru; ORCID 0000-0001-8635-1669

Иванова Ангелина Олеговна, аспирант, кафедра теплогазоснабжения и вентиляции; ivanova.angeli@yandex.ru; ORCID 0000-0003-4937-9843

Карпов Денис Федорович, старший преподаватель, кафедра теплогазоснабжения; karpovdf@vogu35.ru; ORCID 0000-0002-3522-9302

Вафаева Христина Максудовна, инженер-исследователь, лаборатория самовосстанавливающихся конструкционных материалов; vafaeva.khm@gmail.com; ORCID 0000-0002-7422-5494

Воронов Александр Сергеевич, аспирант; 1142220725@rudn.ru

Information about authors:

Daria V. Abramkina, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Ventilation and Heat and Gas Supply; dabramkina@ya.ru; ORCID 0000-0001-8635-1669

Angelina O. Ivanova, Postgraduate Student, Department of Ventilation and Heat and Gas Supply; ivanova.angeli@yandex.ru; ORCID 0000-0003-4937-9843

Denis F. Karpov, Senior Lecturer, Department of Heat, Gas and Water Supply; karpovdf@vogu35.ru; ORCID 0000-0002-3522-9302

Khristina M. Vafaeva, Research Engineer, Laboratory of Self-Healing Structural Materials; vafaeva.khm@gmail.com; ORCID 0000-0002-7422-5494

Alexander S. Voronov, Postgraduate student; 1142220725@rudn.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare that there are no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/ Received 01.09.2024.

Одобрена после рецензирования / Reviced 30.09.2024.

Принята в печать /Accepted for publication 15.10.2024.