

УДК: 502.3
OECD: 02.07.IH

Математическое моделирование затухания шума и аэродинамического сопротивления на повороте

Тупов В.Б.^{1*}, Павлов Д.А.²

¹Д.т.н., профессор, профессор кафедры ТЭС, ²аспирант, кафедра ТЭС
^{1,2}ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, РФ

Аннотация

Эта работа рассматривает использование абсорбционных глушителей с пластинами переменного сечения в изгибах газоздухопроводов для снижения шума. Исследование сосредоточено на анализе эффективности этих глушителей, детальном описании методов численного моделирования, выполненного в программе ANSYS. Были изучены четыре конфигурации прямого скругленного поворота канала квадратного сечения, в том числе рассмотрены поворот с пластиной, облицовкой поворота, с пластиной и облицовкой поворота. Были проведены верификация и валидация моделей. Получено, что снижение уровня шума при установке пластины на повороте составляет 5-7,3 дБ (дополнительное снижение 1,2-3,8 дБ), а коэффициент аэродинамического сопротивления уменьшается в 5,1 раз. При повороте с облицовкой и пластиной аэродинамическое сопротивление уменьшается почти в 3 раза (с 91 до 30 Па) по сравнению со свободным поворотом, при этом затухание шума возрастает на 3-8 дБ.

Ключевые слова: аэродинамическое сопротивление, затухание шума, глушитель, импеданс Miki, ANSYS Fluent, ANSYS Harmonic Acoustics

Mathematical modeling of noise reduction and aerodynamic resistance in an elbow

Tupov V.B.^{1}, Pavlov D.A.²*

*¹D.Sc., Professor, Professor of the Department of TPP, ²P.G., Department of TPP
^{1,2}National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia*

Abstract

This work investigates the use of absorption silencers with variable-section plates in bends within gas and air ducts to reduce noise. The research focuses on analyzing the effectiveness of these silencers, detailing the numerical modeling methods implemented in ANSYS. Four configurations of a square-section channel's direct rounded bend were studied, including a bend with a plate, a bend lining, and a bend with a plate and lining. Model verification and validation were performed. It was found that the noise level reduction when installing a plate on a bend is 5-7.3 dB (an additional reduction of 1.2-3.8 dB), and the aerodynamic drag coefficient decreases by 5.1 times. When turning with a lining and a plate, the aerodynamic drag decreases almost 3 times (from 91 to 30 Pa) compared to a free bend, while noise attenuation increases by 3-8 dB.

Keywords: aerodynamic resistance, noise reduction, duct silencer, Miki impedance, ANSYS Fluent, ANSYS Harmonic Acoustics

*E-mail: Tupovvb@mail.ru (Тупов В.Б.)

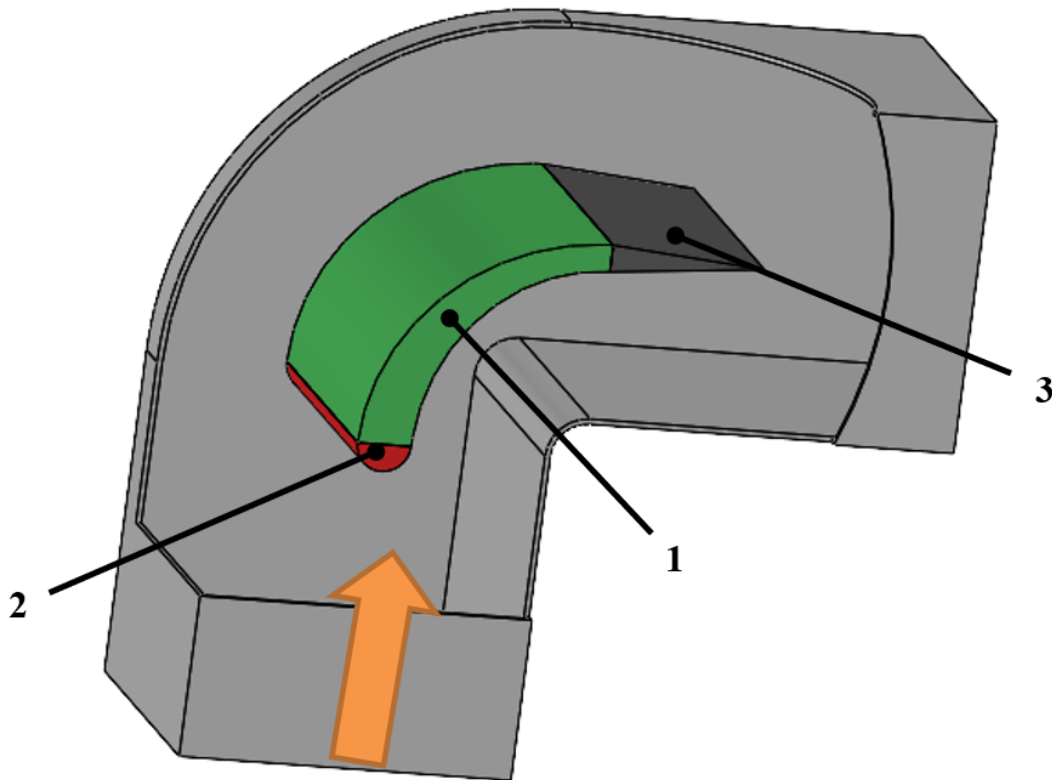
Введение

Шумовое загрязнение от оборудования тепловых электростанций, в частности от систем газозовдухопроводов (вентиляторы, дымососы, компрессоры), представляет серьезную экологическую проблему [1]. Эффективное снижение шума, особенно в низкочастотном диапазоне (<300 Гц), традиционными методами затруднено из-за габаритных ограничений и высоких требований к минимизации гидравлических потерь [2, 3]. Интеграция абсорбционных глушителей с пластинами переменного сечения (ППС) в повороты ГВП является перспективным решением, позволяющим использовать естественное расширение потока для размещения шумоглушащих элементов без значительного увеличения сопротивления. Целью данной работы является анализ эффективности таких глушителей, детализация методик их численного моделирования и верификации.

1 Математические модели и методология расчета

Исследовались четыре конфигурации 90 поворота газозовдухопровода квадратного сечения со сторонами 4 м (рисунок 1):

- а) базовый вариант (свободный поворот),
- б) с облицовкой поворота,
- в) глушитель с пластиной переменного сечения в повороте,
- г) комбинированное решение с применением ППС и облицовки.



1 – пластина, заполненная звукопоглощающим материалом; 2 – входные цилиндрические обтекатели; выходные клиновидные обтекатели; 3 – выходные клиновидные обтекатели.

Рисунок 1 – Модель глушителя шума в повороте

Глушитель, рисунок которого представлен на рисунке 1, представляет собой профилированную пластину, установленную вдоль потока внутри поворота ГВП.

Пластина переменного сечения устанавливается внутри поворота. Начало пластины совпадает с входом поворота, толщина пластины на входе 200 мм, по направлению движению потока, толщина пластины уменьшается, и, на выходе из поворота, составляет 100 мм. Переменное сечение канала обеспечивает плавное изменение акустического импеданса, повышая эффективность поглощения на разных частотах. [5, 6]. Пластина изготавливается из коррозионностойкой стали, толщина 0,8-1,5 мм, перфорация 20-40 % ($\varnothing$ 2-6 мм). Звукопоглотитель – базальтовая вата плотностью 80 кг/м³ [4].

2 Аэродинамическая модель (ANSYS Fluent) [5]:

Для аэродинамической модели ANSYS Fluent используются:

- 1) уравнения: RANS с моделью турбулентности $k-\omega$ SST,
- 2) граничные условия:
 - вход: Velocity Inlet (15 м/с, турбулентная интенсивность 5 %),
 - выход: Pressure Outlet (0 Па),
 - стенки: No-Slip (сталь), адиабатические,
 - минеральная вата: Porous Zone,
 - шероховатость стенок канала (5 мкм),
- 3) метод решения: Алгоритм SIMPLE, дискретизация 2-го порядка.

3 Акустическая модель (ANSYS Harmonic Acoustics) [6]:

Для акустической модели ANSYS Harmonic Acoustics используются:

- 1) источник: Плоская волна (1 Па) на входе,
- 2) граничные условия:
 - выход: Radiation Boundary,
 - сталь: Hard Boundary ($Z \rightarrow \infty$),
 - минеральная вата: Impedance Boundary (модель Miki (формула 1)) [7-9]:

$$Z(f) = \rho_0 c_0 \left[1 + 0,070 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0,725} - i \cdot 0,127 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0,655} \right], \quad (1)$$

где $Z(f)$ – акустический импеданс, кг/(м²с); f – частота, Гц; $\sigma = 10000$ – статический потоковый коэффициент сопротивления, кг/(м²с); $\rho_0 = 1,225$ – плотность воздуха, кг/м³; $c_0 = 343$ – скорость звука в воздухе, м/с.

- 3) диапазон частот: среднегеометрические частоты 31,5–8000 Гц.

4 Верификация и валидация

Перед выполнением математического моделирования был выполнен сеточный анализ, во избежание того, чтобы размер сетки не влиял на результаты моделирования. В итоге разница между сеточными моделями не превышает 1%. Итеративное решение задачи численного моделирования для аэродинамических расчетов проводилось до тех пор, пока не будет достигнута сходимость задачи. Абсолютные невязки переменных для всех уравнений достигают значений ниже 10^{-4} [10]. Полученные результаты моделирования по определению аэродинамического сопротивления для свободного поворота были проверены с результатами, полученными по формулам, приведенным в справочнике Идельчика (формулы 2-4). [3],

$$\zeta = \frac{A_2}{Re} + \zeta_m + \zeta_{тр}, \quad (2)$$

$$\zeta = A_1 \cdot B_1 \cdot C_1, \quad (3)$$

$$\zeta_{\text{тр}} = 0,0175 \cdot \delta \cdot \lambda \cdot \frac{R_0}{D_r}, \quad (4)$$

где A_1, B_1, C_1, A_2 – коэффициенты, зависящие от геометрических параметров отвода; Re – число Рейнольдса; δ – угол поворота; λ – коэффициент сопротивления трения; R_0 – радиус закругления осевой линии, м; D_r – гидравлический диаметр, м; $\zeta, \zeta_m, \zeta_{\text{тр}}$ – коэффициенты сопротивления общий, местный, трения соответственно.

Результаты математического моделирования по определению затухания шума свободного поворота сравнивались со справочными данными [11].

Таблица 1 – Значения затухания шума в прямом скругленном свободном повороте [11]

Источник	Снижение УЗМ, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
[11]	2,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0

5 Результаты моделирования

Результаты математического моделирования по определению затухания шума и аэродинамического сопротивления поворота различных конфигураций представлены в таблицах 2, 3 соответственно, из которых видно, что имеется удовлетворительная сходимость полученных значений в прямом скругленном свободном повороте затухания шума с экспериментальными данными, представленные в таблице 1, а также аэродинамического сопротивления, рассчитанного по формулам 2-4. В таблице 2 в скобках указаны значения дополнительного снижения уровня шума, дБ, по сравнению с базовой конфигурацией (свободный поворот), для свободного поворота с пластиной, для свободного поворота с облицовкой, для свободного поворота с облицовкой и пластиной.

Таблица 2 – Затухания уровня шума на прямом повороте, дБ, по результатам моделирования

f , Гц	Свободный поворот	Свободный поворот с пластиной	Свободный поворот с облицовкой	Свободный поворот с облицовкой и пластиной
31,5	2,6	5,7 (3,1)	4,5 (1,9)	6,6 (4)
63	3,0	5,3 (2,3)	5,9 (2,9)	6,3 (3,3)
125	3,6	7,4 (3,8)	6,6 (3)	11,2 (7,6)
250	3,8	5,7 (1,9)	6,9 (3,1)	8,0 (4,2)
500	4,1	6,2 (2,1)	6,8 (2,7)	8,5 (4,4)
1000	3,9	6,3 (2,4)	6,4 (2,5)	7,7 (3,9)
2000	3,8	5,1 (1,3)	6,0 (2,2)	6,6 (2,9)
4000	3,5	4,9 (1,4)	5,6 (2,1)	6,2 (2,7)
8000	3,4	4,6 (1,2)	5,3 (1,9)	6,0 (2,6)

Из таблицы 3 видно, что при установке пластины переменного сечения в повороте, аэродинамическое сопротивление снижается по сравнению со свободным поворотом примерно в 5 раз (с 91 до 18 Па), за счет уменьшения зоны вихреобразования,

Таблица 3 – Аэродинамическое сопротивление в повороте по результатам моделирования

Параметр	Свободный поворот	Свободный поворот с пластиной	Свободный поворот с облицовкой	Свободный поворот с облицовкой и пластиной
ΔP , Па	91	18	102	30
ζ	0,66	0,13	0,74	0,22

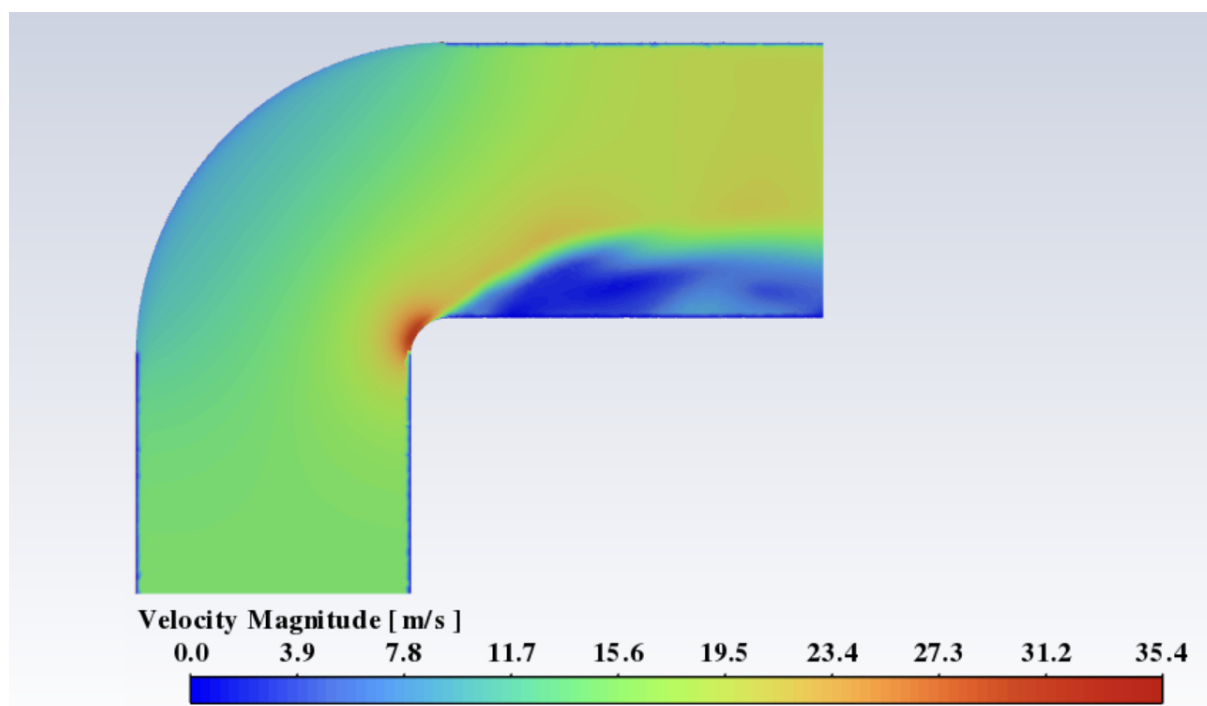


Рисунок 2 – Поле скоростей в повороте до установки пластины

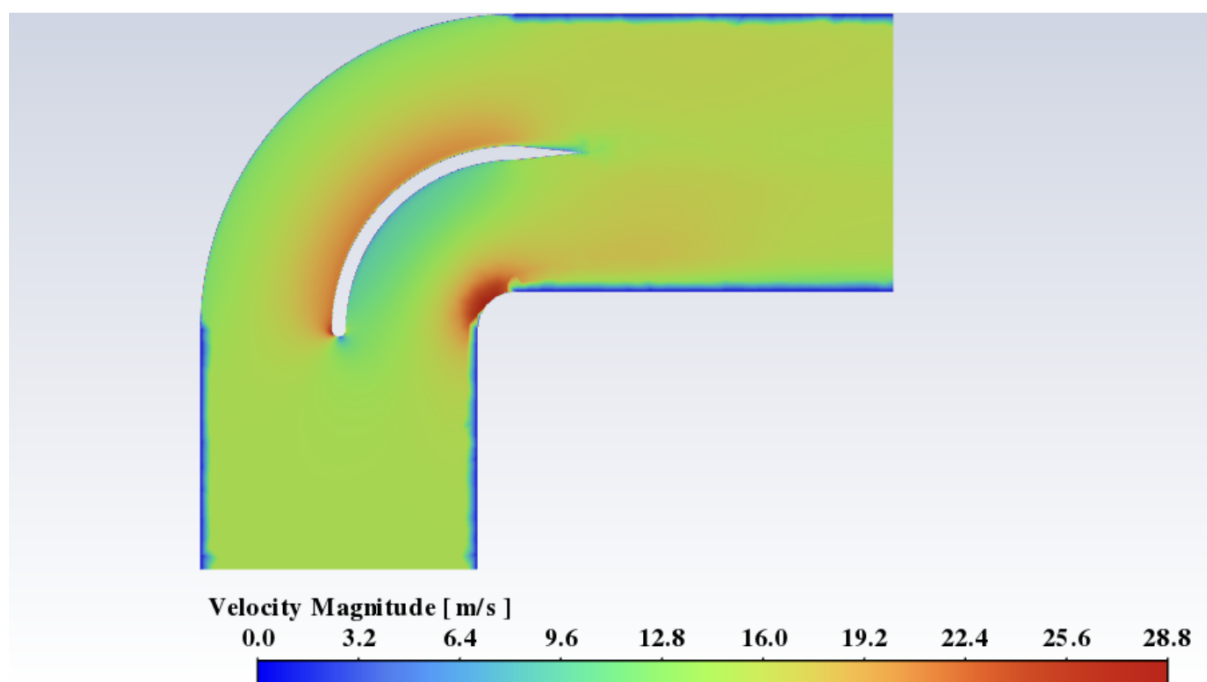


Рисунок 3 – Поле скоростей в повороте после установки пластины

образующейся у внутренней стенки канала, а также выравнивания полей скоростей после поворота. Это видно из рисунков 2 и 3, на которых представлены поля скоростей до и после установки пластины соответственно. При установке облицовки, аэродинамическое сопротивление возрастает за счет роста скорости потока из-за уменьшения проходного сечения канала. При комбинированном варианте, когда в повороте имеет место облицовка и пластина аэродинамическое сопротивление уменьшается почти в 3 раза (с 91 до 30 Па) по сравнению со свободным поворотом, при этом затухание шума возрастает на 3-8 дБ.

Заключение

По результатам математического моделирования по определению затухания шума и аэродинамического сопротивления поворота различных конфигураций сделаны следующие выводы:

1. Установка пластины переменного сечения на поворотах представляется перспективным для снижения аэродинамического сопротивления и снижения уровня звуковой мощности в энергетических газоздухопроводах.
2. Снижение уровня шума при установке пластины на повороте составляет 5-7,3 дБ (дополнительное снижение 1,2-3,8 дБ), а коэффициент аэродинамического сопротивления уменьшается в 5,1 раз.
3. Снижение уровня шума при облицовке поворота составляет 4,5-6,8 дБ. (дополнительное снижение 1,9-3,1 дБ), а коэффициент аэродинамического сопротивления увеличивается в 1,12 раз.
4. При повороте с облицовкой и пластиной аэродинамическое сопротивление уменьшается почти в 3 раза (с 91 до 30 Па) по сравнению со свободным поворотом, при этом затухание шума возрастает на 3-8 дБ. При этом дополнительное затухание шума на среднегеометрической частоте 125 Гц увеличивается до 7,6 дБ по сравнению со свободным поворотом.

Список использованных источников

1. Тупов В.Б. Факторы физического воздействия ТЭС на окружающую среду / В.Б.Тупов. – М.– Издательский дом МЭИ, 2012. – 284 с.- ISBN 978-5-383-00758-7.
2. Тупов В.Б., Тараторин А.А., Скворцов В.С. Снижение шума газовых трактов газотурбинных установок облицовкой поворотов // Вестник МЭИ. 2023. N 1.- С. 93-99. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-93-99.
3. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям /Под ред. М. О. Штейнберга.- 3-е изд.,перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1992. – 672 с. - ISBN 5-217-00393-6.
4. Тараторин А.А., Мухаметов А.Б., Павлов Д.А. Снижение шума от объектов энергетики при помощи энергоэффективных диссипативных глушителей в поворотах газоздушных трактов // Вестник Московского энергетического института. – 2024. – N 1.– С. 81–92. DOI: 10.24160/1993-6982-2024-1-81-92.
5. Matsson J. E. An introduction to ANSYS fluent 2022. – Sdc Publications, 2022. – 688 p. - ISBN 978-1-63057-569-4.
6. C.Q. Howard, B.S. Cazzolato. Acoustic Analyses Using MATLAB and Ansys, CRC press, 2015.– 670 p. - ISBN 978-1-4822-2325-5.
7. Sreeja R. Investigation of Fibrous Materials for Low Frequency and High-Frequency Passive Noise Reduction using Transfer Matrix Method //Journal of Scientific Research. – 2022. – Vol. 14. – N 1. – P. 101-114. DOI: 10.3329/jsr.v14i1.53546.

8. Liang, M.; Wu, H.; Liu, J.; Shen, Y.; Wu, G. et al. Improved sound absorption performance of synthetic fiber materials for industrial noise reduction: A review // *Journal of Porous Materials*. – 2022. – Vol. 29. – N 3. – P. 869-892. DOI: 10.1007/s10934-022-01219-z.
9. Miki Y. Acoustical properties of porous materials-Modifications of Delany-Bazley models // *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*. – 1990. – Vol. 11, N 1. – P. 19-24. DOI: 10.1250/ast.11.19.
10. Stern F. et al. Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations—part 1: methodology and procedures // *J. Fluids Eng.* – 2001. – Vol. 123, N 4. – P. 793-802. DOI: 10.1115/1.1412235.
11. ASHRAE, HVAC Applications, GA // American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 2015. – 1340 p. - ISBN 978-1-936504-93-0.

References

1. Tupov V.B. Factors of Physical Impact of Thermal Power Plants on the Environment / V.B. Tupov. – Moscow: MPEI Publishing House, 2012. – 284 p. - ISBN 978-5-383-01196-6.
2. Tupov V.B., Taratorin A.A., Skvortsov V.S. Reduction of noise in gas tracts of gas turbine units by lining turns" // *Bulletin of MPEI*. 2023. N 1, P. 93-99. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-93-99.
3. Idelchik I.E. Handbook of Hydraulic Resistance /Ed. by M.O. Shteinberg. - 3rd ed, revised and expanded. - Moscow: Mashinostroenie, 1992.- 672 p. - ISBN 5-217-00393-6.
4. Taratorin A.A., Mukhametov A.B., Pavlov D.A. Noise reduction from energy facilities by using energy-efficient dissipative silencers in the turns of gas-air paths // *Bulletin of MPEI*. – 2024. – N 1. – P. 81–92. DOI: 10.24160/1993-6982-2024-1-81-92.
5. Matsson J. E. An introduction to ANSYS fluent 2022. – Sdc Publications, 2022. – 688 p. - ISBN 978-1-63057-569-4.
6. C.Q. Howard, B.S. Cazzolato. Acoustic Analyses Using MATLAB and Ansys, CRC press, 2015.– 670 p. - ISBN 978-1-4822-2325-5.
7. Sreeja R. Investigation of Fibrous Materials for Low Frequency and High-Frequency Passive Noise Reduction using Transfer Matrix Method // *Journal of Scientific Research*. – 2022. – Vol. 14. – N 1. – P. 101-114. DOI: 10.3329/jsr.v14i1.53546.
8. Liang, M.; Wu, H.; Liu, J.; Shen, Y.; Wu, G. et al. Improved sound absorption performance of synthetic fiber materials for industrial noise reduction: A review // *Journal of Porous Materials*. – 2022. – Vol. 29. – N 3. – P. 869-892. DOI: 10.1007/s10934-022-01219-z.
9. Miki Y. Acoustical properties of porous materials-Modifications of Delany-Bazley models // *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*. – 1990. – Vol. 11, N 1. – P. 19-24. DOI: 10.1250/ast.11.19.
10. Stern F. et al. Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations—part 1: methodology and procedures // *J. Fluids Eng.* – 2001. – Vol. 123, N 4. – p. 793-802. DOI: 10.1115/1.1412235.
11. ASHRAE, HVAC Applications, GA // American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 2015. – 1340 p. - ISBN 978-1-936504-93-0.