

УДК 699.844.3

DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-93-99

Снижение шума газовых трактов газотурбинных установок облицовкой поворотов

В.Б. Тупов, А.А. Тараторин, В.С. Скворцов

Проанализированы особенности снижения шума газовых трактов газотурбинных установок (ГТУ) облицовкой поворотов. Дан- ный вопрос актуален для ГТУ большой мощности, когда газовые тракты ГТУ становятся причиной превышения санитарных норм в окружающем районе.

Рассмотрены способы снижения шума газовых трактов различными типами глушителей. Один из способов — облицовка звукопоглощающим материалом поворотов выхлопных трактов ГТУ. Проведено сравнение снижения уровня шума газовых трактов облицовкой поворотов с известными способами. Показано, что облицовка поворотов газовых трактов позволяет дополнительно снизить уровень шума при минимальном аэродинамическом сопротивлении по сравнению с использованием других глушителей. Приведено техническое решение для снижения шума облицовкой для ГТУ. Дополнительное снижение уровня шума при облицовке звукопоглощающими панелями поворота газового тракта ГТУ составило до 8 дБА. Для выхлопных трактов ГТУ, где скорость в газоходах равна 30...50 м/с при температурах 300...450 °C, эффективность уменьшается на 12...20%, соответственно для указанных пределов изменения скорости.

Для определения аэродинамического сопротивления поворотов сложной формы, какие имеют место в реальных трактах ГТУ, использовано математическое моделирование. Для поставленной задачи оно проведено в программе Solidworks Flow Simulation. С помощью указанной программы установлены аэродинамические сопротивления.

Проанализированы способы для дополнительного снижения аэродинамического сопротивления на облицованном повороте путем установки там непрофилированных лопаток. Получено, что установка непрофилированных лопаток на прямом повороте позволяет снизить коэффициент сопротивления поворота в 1,63...1,7 раз по сравнению с исходным вариантом и в 2,5...2,6 раз по сравнению с вариантом облицовки без применения лопаток. Исследовано влияние количества лопаток на аэродинамическое сопротивление поворота. Доказано, что при увеличении количества лопаток от 3 до 4 коэффициент местного сопротивления практически не меняется.

Ключевые слова: снижение шума, облицованный поворот, газотурбинная установка.

Для цитирования: Тупов В.Б., Тараторин А.А., Скворцов В.С. Снижение шума газовых трактов газотурбинных установок облицовкой поворотов // Вестник МЭИ. 2023. № 1. С. 93—99. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-93-99.

Noise Reduction of Gas Turbine Unit Gas Paths by Lining Their Turns

В.Б. Тупов, А.А. Тараторин, В.С. Сквортsov

Specific features of reducing the noise emitted from gas turbine unit (GTU) gas paths by lining their turns are analyzed. This problem is relevant for high-capacity GTUs when their gas paths cause exceeding of sanitary standards in the surrounding area. Methods for reducing the noise of gas paths by using various types of silencers are considered. One of the methods is to line the GTU exhaust path turns with sound-absorbing material. The noise suppression effect obtained from the lining of gas paths turns is compared with the effects obtained from using the known methods. It is shown that the lining of gas path turns allows the noise level to be additionally reduced while featuring the minimal pressure drop in comparison with that in using other silencers. A technical solution for reducing noise by lining for GTUs is given. The additional noise level reduction obtained in the case of lining the GTU gas path turn with sound-absorbing panels was up to 8 dBA. For the GTU exhaust paths in which the flow velocity in the gas conduits is 30–50 m/s at temperatures of 300–450 °C, the efficiency decreases by 12–20%, respectively, for the above-mentioned velocity variation limits. To determine the pressure drop in turns of a complex shape, which are encountered in real GTU paths, mathematical simulation was used. For the problem considered, the simulation was carried out in the Solidworks Flow Simulation software, using which the pressure drop values were determined. Methods for additionally decreasing the pressure drop across the lined turn by fitting it with non-profiled blades were analyzed. It has been found that the installation of non-profiled blades in a direct turn makes it possible to reduce the turn pressure drop coefficient by 1.63–1.7 times in comparison with the original version and by 2.5–2.6 times in comparison with the lining without the use of blades. The effect the number of blades has on the turn pressure drop was studied. It has been shown that with increasing the number of blades from 3 to 4, the local pressure drop coefficient remains almost unchanged.

Key words: noise reduction, lined turn, gas turbine unit.

For citation: Tupov V.B., Taratorin A.A., Skvortsov V.S. Noise Reduction of Gas Turbine Unit Gas Paths by Lining Their Turns. Bulletin of MPEI. 2023;1:93—99. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-93-99.

Введение

Шум от газовых трактов газотурбинных установок (ГТУ) — один из источников превышения санитарных норм в окружающем ТЭС районе [1 — 4]. Глушитель для газового тракта в заводской поставке ГТУ отсутствует, в отличие от воздушного тракта. При этом величина превышения санитарных норм от газового тракта ГТУ зависит от многих факторов и составляет 25 дБА [5 — 18], поэтому для снижения шума газового тракта ГТУ используют, в основном, абсорбционные глушилели [9]. Глушилели активного типа, где уровень шума снижается за счет наложения звуковой волны, образованной в динамике в противофазе со звуковой волной от ГТУ, широкого распространения не получили из-за высокой стоимости оборудования, необходимого для снижения уровня шума в газовом тракте [3]. Принято считать, что активные глушилели целесообразны для снижения низкочастотного шума, а для снижения шума во всем спектре частот продуктивно совместное применение активных и абсорбционных глушилелей.

Среди абсорбционных глушилелей для снижения шума газовых трактов получили распространение цилиндрические, кулисные, трубчатые и пластинчатые глушилели. Абсорбционные глушилели отличаются друг от друга расположением звукопоглощающего материала по сечению канала, которое создает дополнительное аэродинамическое сопротивление.

В этой связи перспективно использование облицовки звукопоглощающим материалом поворота газового тракта ГТУ, позволяющее снизить уровень шума в тракте и имеющее минимальное аэродинамическое сопротивление по сравнению с другими видами абсорбционных глушилелей.

Понижение уровня шума внутри больших каналов, когда длины звуковых волн анализируемого диапазона частот меньше размеров сечения канала, описаны энергетическими уравнениями. Снижение уровня звуковой мощности на поворотах в таком случае не зависит от частоты. На поворотах больших каналов все снижение звуковой энергии происходит из-за отражения ее части обратно в канал и поглощения ее стенками поворота.

Расчет снижения звуковой энергии из-за поглощения звуковой энергии стенками поворота выглядит следующим образом [3]:

$$\Delta L_w = \frac{40\alpha_n \sin\varphi \lg(1+m)}{(2-\alpha_{ab})D_r},$$

где α_{ab} , α_n — коэффициенты звукопоглощения отражающей и боковых поверхностей поворота; D_r — гидравлический диаметр облицованного канала; φ — угол поворота; m — степень расширения канала.

Значение ΔL_w возрастает при увеличении коэффициентов звукопоглощения боковых поверхностей α_n , торца α_{ab} , относительной степени расширения канала

m и уменьшении гидравлического диаметра облицованного канала D_r .

Коэффициенты звукопоглощения отражающих поверхностей поворота α_{ab} и α_n можно принять одинаковыми. Обычно их значения располагаются в диапазоне 0,6...0,8. Для указанного диапазона изменений коэффициентов звукопоглощения уровни звукового давления за счёт облицовки поворота снижаются на 6...8 дБА. Аналогичное падение уровня звука наблюдается на расстоянии 1 м от среза дымовой трубы после облицовки.

Дополнительное аэродинамическое сопротивление абсорбционных глушилелей определим как [19]:

$$H = \sum_{i=1}^n \left(\xi_{mi} + \xi_{tpi} \frac{l_i}{D_r} \right) \frac{v^2 \rho}{2},$$

а для облицованных поворотов:

$$H = \sum_{i=1}^n \left(\xi_{mi} \right) \frac{v^2 \rho}{2},$$

где ξ_{mi} , ξ_{tpi} — коэффициенты местного сопротивления и трения i -й ступени глушилеля; l_i — длина i -й секции глушилеля, м; D_r — гидравлический диаметр ячейки глушилеля, м; v — скорость потока в сечении между пластинами глушилеля, м/с; ρ — плотность среды в газовоздухопроводе, кг/м³; n — число ступеней глушилеля или поворотов.

Скорость потока в проходном сечении вычислим по формуле

$$v = Q/S_{np} = Q/(kS),$$

где Q — объёмный расход потока, м³/с; k — доля проходного сечения в месте установки глушилеля.

Видно, что дополнительное аэродинамическое сопротивление из-за облицовки поворота незначительно из-за малого изменения проходного сечения.

Наличие потока в канале меняет эффективность глушилелей следующим образом [14]:

$$\Delta L_d = \Delta L(1 \pm M)^2, \quad (1)$$

где ΔL_d — эффективность глушилеля при скорости потока v в свободном сечении канала; ΔL — эффективность глушилеля без потока; $M = v/c$ — число Маха; c — скорость звука, м/с.

При наличии потока в повороте эффективность использования облицовки для газового тракта снижается, для воздушного тракта — увеличивается.

Влияние потока на эффективность глушилеля следует учитывать при скоростях потока более 15 м/с в свободном сечении глушилеля.

Из (1) следует, что при распространении звуковой энергии в направлении потока эффективность облицованного поворота падает, а при распространении ее против потока — увеличивается. Для выхлопных трактов ГТУ, где скорость в газоходах доходит до 30...50 м/с при температурах 300...450 °С, эффективность может

уменьшаться и составит $(0,88...0,8)\Delta L$ для указанных пределов изменения скорости.

Таким образом, облицовка поворота позволяет понизить уровень шума с целью достижения требований санитарных правил и норм [22] при минимальном увеличении дополнительного аэродинамического сопротивления. Нормируемые параметры шума в октавных полосах частот, уровни звука проникающего шума в помещениях жилых и общественных зданий и шума на селитебной территории зависят от назначения помещения, типа территории и времени суток. Нормативные значения для наиболее распространенных случаев для источников постоянного шума приведены в табл. 1.

Описание технического решения для снижения шума облицовкой

Рассматриваемый участок газового тракта ГТУ представляет собой поворот на 90° . При этом до поворота дымовые газы движутся по цилиндрическому каналу с диаметром 4900 мм, за поворотом канал имеет прямоугольное сечение с габаритами 4300×5100 мм. Схема установки облицовочных панелей в повороте газохода дана на рис. 1. Для поворотов каналов такой сложной формы нельзя использовать известные формулы расчета, поэтому было проведено математическое моделирование в программе Solidworks Flow Simulation. Данная программа позволяет моделировать потоки жидкости и газа для определения их рабочих характеристик на основе вычислительной гидродинамики (CFD — Computational Fluid Dynamics) [20, 21]. Математическое моделирование проходило с помощью

метода конечно-элементного анализа, суть которого — разбиение расчетной области на отдельные элементы (объемы). В этом случае становится возможным поиск решения системы дифференциальных уравнений для отдельного элемента путем приведения их к системе линейных алгебраических уравнений. Эти уравнения дополняются уравнениями состояния жидкости, опре-

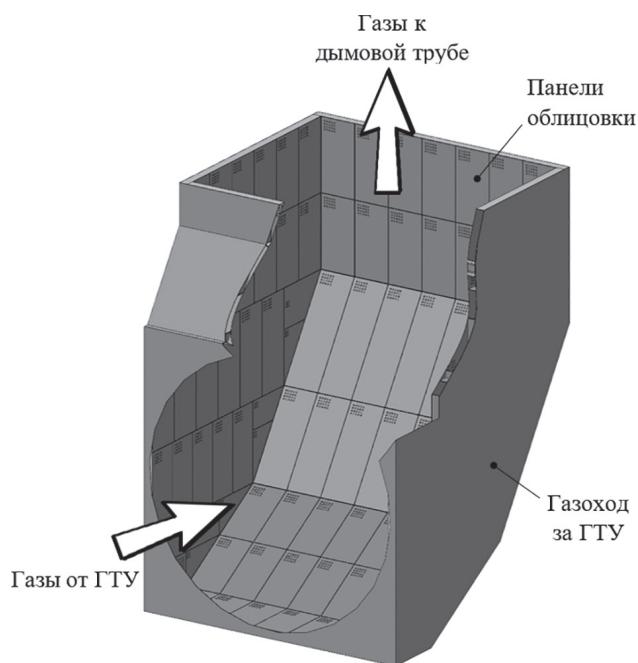


Рис. 1. Схема установки панелей облицовки поворота газового тракта за ГТУ

Таблица 1

Нормируемые параметры шума в октавных полосах частот, уровней звука проникающего шума в помещениях жилых и общественных зданий и шума на селитебной территории по [22] для источников постоянного шума

Назначение помещений или территорий	Время суток	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука $L(A)$, дБа
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Жилые комнаты квартир, домов стационарных организаций социального обслуживания, организаций для детей-сирот и детей, оставшихся без попечения родителей, спальные помещения в школах-интернатах, дошкольных образовательных организациях, домах отдыха, пансионатах	с 7 до 23 ч.	79	63	52	45	39	35	32	30	28	40
	с 23 до 7 ч.	72	55	44	35	29	25	22	20	18	30
Территории, непосредственно прилегающие к зданиям жилых домов, домов отдыха, пансионатов, домов-интернатов для престарелых и инвалидов, дошкольных и других образовательных организаций	с 7 до 23 ч.	90	75	66	59	54	50	47	45	44	55
	с 23 до 7 ч.	83	67	57	49	44	40	37	35	33	45
Границы санитарно-защитных зон	с 7 до 23 ч.	90	75	66	59	54	50	47	45	44	55
	с 23 до 7 ч.	83	67	57	49	44	40	37	35	33	45

деляющими её термодинамические характеристики, а также эмпирическими зависимостями плотности, вязкости и теплопроводности жидкости от температуры. Flow Simulation позволяет рассчитывать как ламинарные, так и турбулентные потоки, а математическое моделирование — коэффициент местного сопротивления с точностью 10%.

При моделировании учитывалось, что для облицовки используется звукопоглощающий материал (противные маты (ЗПМ) с плотностью заполнения 50 кг/м³) толщиной 150 мм. Материал является негорючим, неигнорированным, обладает хорошими звукопоглощающими свойствами и может работать до температуры 650 °С.

Плотность и толщина звукопоглощающего материала выбраны с учетом требуемого снижения в спектре шума. Звукопоглощающий материал защищен от выдувания базальтовой изоляционной тканью, которая используется при температурах до 650 °С и имеет поверхностную плотность около 210 г/м². Снаружи установлен перфорированный лист толщиной 1 мм с коэффициентом перфорации 30%.

Звукопоглощающий материал укладывают в полуоткрытые панели, которые устанавливают открытой частью к стенке газохода, а перфорированной стороной — к потоку газов. Крепление осуществляется с помощью сварки к полосам из стали 12Х18Н10Т толщиной 3 мм и шириной 154 мм. Каркас облицовки выполнен из отдельных полос максимальной длиной 1000 мм с зазором 2...3 мм между ними для органи-

зации температурных расширений. При прогреве облицовки и газохода газами происходит совместное расширение, воспринимающееся имеющимися на газоходе компенсаторами. Общая масса дополнительных материалов на облицовку звукопоглощающим материалом поворота — около 3200 кг.

Аэродинамическое сопротивление ΔH из-за облицовки поворота выглядит как разность аэродинамических сопротивлений до H_1 и после H_2 облицовки:

$$\Delta H = H_1 - H_2,$$

На рис. 2 изображены поля скоростей при моделировании участка газового тракта с облицовкой и без облицовки поворота.

По результатам расчетов коэффициент местного сопротивления на повороте без облицовки составил $\xi_{0,0} = 0,425$, с облицовкой — $\xi_0 = 0,65$.

Поскольку энергетические характеристики ГТУ существенно зависят от температуры окружающей среды, выполнены расчёты аэродинамического сопротивления для трех режимов работы в зависимости от температуры окружающего воздуха. Рассматривались температуры воздуха -6; 4,8 и 15 °С. Во всех случаях значение аэродинамического сопротивления составило 34...36 Па.

Снижение аэродинамического сопротивления поворота возможно благодаря установке тонких непрофилированных лопаток [19]. Результаты моделирования продемонстрированы на рис. 3. Видно, что поле скоп-

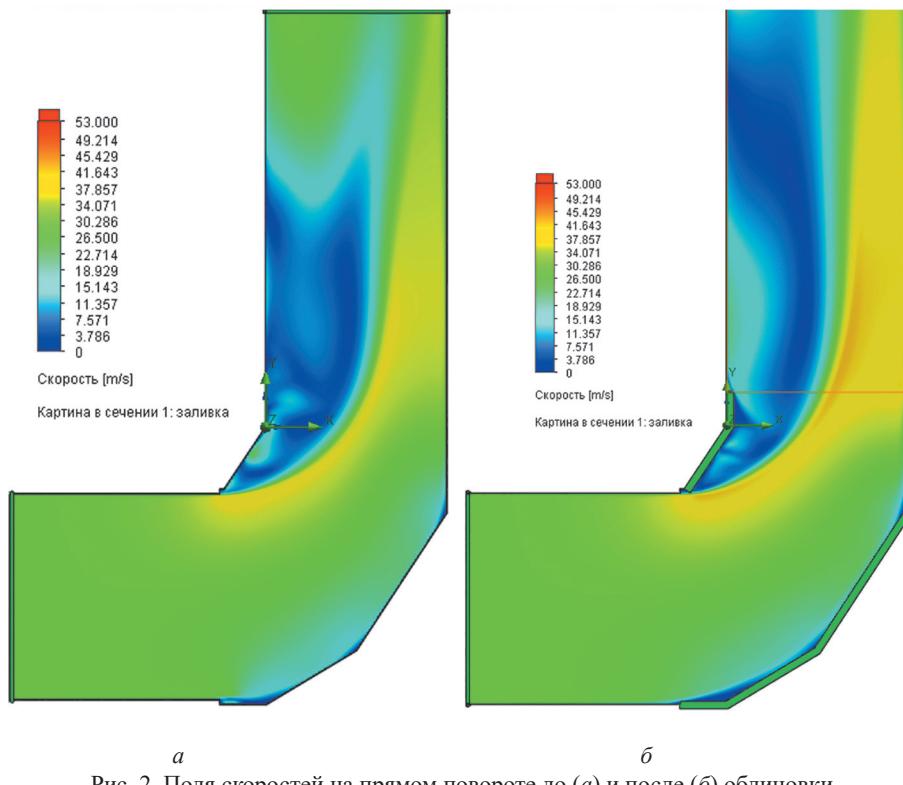


Рис. 2. Поля скоростей на прямом повороте до (a) и после (b) облицовки

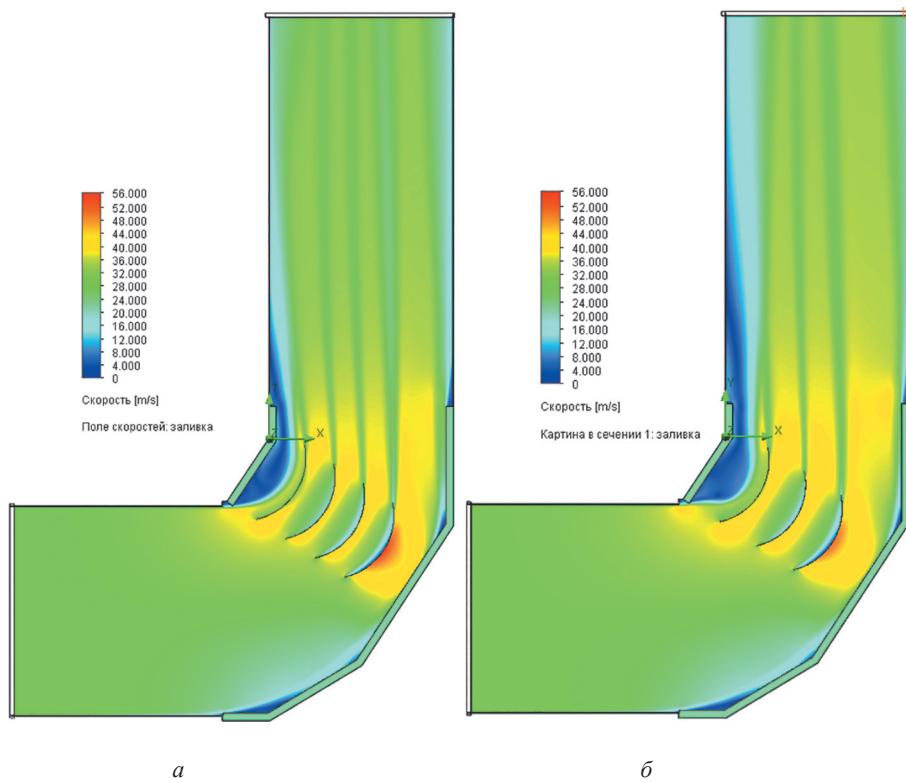


Рис. 3. Поля скоростей на облицованном повороте с четырьмя (а) и тремя (б) непрофилированными лопатками

Таблица 2

Результаты расчётов

Вариант	Изменение сопротивления (от исходного варианта), Па	Коэффициент местного сопротивления
Исходный	—	0,425
Облицовка поворота	+ 35	0,65
Облицовка с установкой трех лопаток	-31	0,25
Облицовка с установкой четырех лопаток	-30	0,26

ростей становится более равномерным как в сравнении со случаем после облицовки поворота газохода, так и в сравнении с исходным вариантом необлицованного газохода.

Результаты расчётов для рассмотренных вариантов сведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, применение лопаток позволяет добиться снижения аэродинамического сопротивления поворота по сравнению с исходным вариантом, даже при наличии облицовки. За счёт применения лопаток коэффициент сопротивления поворота снизился приблизительно в 1,63...1,7 раз по сравнению с исходным вариантом и в 2,5...2,6 раз — по сравнению с вариантом облицовки без применения лопаток. При изменении количества лопаток с трех до четырех коэффициент местного сопротивления практически не меняется.

Выводы

Облицовка звукопоглощающим материалом поворотов газовых трактов — один из способов снижения шума от газовых трактов ГТУ с умеренным дополнительным аэродинамическим сопротивлением.

Облицовка прямого поворота позволяет снизить уровень шума на 6...8 дБА. Из-за наличия скоростного потока газов в выхлопном тракте падение уровня шума уменьшается на 12...20% от величины снижения уровня шума на облицованном повороте в отсутствие потока.

Установка непрофилированных лопаток на прямом повороте позволяет понизить коэффициент сопротивления поворота в 1,63...1,7 раз по сравнению с исходным вариантом и в 2,5...2,6 раз — по сравнению с вариантом облицовки без применения лопаток. При изменении количества лопаток коэффициент местного сопротивления практически не поменялся.

Литература

1. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03—2003.
2. Marcinkowski A., Kopania J. Environmental Performance of Noise Reduction System in Cogeneration Plants — a Life Cycle Assessment Study // Energies. 2021. V. 14(5). Pp. 1324—1343.
3. Тупов В.Б. Снижение шума от энергетического оборудования. М.: Изд-во МЭИ, 2005.
4. What quality of life? // Proc. World Health Forum. 1996. V. 17(4). Pp. 354—356.
5. Sarmadi M., Nassiri P., Razavian F., Khoshmarnesh B. Simulation of Noise Pollution Reduction in a Power Plant Under Construction Using Ansys Fluent Software // International J. Modern Agriculture. 2021. V. 10(2). Pp. 1574—1583.
6. Xiang Yu, Xiangyu You, Li Cheng. Hybrid Silencers with Micro-perforated Panels and Internal Partitions // J. Acoustical Soc. of America. 2015. V. 137(2). Pp. 951—962.
7. Cazzolato B., Leav O., Howard C. Sound Directivity from a 250 kW Gas Turbine Exhaust System // Proc. Acoustic, Wollongong, 2021.
8. Bogdanovic D. Calculation Methods for Predicting Attenuation of Parallel Baffle Type Silencers. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2014.
9. Григорьян Ф.Е., Перцовский Е.А. Расчёт и проектирование глушителей шума энергоустановок. Л.: Энергия, 1980.
10. Иванов Н.И., Шашурин А.Е. Защита от шума и вибрации. СПб.: Печатный цех, 2019.
11. Иванов Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом. М.: Логос, 2015.
12. Справочник по технической акустике / Под ред. Хекла М., Мюллера Х.А. Л.: Судостроение, 1980.
13. Croker M.J. Handbook of Noise and Vibration Control. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.
14. Бор'ба с шумом на производстве: Справочник / Под общ. ред. Юдина Е.Я. М.: Машиностроение, 1985.
15. Tupov V.B., Taratorin A.A. Features of Noise Radiation from Gas Turbines // J. Phys.: Conf. Series. 2020. V. 1683. P. 042089.
16. Tupov V.B., Semin S.A. Gas Turbine Noise // Proc. 15th Intern. Congress Sound and Vibration. Daejeon, 2008.
17. Semin S.A., Tupov V.B. Optimal Design of Dissipative Silencer for Gas Turbine Noise Reduction // Proc. 39th Intern. Congress Noise Control Eng. Lisbon, 2010. V. 185. Pp. 6043—6052.
18. Faqih B., Ghaith F.A. Thermal Performance of Heat Recovery from Gas Turbine Exhaust Stacks Using the Silencer Upstream Sections // Proc. Intern. Mechanical Eng. Congress and Exposition. 2021. V. 11. P. V011T11A014.
19. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975.

References

1. SP 51.13330.2011. Zashchita ot Shuma. Aktualizirovannaya Redaktsiya SNiP 23-03—2003. (in Russian).
2. Marcinkowski A., Kopania J. Environmental Performance of Noise Reduction System in Cogeneration Plants — a Life Cycle Assessment Study. Energies. 2021; 14(5):1324—1343.
3. Tupov V.B. Snizhenie Shuma ot Energeticheskogo Oborudovaniya. M.: Izd-vo MEI, 2005. (in Russian).
4. What quality of life?. Proc. World Health Forum. 1996;17(4):354—356.
5. Sarmadi M., Nassiri P., Razavian F., Khoshmarnesh B. Simulation of Noise Pollution Reduction in a Power Plant Under Construction Using Ansys Fluent Software. International J. Modern Agriculture. 2021;10(2): 1574—1583.
6. Xiang Yu, Xiangyu You, Li Cheng. Hybrid Silencers with Micro-perforated Panels and Internal Partitions. J. Acoustical Soc. of America. 2015;137(2):951—962.
7. Cazzolato B., Leav O., Howard C. Sound Directivity from a 250 kW Gas Turbine Exhaust System. Proc. Acoustic, Wollongong, 2021.
8. Bogdanovic D. Calculation Methods for Predicting Attenuation of Parallel Baffle Type Silencers. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2014.
9. Grigor'yan F.E., Pertsovskiy E.A. Raschet i proektirovanie Glushiteley Shuma Energoustanovok. L.: Energiya, 1980. (in Russian).
10. Ivanov N.I., Shashurin A.E. Zashchita ot Shuma i Vibratsii. SPb.: Pechatnyy Tsek, 2019. (in Russian).
11. Ivanov N.I. Inzhenernaya Akustika. Teoriya i Praktika Bor'by s Shumom. M.: Logos, 2015. (in Russian).
12. Spravochnik po Tekhnicheskoy Akustike. Pod red. Khekla M., Myullera Kh.A. L.: Sudostroenie, 1980. (in Russian).
13. Croker M.J. Handbook of Noise and Vibration Control. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.
14. Bor'ba s Shumom na Proizvodstve: Spravochnik. Pod Obshch. Red. Yudina E.Ya. M.: Mashinostroenie, 1985. (in Russian).
15. Tupov V.B., Taratorin A.A. Features of Noise Radiation from Gas Turbines. J. Phys.: Conf. Series. 2020;1683:042089.
16. Tupov V.B., Semin S.A. Gas Turbine Noise. Proc. 15th Intern. Congress Sound and Vibration. Daejeon, 2008.
17. Semin S.A., Tupov V.B. Optimal Design of Dissipative Silencer for Gas Turbine Noise Reduction. Proc. 39th Intern. Congress Noise Control Eng. Lisbon, 2010;185:6043—6052.
18. Faqih B., Ghaith F.A. Thermal Performance of Heat Recovery from Gas Turbine Exhaust Stacks Using the Silencer Upstream Sections. Proc. Intern. Mechanical Eng. Congress and Exposition. 2021;11:V011T11A014.
19. Idel'chik I.E. Spravochnik po Gidravlicheskim Soprotivleniyam. M.: Mashinostroenie, 1975. (in Russian).

20. **Shih T.-H. e. a.** A New $k-\epsilon$ Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows // Computers and Fluids. 1995. V. 24(3). Pp. 227—238.
21. **Yakhot V. e. a.** Development of Turbulence Models For Shear Flows By A Double Expansion Technique // Physics of Fluids A: Fluids Dynamics. 1992. V. 4(7). Pp. 1510—1520.
22. **СанПиН 1.2.3685—21.** Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.
20. **Shih T.-H. e. a.** A New $k-\epsilon$ Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows. Computers and Fluids. 1995;24(3):227—238.
21. **Yakhot V. e. a.** Development of Turbulence Models For Shear Flows By A Double Expansion Technique. Physics of Fluids A: Fluids Dynamics. 1992;4(7): 1510—1520.
22. **SanPiN 1.2.3685—21.** Gigienicheskie Normativy i Trebovaniya k Obespecheniyu Bezopasnosti i (ili) Bezvrednosti dlya Cheloveka Faktorov Sredy Obitaniya. (in Russian).

Сведения об авторах:

Тупов Владимир Борисович — доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций НИУ «МЭИ», e-mail: TupovVB@mpei.ru

Тараторин Андрей Андреевич — кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций НИУ «МЭИ», e-mail: TaratorinAA@mpei.ru

Скворцов Виталий Сергеевич — ассистент кафедры тепловых электрических станций НИУ «МЭИ», e-mail: skvor.vitalya@yandex.ru

Information about authors:

Tupov Vladimir B. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Thermal Power Plants Dept., NRU MPEI, e-mail: TupovVB@mpei.ru

Taratorin Andrey A. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Thermal Power Plants Dept., NRU MPEI, e-mail: TaratorinAA@mpei.ru

Skvortsov Vitaliy S. — Assistant of Thermal Power Plants Dept., NRU MPEI, e-mail: skvor.vitalya@yandex.ru

Статья поступила в редакцию: 20.06.2022

The article received to the editor: 20.06.2022

Статья принята к публикации: 24.10.2022

The article has been accepted for publication: 24.10.2022