

УДК 628.517.2:534.83

Разработка мета-глушителя для промышленной аспирационной системы

Малыхин Федор Андреевич^()*malykhinfa@bmstu.ru
SPIN-код: 1073-2076*Лаухин Даниил Андреевич*laukhinda@bmstu.ru
SPIN-код: 2586-2980*Тотунов Семен Сергеевич*totunov@bmstu.ru
SPIN-код: 6329-8867*Петрова Мария Миласлава Сергеевна*

petrova.mm@bmstu.ru

*Иванов Михаил Витальевич*mivanov@bmstu.ru
SPIN-код: 2174-9162

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В статье предложена и численно исследована конструкция гибридного мета-глушителя для промышленной аспирационной системы. Конструкция объединяет реактивную часть на основе щелевых резонаторов Гельмгольца с радиально непрерывной шейкой и диссипативную часть с перфорированной оболочкой и пористым заполнителем. Акустическое моделирование выполнено в COMSOL Multiphysics 6.4 в частотной области; эффективность оценивалась по частотной характеристике Потери передачи и по снижению расчетного спектра шума на выходе. По данным расчета максимальное значение Потерь передачи достигает 72 дБ в области 400...700 Гц, а в диапазоне 1...3,5 кГц сохраняется ослабление 32...41 дБ. Дополнительно выполнен газодинамический анализ в модели турбулентности SST, позволивший определить аэродинамические потери, составившие порядка 440 Па.

Ключевые слова: аспирационная система, мета-глушитель, резонаторы Гельмгольца с радиально непрерывная шейкой, диссипативный глушитель, потери передачи, COMSOL Multiphysics, CFD с SST-моделью

Development of a meta-silencer for an industrial aspiration system

Malykhin Fyodor Andreevich^()*malykhinfa@bmstu.ru
SPIN-код: 1073-2076*Laukhin Daniil Andreevich*laukhinda@bmstu.ru
SPIN-код: 2586-2980*Тотунов Семен Сергеевич*totunov@bmstu.ru
SPIN-код: 6329-8867*Petrova Maria Milaslava Sergeevna*

petrova.mm@bmstu.ru

*Ivanov Mikhail Vitalievich*mivanov@bmstu.ru
SPIN-код: 2174-9162

BMSTU, Moscow, Russia

Annotation. The article proposes and numerically studies a hybrid meta-silencer design for an industrial aspiration system. The design combines a reactive part based on Helmholtz

slot resonators with a radially continuous neck and a dissipative part with a perforated shell and a porous filler. Acoustic modeling was performed in COMSOL Multiphysics 6.4 in the frequency domain, and the effectiveness was evaluated based on the Transmission Loss frequency response and the reduction in the calculated noise spectrum at the output. According to the calculations, the maximum Transmission Loss value reaches 72 dB in the 400...700 Hz range, while the attenuation remains at 32...41 dB in the 1...3.5 kHz range. Additionally, a gas dynamics analysis was performed using the SST turbulence model, which allowed for the determination of aerodynamic losses of approximately 440 Pa.

Keywords: aspiration system, meta-silencer, Helmholtz resonators with a radially continuous neck, dissipative silencer, Transmission Loss, COMSOL Multiphysics, CFD with SST model

Введение. Разработка системы снижения шума для промышленных аспирационных систем становится все более актуальной в условиях растущих требований к охране труда и экологической безопасности. Высокие уровни шума негативно влияют на здоровье работников, вызывая стресс, снижение концентрации и ухудшение слуха. В стандартах, таких как ISO 1999 и СанПиН 1.2.3685-21, устанавливаются строгие нормы по уровню шума на рабочих местах. Кроме того, шум может негативно воздействовать на окружающую среду, увеличивая шумовое загрязнение и ухудшая качество жизни в прилегающих районах. Традиционные системы снижения шума показывают высокую эффективность в средне- и высокочастотной области, однако на низких частотах требуют больших габаритов. Современные исследования показывают, что особенно эффективным направлением являются вентилируемые акустические метаматериалы.

За последние несколько лет акустические метаматериалы стали одним из передовых решений для снижения шума в воздуховодах. Их ключевое преимущество заключается в возможности эффективного снижения шума, сохраняя при этом непрерывность воздушного потока [1, 2]. С развитием метаматериалов и волновых изоляторов значительно расширяются возможности проектирования систем снижения низкочастотного шума [2]. Акустические метаматериалы — представляют собой искусственно созданные, периодические или резонансные структуры, с целью высокоэффективного снижения шума. Оптимальный подход для создания мета-глушителя, это применение массива резонаторов. Данная концепция базируется на резонансных ячейках расположенных в радиальном и/или осевом направлении [3, 4]. С увеличением радиальной периодичности амплитуда звукового давления уменьшается, и полоса затухания расширяется, а при последовательное расположение резонансных ячеек (по оси) увеличиваются пиковые потери и расширяет полоса пропускания из-за конструктивных помех и кумулятивных фазовых эффектов [5].

Материалы и методы. Объектом исследования является аспирационная система станка лазерной резки металла. Глушитель предполагается устанавливать после фильтрационной секции и радиального вентилятора. В качестве исходных данных для расчетов приняты: расход воздуха $Q = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$, диа-

метр канала $D = 125$ мм, доступная длина под глушитель $L = 1.6$ м и частота вращения рабочего колеса вентилятора $n = 3000$ об/мин. При таких параметрах средняя скорость в исходном канале составляет около 22.6 м/с, что подтверждает необходимость учета аэродинамических потерь и устойчивости конструкции к воздействию потока.

В данной работе за основу мета-реактивной части был выбран — резонатор Гельмгольца, состоящий из небольшого перешейка, соединяющего его с большим объемом полости. Размеры шейки резонатора Гельмгольца обычно намного меньше акустической длины волны, при расчетной частоте, и поток в перешейке действует как инерционная масса, а воздух в полости как пружина. Его импеданс определяется, как [6, 7]:

$$Z_{HR}(\omega) = R_n(\omega) + j\omega M_n - \frac{j}{\omega C_c}, \quad (1)$$

где R_n — суммарные потери в шейке; M_n — акустическая масса шейки; C_c — акустическая податливость камеры.

Из условия резонанса $\text{Im}(Z_{HR}) = 0$, получается известная формула (2), которая является основой для дальнейшего проектирования и исследования различных форм резонаторов.

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{\text{neck}}}{V_{\text{chamber}} \cdot L_e}}, \quad (2)$$

где c — скорость звука в воздухе (в м/с); S_{neck} — площадь сечения шейки резонатора; d_{neck} — диаметр шейки резонатора; L_{eff} — эффективная длина шейки, учитывающая пограничные эффекты; L_{neck} — высота шейки резонатора; V_{chamber} — объем камеры резонатора; L_{chamber} — высота резонатора; d_{chamber} — диаметр резонатора;

При снижении расчетной частоты классический цилиндрический резонатор требует значительных габаритов для присоединенного объема, что затрудняет применение такой схемы в ограниченном объеме аспирационного канала. Исходя из этого и выводов, полученных в работах [8-10], было принято решения перейти от шейки с круглым сечением, к шейки с щелевым сечением, непрерывно расположенным в радиальном направлении. А присоединенный объем будет представлен в виде кольцевого сечения, что сохранит небольшие габариты установки и увеличит ее эффективность.

Для щелевого резонатора площадь шейки определяется как

$$S_n = b h_n, \quad (3)$$

где b — ширина щели, $h_n = \pi D$ — ее развернутая высота/длина при диаметре воздуховода D .

Для кольцевой полости длиной L_{chamber} , охватывающей воздуховод, объем будет равен

$$V_{\text{chamber}} = \pi \left[\left(\frac{D}{2} + L_e + h \right)^2 - \left(\frac{D}{2} + L_e \right)^2 \right] L_{\text{chamber}}, \quad (4)$$

Преобразовав формулу (2), получим:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{bD}{L_{\text{chamber}} L_e h(D+2L_e+h)}}. \quad (5)$$

Геометрическая длина шейки t_n не равна акустической длине из-за неравномерности соединений воздуховода и присоединенного объема к шейке резонатора, поэтому эффективная длина шейки имеет вид

$$L_e = L + \eta b, \quad (6)$$

где η — коэффициент концевой неравномерности, зависящий от геометрии кромки и режима течения; в инженерных расчетах метаструктуры с разрезанным горлышком обычно используют $\eta \approx 1...2$, в данном случае $\eta = 1,14$ как умеренное значение для узкой щели без закругленности краев [9].

Предварительные расчеты реактивной части показали, что данные резонаторы обеспечивают выраженное ослабление в низко- и среднечастотной области, но не могут гарантировать устойчивое снижение шума в диапазоне 2...8 кГц. Это соответствует современным представлениям о работе реактивных мета-структур: даже при использовании массивов резонаторов рабочая полоса остается ограниченной, а эффективность на верхних частотах требует дополнительного демпфирования [3, 5, 11]. Поэтому в конструкцию была введена диссипативная секция, включающая перфорированную внутреннюю оболочку и пористый звукопоглощающий слой. В качестве базового варианта принята схема: перфорированная оболочка с коэффициентом перфорации 40% и диаметром отверстий 4 мм, после которой уложена минеральная вата или стекловолоконный материал [4, 8].

Численное исследование выполнено в COMSOL Multiphysics 6.4. Для акустического расчета использован интерфейс Pressure Acoustics, Frequency Domain, для задания пористого материала — Poroacoustics, для эквивалентного описания перфорированной оболочки — Interior Perforated Plate. Для оценки аэродинамических потерь и распределения скорости использован интерфейс Turbulent Flow, SST. На данном этапе акустическая и газодинамическая задачи решались последовательно: сначала анализировалось акустическое поле и частотная характеристика TL, затем отдельно оценивалось распределение давления и сопротивление конструкции по потоку. Для уменьшения вычислительных затрат использована симметричная постановка задачи. Вид мета-глушителя при продольном разрезе указан на рис. 1.

Для оценки акустической эффективности разработанного глушителя в качестве основного критерия принят потери передачи

$$TL = 10 \log_{10} \left(\frac{W_{\text{in}}}{W_{\text{out}}} \right), \quad (7)$$

где W_{in} и W_{out} — акустические мощности на входном и выходном сечениях соответственно.

Характеристика TL дает количественное представление о том, насколько эффективно глушитель снижает проходящую акустическую мощность на каждой частоте. График Потерь передачи представлен на рис. 2.

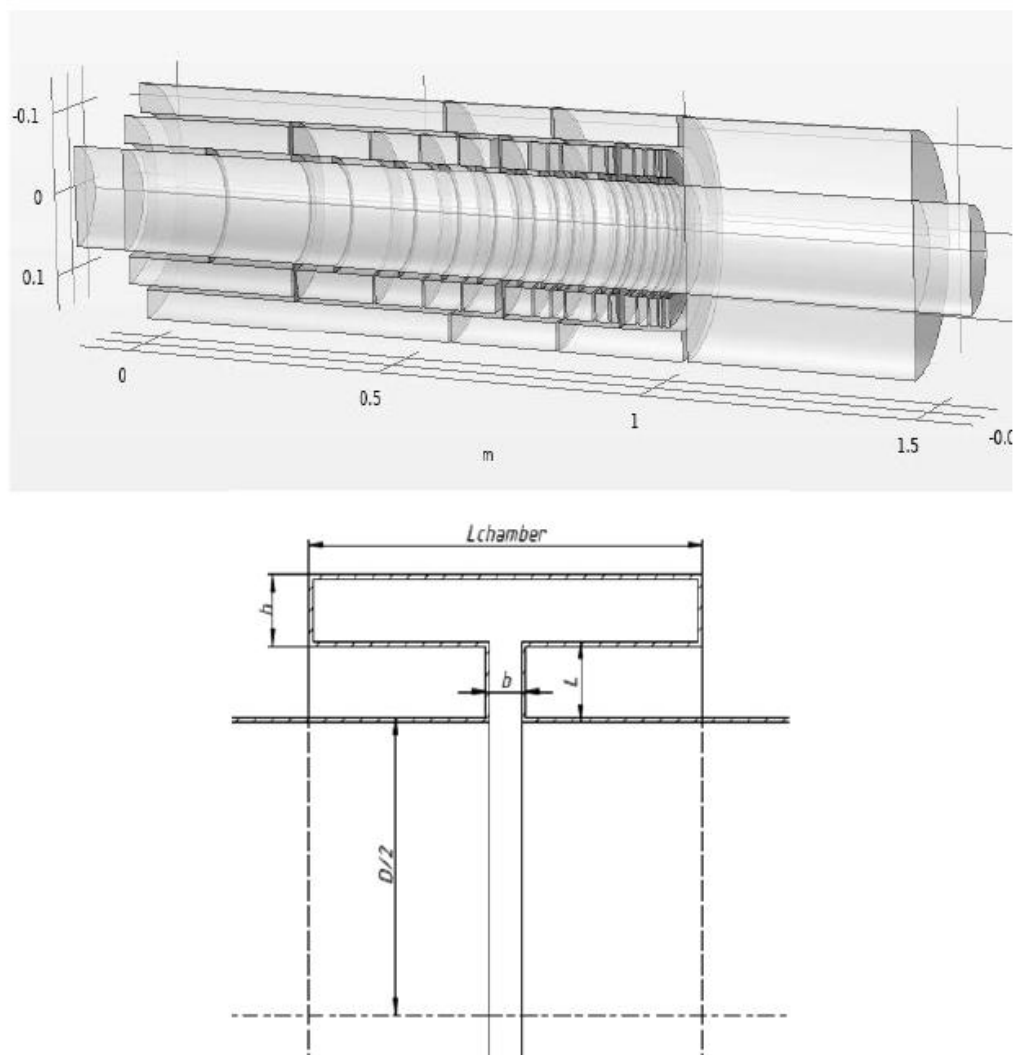


Рис. 1. Вид мета-глушителя при продольном разрезе

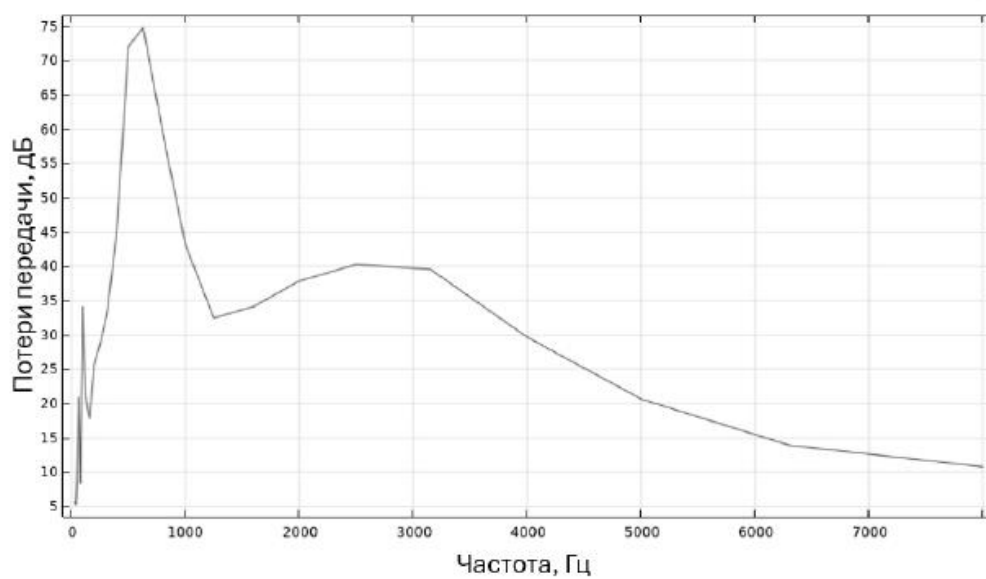


Рис. 2. Зависимость потери передачи глушителя от частоты

Результаты. Полученная частотная зависимость $TL(f)$ показывает, что разработанный глушитель является эффективным в низко- и среднечастотной области, особенно в диапазоне 400...3200 Гц. Максимальное значение потери звука при передаче, порядка 70...75 дБ, наблюдается в области 400...700 Гц подтверждает работоспособность реактивной резонаторной части и правильность выбранной резонансной структуры, состоящей из массива резонаторов Гельмгольца с радиально непрерывной шейкой. В диапазоне 1000...3200 Гц глушитель также обеспечивает высокий уровень снижения шума, порядка 32...40 дБ, что указывает на расширение рабочей полосы по сравнению с одиночным резонатором Гельмгольца. При этом в высокочастотной области 5000...8000 Гц эффективность снижается до 10...20 дБ, поэтому для дальнейшего повышения эффективности шумоподавления необходимо усилить диссипативную часть конструкции.

Распределение уровня звукового давления (УЗД) на частоте 500 Гц (рис. 3), показывает, что основной процесс шумоподавления происходит в зоне последовательного расположения резонаторных элементов. На входе наблюдается область повышенного звукового давления, связанная с отражением и локализацией акустической энергии, тогда как после прохождения резонаторной секции уровень УЗД значительно снижается. Такой характер распределения свидетельствует о том, что акустическая энергия активно взаимодействует с присоединенными объемами: часть энергии локализуется в резонаторных полостях, а часть отражается обратно во входную область.

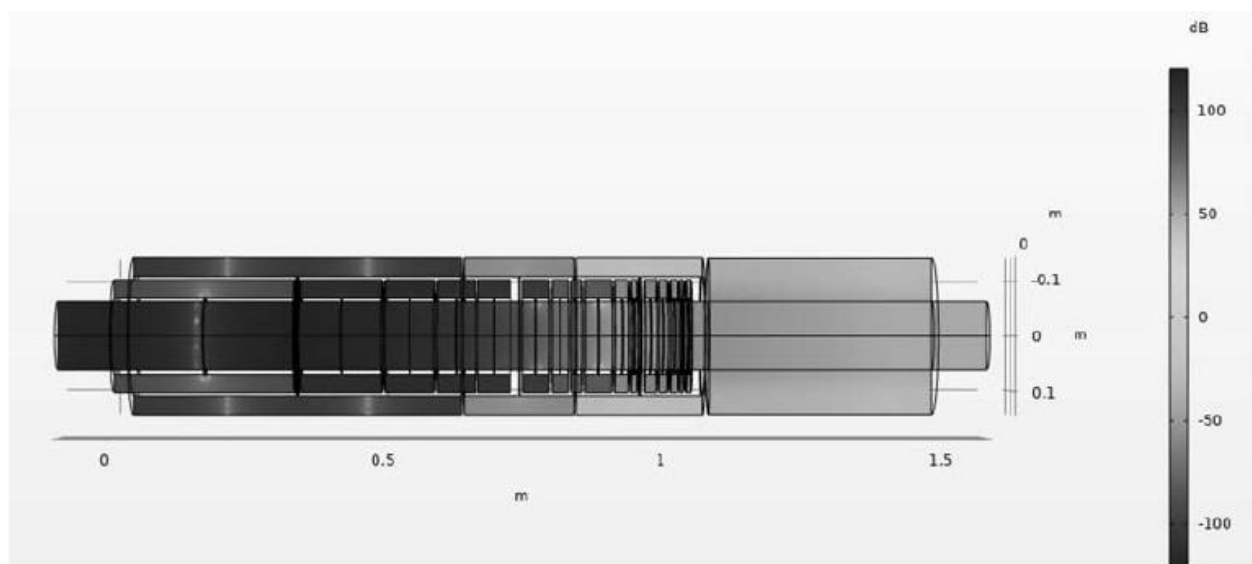


Рис. 3. Распределение УЗД в продольном сечении глушителя на частоте 500 Гц

Газодинамический расчет показал, что аэродинамические потери изменяются неравномерно (рисунок 4). Наибольшее падение давления наблюдается в средней части глушителя, где расположены основные резонаторные элементы и щелевые переходы. По графику распределения давления можно оце-

нить ориентировочный перепад как величину порядка 440 Па. При этом после минимального значения давления (при $z = 1,15$ м) наблюдается частичное восстановление статического давления в выходной части, что свидетельствует о перераспределении кинетической и статической составляющих потока.

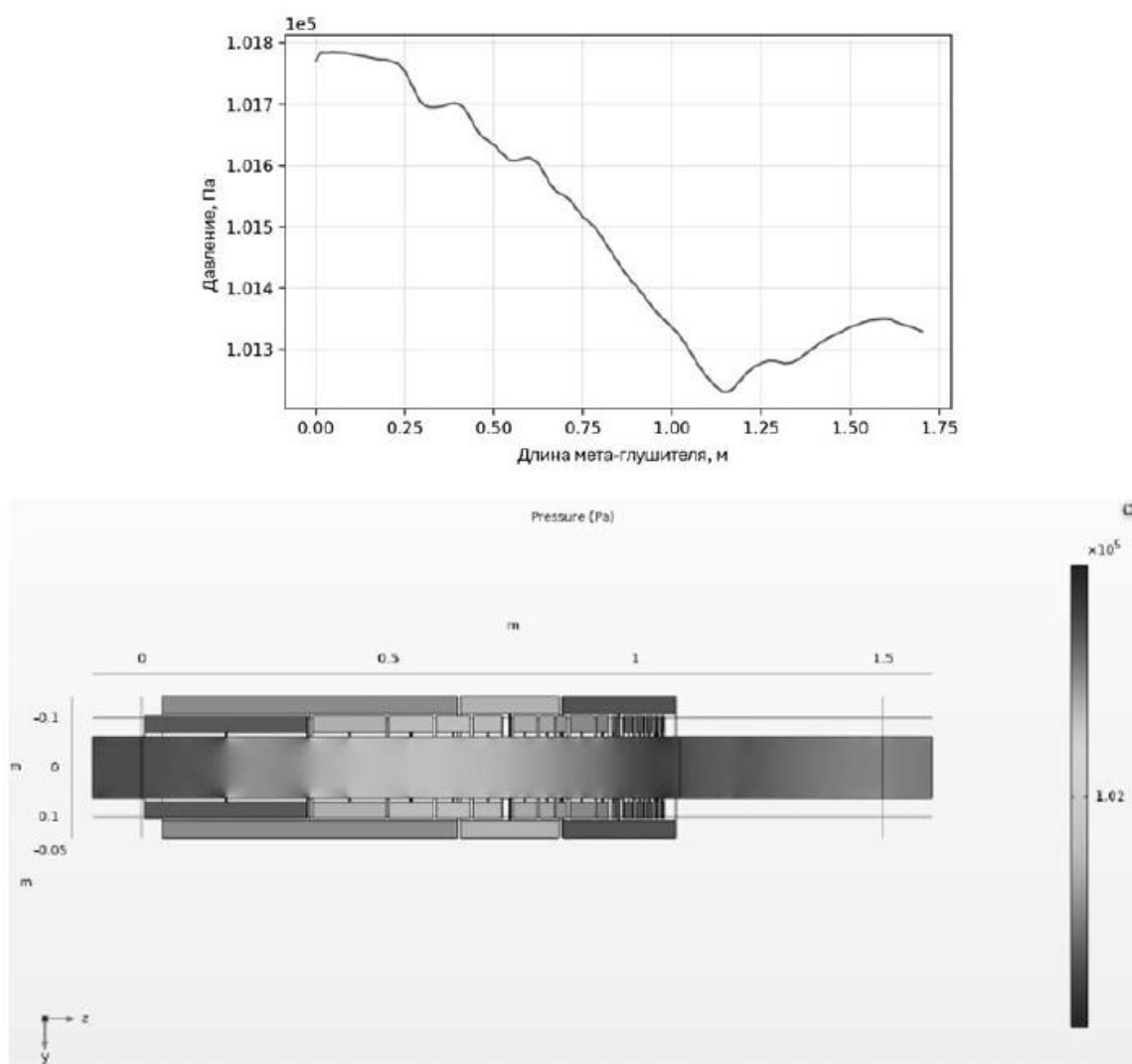


Рис. 4. Распределение полного давления в мета-глушителе

Обсуждение. Полученные акустические результаты подтверждают работоспособность комбинированного мета-глушителя, где реактивная часть на основе щелевых резонаторов Гельмгольца с радиально непрерывной шейкой обеспечивает высокий пик ослабления в области 400-700 Гц и поддерживает значительный уровень TL до частот порядка 3,5 кГц. А диссипативная часть расширяет полосу действия, поскольку в диапазоне 5-8 кГц наблюдается снижение TL до 11-21 дБ. Это не отменяет высокой эффективности конструкции в целом, но указывает на необходимость дальнейшей оптимизации пористого слоя — добавления многослойных материалов с разным акустическим импедансом.

С точки зрения газодинамики расчет в модели SST показывает, что предложенная конструкция создает заметное, но не критическое сопротивление потоку. Перепад давления порядка 440 Па должен рассматриваться как предварительная оценка. Для окончательной инженерной оценки необходимо вычислять перепад полного давления на входном и выходном сечениях, поскольку линейный график статического давления не полностью учитывает кинетическую составляющую потока. Тем не менее полученные данные позволяют сделать вывод, что основная зона потерь связана с реактивной мета-структурой, что требует оптимизации входного сечения шеек резонатора.

Заключение. В работе разработана и численно исследована конструкция комбинированного мета-глушителя для промышленной аспирационной системы. Предложенная схема объединяет реактивную часть на основе щелевых резонаторов Гельмгольца с радиально непрерывной шейкой и диссипативную часть с перфорированной оболочкой и волокнистым звукопоглощающим слоем. Моделирование в COMSOL Multiphysics позволило количественно оценить ее эффективность по характеристике Потери передачи, максимальное значение TL на частотах 400...700 Гц имеет значение в районе 72 дБ. В диапазоне 1000...3150 Гц сохраняется высокий уровень снижения шума 33...41 дБ. Газодинамический анализ с использованием модели турбулентности SST позволил определить газодинамические потери, которые составили около 440 Па.

Таким образом, выполненное моделирование подтверждает перспективность гибридной концепции мета-глушителя для аспирационных систем. Реактивная часть обеспечивает основное снижение шума в области до 3...4 кГц, а диссипативная часть необходима для повышения эффективности на частотах 5...8 кГц, при условно низких газодинамических потерях

Список источников

- [1] Zhen N. et al. Resonance-based acoustic ventilated metamaterials for sound insulation. *Acoustics*, 2025, vol. 1, no. 1, art. no. 7.
- [2] Ang L.Y.L. et al. A systematic review of emerging ventilated acoustic metamaterials for noise control. *Sustainability*, 2023, vol. 15, no. 5, art. no. 4113.
- [3] Zheng M., Chen C., Li X. The influence of the grazing flow and sound incidence direction on the acoustic characteristics of double Helmholtz resonators. *Applied Acoustics*, 2023, vol. 202, art. no. 109160.
- [4] Jokandan M.R. et al. Study of acoustic and aerodynamic performance of reactive silencer with different configurations: Theoretical, modeling and experimental. *Helvion*, 2023, vol. 9, no. 9, pp. 1373–1382.
- [5] Liu Z. et al. Duct Metamaterial Muffler with Composite Acoustic Porous Media: Acoustic Optimization via Periodic Arrangement, Particle Swarm Optimization and Experimental Validation. *Materials*, 2025, vol. 18, no. 21, art. no. 4873.
- [6] Yang D. et al. Optimising the acoustic damping of multiple Helmholtz resonators attached to a thin annular duct. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, vol. 444, pp. 69–84.

-
- [7] Канев Н.Г. *Гашение звука системами пассивных и активных резонаторов в каналах, помещениях и метасредах*. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2023, 380 с.
 - [8] Lloyd J. et al. Compact multi-resonator ventilated duct silencer with broadband sound attenuation and steady airflow. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2026, vol. 59, no. 1, art. no. 015114.
 - [9] Gao C. et al. Barrier-free duct muffler for low-frequency sound absorption. *Frontiers in Materials*, 2022, vol. 9, art. no. 991959.
 - [10] Jia J. et al. Design and optimization of sound-absorbing metastructure with extended slit-neck resonator and micro-slits panel. *Thin-Walled Structures*, 2025, vol. 216, art. no. 113664.
 - [11] Li Y., Choy Y.S. Broadband and low-frequency sound absorption of compact meta-liner under grazing flow. *Applied Acoustics*, 2024, vol. 224, art. no. 110146.