

УДК 621.311.22:534.83

## Сброс пара в атмосферу: механизмы генерации шума и методы его снижения

*Брянцев Леонид Михайлович<sup>(\*)</sup>*

lbryantsev@mail.ru

*Мамонтова Анна Дмитриевна*

ad\_mamontova@mail.com

*Комкин Александр Иванович*

akomkin@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**Аннотация.** В статье выполнен обзор физических механизмов генерации шума при дозвуковом, околосзвуковом и сверхзвуковом истечении паровых струй. Рассмотрены глушители сброса пара в атмосферу, применяемые на объектах теплоэнергетики. Показано, что конструкция парового глушителя должна определяться режимом истечения, соотношением вклада клапанного и струйного шума, а также требованиями по акустической эффективности, гидравлическому сопротивлению, надежности и массогабаритным параметрам. Показано, что их конструкция является сравнительно простой и модульной. Сделан вывод о том, что в настоящее время отсутствует единая общепринятая методика подбора паровых глушителей, и ее разработка представляет собой актуальную научно-практическую задачу.

**Ключевые слова:** паровые глушители, сброс пара в атмосферу, шумообразование, режимы истечения

## Steam discharge into the atmosphere: mechanisms of noise generation and methods of its reduction with silencers

*Bryantsev Leonid Michailovich<sup>(\*)</sup>*

lbryantsev@mail.ru

*Mamontova Anna Dmitrievna*

ad\_mamontova@mail.com

*Komkin Alexandr Ivanovich*

akomkin@mail.ru

BMSTU, Moscow, Russia

**Abstract.** The article presents a review of steam discharge silencers used at heat power facilities. Physical mechanisms of noise generation during subsonic, transonic and supersonic steam jet outflow are considered. It is shown that the steam silencer design must be determined by the outflow regime, the ratio of valve and jet noise contributions, as well as requirements for acoustic efficiency, hydraulic resistance, reliability and mass-dimensional parameters. It is shown that their design is relatively simple and modular. It is concluded that at present there is no single generally accepted methodology for selecting steam silencers, and its development is an urgent scientific and practical task.

**Keywords:** steam silencers, steam discharge to atmosphere, noise generation, outflow regimes, vent silencers

**Введение.** Сбросы пара в атмосферу относятся к наиболее интенсивным источникам шумового воздействия на ТЭС и других объектах теплоэнергетики. Такие выбросы возникают при работе редукционно-охладительных установках, продувках, растопках котлов, работе эжекторов, а также при срабатывании главных предохранительных клапанов. Именно паровые выбросы нередко формируют наибольшие уровни акустического воздействия на персонал и окружающую застройку, что делает проблему эффективного глушения шума не только эксплуатационной, но и экологической задачей. [1]

Вместе с тем анализ литературы показывает, что для паровых сбросов до сих пор сохраняется разобщенность подходов: механизмы шумообразования, конструктивные схемы глушителей и критерии их выбора нередко рассматриваются отдельно, а не в рамках единой инженерной методики.

Шум парового выброса имеет двойственную природу и складывается из клапанного шума (при дросселировании потока) и струйного шума (при взаимодействии струи с атмосферным воздухом). Доминирование одного из механизмов определяется режимом истечения, который описывается степенью нерасчетности  $n$  и числом Маха  $M$ .

При дозвуковом режиме смешение пара с атмосферным воздухом начинается практически сразу после выхода из трубопровода; при этом для энергетических объектов характерно, что шум струи обычно существенно ниже шума, генерируемого клапаном, и последним часто определяется итоговый акустический эффект. Для оценки звуковой мощности дозвуковой струи используют зависимость [1, 2]:

$$L_w = 80 \lg(w_c) + 10 \lg(S_{тр}) + 20 \lg(\rho) + L_{w0}, \quad (1)$$

где  $w_c$  — скорость истечения струи;  $S_{тр}$  — площадь проходного сечения;  $\rho$  — плотность струи;  $L_{w0}$  — температурная поправка.

При транзвуковом режиме появляется начальный участок струи без интенсивного смешения, и вклады клапанного и струйного шума становятся сопоставимыми. Для клапанного шума применяют расчетное соотношение вида [1, 2]:

$$L_{w,кл} = L_{WT} + 10 \lg(q) + 10 \lg(c) + 10 \lg(\rho) - 30, \quad (2)$$

где  $L_{WT}$  — поправка, зависящая от конструкции клапана и давления среды перед ним;  $q$  — расход среды;  $c$  — скорость звука;  $\rho$  — плотность среды до клапана.

Если вклад клапанного и струйного шума сопоставим, общий уровень звуковой мощности определяют как логарифмическую сумму вкладов двух независимых источников [1,2]:

$$L_{w\Sigma} = 10 \lg \left( 10^{(0,1L_{w,кл})} + 10^{(0,1L_{w,стр})} \right). \quad (3)$$

При сверхзвуковом (как правило, недорасширенном) истечении формируются волны расширения и сжатия, скачки уплотнения и диск Маха, а основной

вклад в излучение шума начинает вносить уже сама струя. Для оценки звуковой мощности недорасширенной струи применяют зависимость [1, 2]:

$$L_w = 10 \lg \left( \frac{G_0^2}{S_{\text{тр}}} \right) - 10 \lg(n) + K(w_{\text{кр}}) - K(n) - 23,2, \quad (4)$$

где  $G_0$  — расход среды в изобарическом сечении;  $K(w_{\text{кр}})$  и  $K(n)$  — экспериментальные коэффициенты, учитывающие влияние критической скорости и степени нерасчетности.

Цель настоящей работы состоит в систематизации сведений о механизмах генерации шума при сбросе пара, рассмотрении применяемых конструктивных решений для паровых глушителей и обосновании необходимости разработки единой методики расчета такого рода глушителей.

**Материалы и методы.** Паровые глушители подразделяются на диссипативные (поглощение пористыми материалами), реактивные (изменение акустического сопротивления в камерах расширения) и комбинированные. Основные принципы проектирования: последовательное увеличение проходных сечений, равномерное распределение скорости и достижение атмосферного давления до выходного сечения [3–7].

Ниже приведена схема типового глушителя сброса пара в атмосферу (рис. 1). Схема отражает часто встречающуюся трехэлементную модульную конструкцию: диффузор, камера выравнивания, секция звукопоглощающих элементов. Поток входит через входной фланец, проходит через входной диффузор (с расширением и перераспределением скорости), далее попадает в камеру выравнивания, в которой скорость потока снижается за счет расширения. Камера выравнивания акустически выполняет реактивную функцию (ослабление низких частот), а также служит распределителем потока на вход секции панелей. Затем поток проходит через секцию звукопоглощающих панелей, после чего выходит в атмосферу через верхний выход с защитным оголовком.

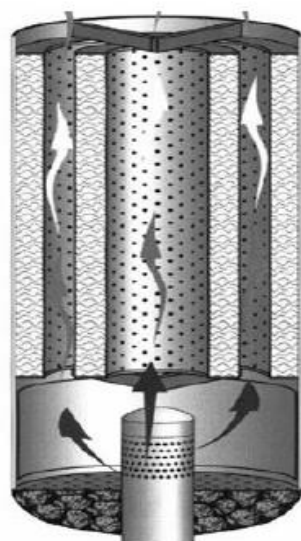


Рис. 1. Схема глушителя сброса пара

Глушители фирмы VANEC (рис. 2) представляют собой простые трехэлементные модульные конструкции. Они интересны тем, что при достаточно простой трехзвенной схеме обеспечивают широкий диапазон исполнений и серийных характеристик. Они состоят из диффузора (изменение направления потока и ступенчатое расширение до атмосферного давления), камеры выравнивания (реактивное подавление низкочастотного шума) и секции звукопоглощающих панелей (высокочастотное поглощение). Подбор модели осуществляется по комплексу параметров: расход, давление, температура, спектр шума, допустимый перепад давления и расстояние до жилой застройки. Конструкция обеспечивает широкий диапазон масс (от 5 до 13 835 кг) и акустической эффективности до 40 дБ и более при относительно простой и технологичной схеме [8].

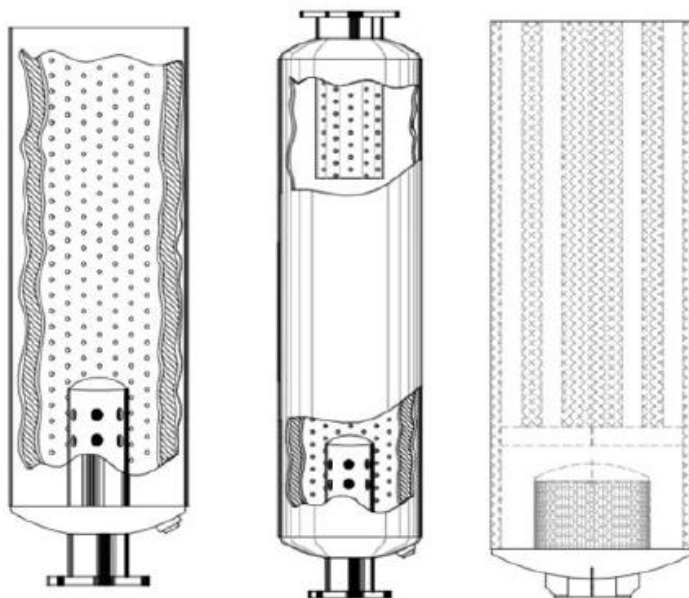


Рис. 2. Конструктивные схемы глушителей сброса пара компании Vanec

В настоящей работе использован обзорно-аналитический подход, основанный на систематизации отечественных и зарубежных исследований, посвященных акустике паровых выбросов и методам проектирования глушителей. В мировой практике исследование и разработка глушителей сброса пара проводится комплексно с применением трех основных групп методов: расчетных (аналитических и полуэмпирических), численного моделирования и экспериментальных исследований [3].

Основу составляют эмпирические и полуэмпирические зависимости для уровня звуковой мощности в зависимости от режима истечения (дозвуковой, околозвуковой, сверхзвуковой), учитывающие степень нерасчетности струи  $n = p_k/p_a$  и число Маха  $M = u_c/c_0$ . Эти зависимости учитывают расход, давление, температуру, плотность среды, а также геометрические параметры проточной части.

Экспериментальные методы включают как лабораторные исследования моделей, так и натурные измерения на энергетических объектах. Они используются для верификации расчетных зависимостей и численных моделей, а также для оценки акустической эффективности конкретных конструкций в реальных условиях эксплуатации. Измерения проводятся с учетом спектральных характеристик шума и условий его распространения [4–6].

Таким образом, современное исследование глушителей сброса пара базируется на сочетании расчетных методов, численного моделирования и экспериментальной проверки, что позволяет обеспечивать обоснованный выбор конструктивных решений при отсутствии универсальной нормативной методики.

**Результаты.** Численное моделирование является одним из ключевых инструментов современного проектирования глушителей. Для описания газодинамики потока применяются методы вычислительной гидродинамики (CFD), позволяющие анализировать распределение скоростей, давления и турбулентных характеристик. При этом для задач образования шума особое значение имеют нестационарные постановки, включая методы класса LES (Large Eddy Simulation), обеспечивающие воспроизведение крупномасштабных вихревых структур, ответственных за генерацию шума. Для оценки акустических характеристик используются как прямые методы вычисления звукового поля, так и гибридные подходы, сочетающие CFD-расчеты с акустическими аналогиями.

В качестве практического примера был проведен CFD расчет сброса воздуха в атмосферу из патрубков разных диаметров при разных значениях давления. Расчет проводился с помощью модуля Solidworks FlowSimulation. При настройке расчета были указаны вводные условия: Физическая модель — течение жидкости/газа; Тип задачи — внешняя; Текучие среды проекта — Air (воздух); Тип расчета — стационарный; Термодинамические параметры: Давление — 101325 Па, Температура — 293,2 К, Модель турбулентности — k-ε (ка-эпсилон). Для проведения расчета была задана модель патрубка диаметром 250 и 500 мм, длина патрубков была задана равной двум диаметрам. В качестве граничных условий было задано статическое давление на входе патрубка, равное 5 и 10 атмосферам, расчетная область была расширена по вертикали до интересующих границ. Тип задачи внешняя позволяет не задавать второе граничное условие, обычно требуемое в CFD расчетах, так как изначально заданные термодинамические параметры уже являются замыкающим цепочку «вход-выход» условием. Количество элементов сетки составило 120 628 ячеек.

В ходе расчета были получены поля скоростей для разных конфигураций сброса: диаметры сбрасывающего патрубка 250 и 500 мм, давления 5 и 10 атм. В полученных полях скоростей наблюдаются различные эффекты. На выходе из патрубка наблюдается участок, где скорость газа превышает местную скорость звука и достигает примерно 600 м/с при давлении 5 атм и примерно 700 м/с при давлении 10 атм независимо от диаметра патрубка. В самом «факеле» сброса наблюдаются участки разряженного давления, вследствие которого формируются когерентные структуры, наблюдавшиеся

в других исследованиях [4]. Скорость внутри патрубков относительно равномерна и составляет около 300 м/с. Результаты расчета полей продольной скорости и давления при диаметре патрубка 500 мм показаны на рис. 3 и 4.

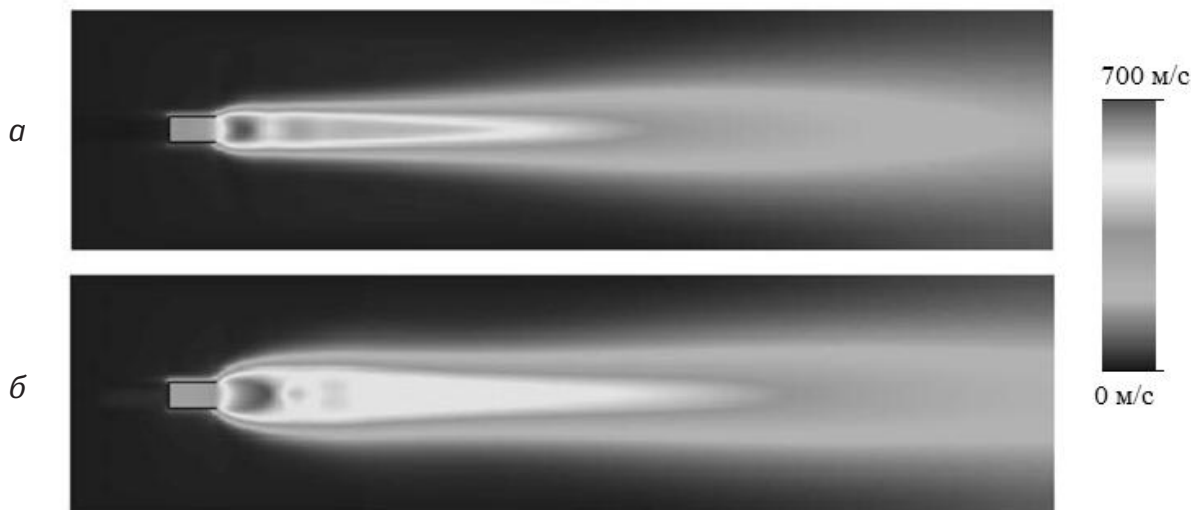


Рис. 3. Поля скоростей при сбросе воздуха под давлением 5 атм (а) и 10 атм (б)

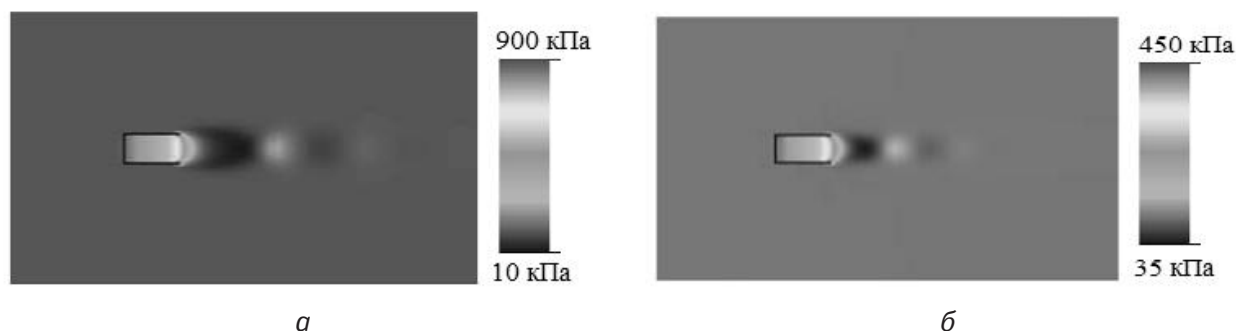


Рис. 4. Поля давлений при сбросе воздуха под давлением 5 атм (а) и 10 атм (б)

Введем в рассмотрение число Рейнолдса  $Re = vD_r/\nu$ , где  $v$  — характерная скорость потока, м/с;  $D_r$  — гидравлический диаметр;  $\nu$  — кинематическая вязкость среды. Для данных расчетных параметров число Рейнолдса достигает очень большой величины,  $Re = 10^7$ , что соответствует режиму устойчивой турбулентности. Именно этим обстоятельством обусловлена сложность полученных полей продольной скорости и давления, по сравнению с картинами полей, соответствующих ламинарному режиму истечения. Для сравнения пример такого ламинарного истечения, соответствующего числу Рейнолдса  $Re = 663$ , приведен на рис. 5.

**Обсуждение.** Полученные результаты подтверждают, что механизм генерации шума и рациональная конструкция глушителя напрямую зависят от режима истечения паровой струи. В настоящее время отсутствует единая общепринятая методика подбора паровых глушителей, которая одновременно

учитывала бы режим истечения, вклад клапанного и струйного шума, спектр исходного шума, условия распространения звука, гидравлическое сопротивление, компоновочные ограничения и требования надежности. На практике используются разрозненные подходы — отдельные расчетные формулы, результаты испытаний конкретных конструкций или внутренние алгоритмы производителей. Отмечается отсутствие национальных и международных стандартов, регулирующих проектирование промышленных глушителей, и применяет многофакторную компьютерную оптимизацию [8].

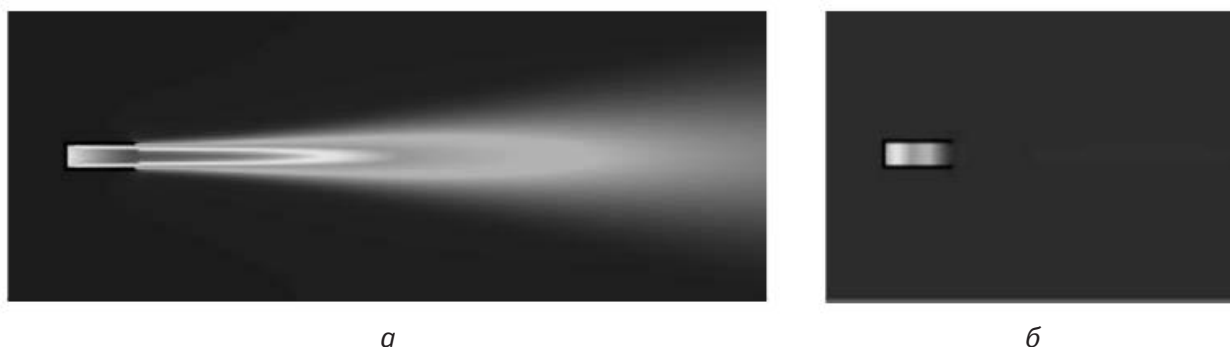


Рис. 5. Поля продольной скорости (а) и давления (б) при ламинарном сбросе воздуха

**Закключение.** Шум при сбросе пара в атмосферу формируется как минимум двумя взаимосвязанными механизмами: дросселированием потока в клапане и шумообразованием в самой струе. Доминирующий механизм зависит от режима истечения, а значит, конструкция глушителя должна выбираться прежде всего с учетом газодинамики выброса. Для дозвуковых режимов рациональны диссипативные и пластинчатые решения, а для сверхзвуковых недорасширенных струй необходимы комбинированные конструкции с поэтапным снижением давления до атмосферного. Вместе с тем в настоящее время отсутствует единая методика подбора паровых глушителей, и ее разработка должна рассматриваться как одно из актуальных направлений исследований в области промышленной акустики и теплоэнергетики. Такая методика должна связывать время сброса пара с объемом, площадью истечения, давлением и свойствами пара и на этой основе осуществлять подбор допустимых скоростей потока и сопротивления глушителя, а затем и его акустическую концепцию и геометрическую конфигурацию.

#### Список источников

- [1] Тупов В.Б. *Факторы физического воздействия ТЭС на окружающую среду*. Москва, Изд-во МЭИ, 2012, 284 с.
- [2] Юдин Е.Я., Борисов Л.А., Горенштейн И.В. и др. *Борьба с шумом на производстве: справочник*. Москва, Машиностроение, 1985, 399 с.
- [3] Григорьян Ф.Е., Перцовский Е.А. *Расчет и проектирование глушителей шума энергоустановок*. Ленинград, Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980, 120 с.

- 
- [4] Тараторин А.А. *Исследование излучения шума паровыми струями различных параметров на ТЭС и разработка мероприятий по его снижению*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2015, 119 с
  - [5] Тупов В.Б., Тараторин А.А. Результаты математического моделирования паровой струи, истекающей в атмосферу при различных режимах, влияющих на шумообразование. *Теплоэнергетика*, 2025, № 3, с. 59–66.
  - [6] Реев В.Г., Гунасекара У.Д.С. Расчет максимального звукового давления выброса пара из котлоагрегата ТЭЦ. *Вестник Северо-Восточного Федерального университета им. М.К. Аммосова*, 2024, т 21, № 2.  
<https://doi.org/10.25587/2222-5404-2024-21-2-71-76>
  - [7] Большаков В.А., Большаков М.В. *Глушитель шума выхлопной струи пара (варианты)*. Патент № RU 2586804 С1 РФ, 2016, бюл. № 16.
  - [8] VANECS. Vent & Blowdown Silencers. URL: <https://www.vanec.com/vent---blowdown-silencers.html> (accessed 03.04.2026).