Электронный журнал «Техническая акустика»
http://webcenter.ru/~eeaa/ejta

2 (2002) 9.1–9.6

В. И. Голованов, В. Н. Славянинов, В. К. Федоров

ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова
Россия, 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44, e-mail: eeaa@online.ru

Акустические характеристики большерасходного глушителя шума газовых струй

Получена 27.06.2002, опубликована 11.07.2002

Приведены результаты работ по разработке и экспериментальной проверке акустической эффективности большерасходного глушителя шума газовых струй. Глушитель предназначен для уменьшения шума при сбросе сжатых газов в окружающее пространство. Принцип работы основан на формировании структуры струи с меньшей шумностью путем разбиения цилиндрической струи на множество различных мелких струй, направленных перпендикулярно к исходной. Определена акустическая эффективность глушителя при различных величинах расходов и перепадов давлений рабочей среды. Показано, что чисто газодинамическим методом без использования каких-либо шумопоглощающих материалов можно обеспечить необходимое снижение уровней шума.

В процессе работы пневматических и пневмогидравлических систем различного назначения, таких, например, как системы магистральных газопроводов, системы сжатого воздуха промышленного назначения, периодически возникает необходимость сброса сжатого воздуха из различных участков таких систем в окружающее пространство за заданное время. Расходы воздуха на таких режимах могут лежать в пределах от 0,1 кг/с до 15 кг/с, а перепады давлений — от 0,05 МПа до 3 МПа. При этом диаметры трубопроводов в системах сжатого воздуха ограничены (как правило, не превышают 80 мм), так что скорости газовых струй могут достигать величины скорости звука.

Процесс истечения газовых струй с такими параметрами сопровождается повышенным шумообразованием. Величина уровней шума может быть оценена следующим образом.

В соответствии с теорией шумообразования турбулентных струй [1] акустическая мощность $W_{ак}$, излучаемая цилиндрической струей, пропорциональна скорости струи в 6–8 степени (в зависимости от величины скорости), квадрату плотности воздуха в струе и квадрату диаметра струи:

$$W_{ак} = 0{,}9 \cdot 10^{-5} \frac{\rho_c^2 V^6 D^2}{\rho_0 V_{зв}^3}, \text{ если } M = \frac{V}{V_{зв}} \le 0{,}5; \quad (1)$$

$$W_{ак} = 3{,}0 \cdot 10^{-5} \frac{\rho_c^2 V^8 D^2}{\rho_0 V_{зв}^5}, \text{ если } M = 0{,}5 \ldots 1, \quad (2)$$

где $W_{ак}$ — излучаемая струей акустическая мощность, Вт; ρ_c — плотность воздуха в струе, кг/м^3; V — скорость струи воздуха, м; D — диаметр струи, м; ρ_0 — плотность воздуха в окружающей среде, кг/м^3; $V_{зв}$ — скорость звука в окружающем пространстве, м/с.

Так, например, при истечении газовой струи на режиме с перепадом давления 2,5 МПа и расходом 10 кг/с расчетные (в соответствии с формулой (2)) общие уровни шума струи составляют величину порядка 140–150 дБ. При этом максимальные уровни шума струи соответствуют числам Струхаля ($Sh = fD/V$, f — частота, Гц), лежащим в диапазоне 0,2–0,5, что примерно соответствует полосе частот 2–4 кГц.

В связи с очень высокими уровнями шума воздушной струи при типовых величинах перепада давления и расхода задача уменьшения звуковой мощности газовых струй при сбросе сжатых газов из замкнутых объемов (без изменения режимов работы и схемно-конструктивного исполнения систем) является весьма актуальной.

Анализ формул (1) и (2) показывает, что добиться снижения шумности высокоскоростных турбулентных струй можно следующими способами:

– снижением скорости струи;
– уменьшением плотности воздуха в струе и ее диаметра;
– изменением структуры струи таким образом, чтобы преобразовать газовую струю с ярко выраженной направленностью в «газовое облако».

Снижение скорости является наиболее эффективным способом уменьшения шума струй, вследствие зависимости звуковой мощности от скорости в 6–8 степени.

Таким образом, для снижения шума газовых струй без уменьшения расходов рабочих сред необходимо использовать глушители. Традиционные глушители, принцип действия которых основан на эффектах поглощения или отражения акустической энергии, в данном случае неприемлемы, поскольку они не изменяют выходных параметров струи, определяющих ее шумообразование.

Поэтому для эффективного глушения шума газовых струй (с учетом минимизации размеров) необходимо применять устройства, преобразующие исходную струю и формирующие структуру струй с меньшей шумностью. При этом снижение звуковой мощности струи основано на следующих принципах, вытекающих из формул (1) и (2):

– снижение выходной скорости и плотности воздуха в струе посредством многократного увеличения суммарной площади выходных отверстий и ступенчатого дросселирования;
– преобразование направленной цилиндрической струи на множество разнонаправленных по всему окружающему пространству мелких струй, при этом

на выходе структура первоначальной струи за счет перемешивания мелких струек друг с другом и окружающим воздухом преобразуется фактически в «газовое облако», где интенсивность турбулентного шумообразования резко снижается.

Кроме этого, дополнительный эффект достигается за счет смещения спектра шума струи на выходе глушителя в область, лежащую за пределами слышимости человеческого уха.

Для проверки эффективности подобного подхода был разработан, изготовлен и испытан макетный образец глушителя с внутренним диаметром 80 мм, внешним диаметром 230 мм и длиной 570 мм, рассчитанный на расход 10 кг/с и перепад давления (разность давлений перед глушителем и в окружающей среде) до 2,5 МПа.

Данное устройство состоит из трех соосных цилиндров, перфорированных, как показано на рис. 1. Диаметры отверстий лежат в диапазоне 2–5 мм. Для обеспечения необходимого расхода суммарная площадь отверстий в каждом цилиндре значительно превышает площадь сечения внутреннего канала глушителя, так суммарная площадь отверстий во внешнем цилиндре превышает площадь сечения внутреннего канала (диаметром 80 мм) примерно в 10 раз. За счет этого происходит уменьшение выходных скорости струи и плотности воздуха в ней.

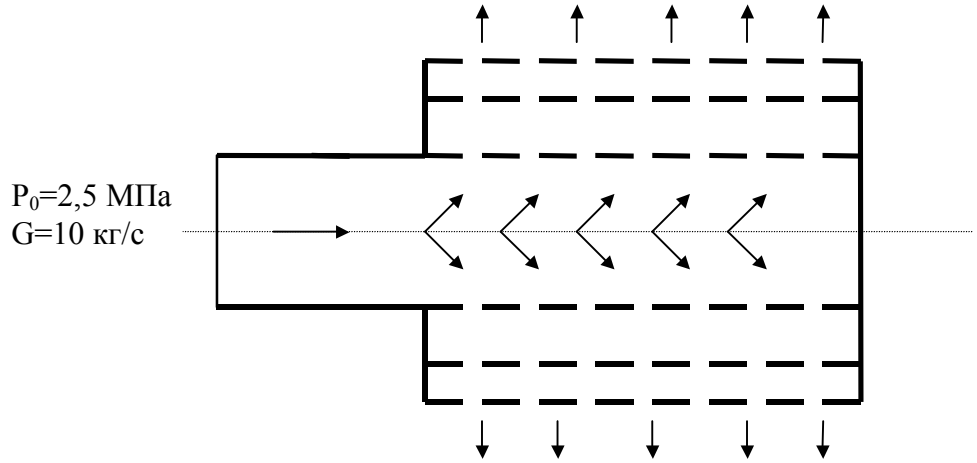

Рис. 1. Схема трехступенчатого глушителя шума газовых струй

На выходе глушителя вместо цилиндрической струи с мощным шумоизлучением формируется множество разнонаправленных струй. В процессе их перемешивания примерно на расстоянии нескольких диаметров выходных отверстий от внешней поверхности глушителя фактически происходит преобразование турбулентной газовой струи в «газовое облако».

При отсутствии глушителя (вместо глушителя патрубок диаметром 80мм) при перепаде давлений 2,5 МПа, расходе воздуха 10 кг/с скорость струи равна скорости звука (330 м/с), значения уровней звуковой мощности, рассчитанные на основе формулы (2) составляют 142 дБ, а максимум шумообразования находится в полосе частот 2–4 кГц.

При применении глушителя аэродинамические параметры струи изменяются; выходная скорость составит величину порядка 120 м/с. В этом случае расчеты по

формуле (1) дают для общего уровня звуковой мощности величину порядка 117 дБ, т. е. расчетная величина акустической эффективности глушителя составляет 25 дБ.

Экспериментальная проверка глушителя проводилась на установке, схема которой представлена на рис. 2. На вход глушителя подавался сжатый воздух давлением до 2,5 МПа. Измерения шума производились на расстоянии 1 м от выходного сечения патрубка или глушителя под углом 45° к оси струи.

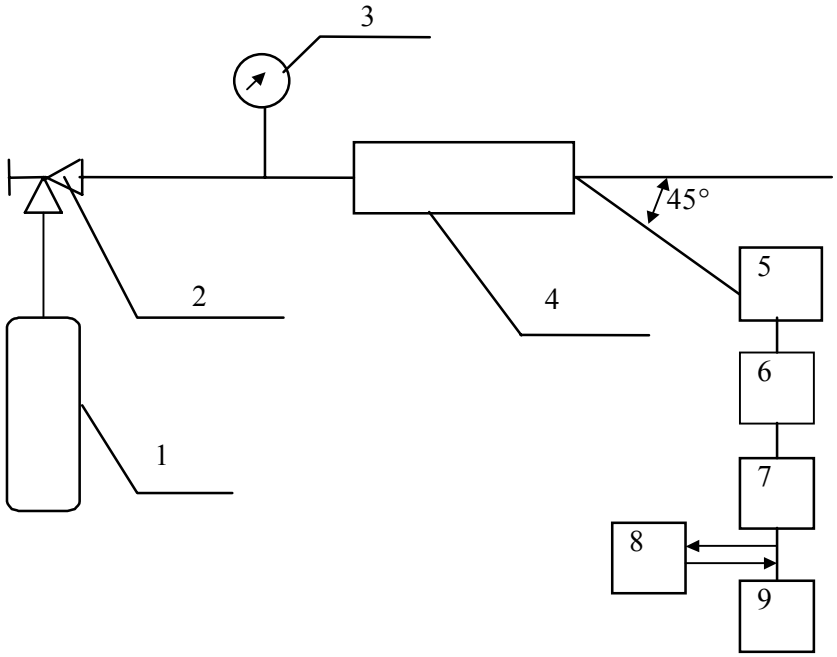

Рис. 2. Схема установки для измерений уровней воздушного шума в процессе испытаний глушителя

1 — емкость со сжатым воздухом; 2 — клапан регулирующий; 3 — манометр образцовый P=60 кгс/см^2; 4 — ГВШ либо патрубок (в случае имитации работы системы без глушителя); 5 — микрофон с предусилителем; 6 — измерительный усилитель; 7 — измерительный магнитофон; 8 — анализатор спектра 9 — графический регистратор

На рис. 3–5 представлены полученные результаты. На рис. 3 — уровни воздушного шума в октавных полосах частот для воздушной струи без глушителя и с глушителем при перепаде давления 2,5 МПа и расходе 10 кг/с, на рис. 4 — расчетные и экспериментальные зависимости уровней шума струи от числа Струхаля, на рис. 5 — зависимость уровней шума газовой струи от расхода при истечении через патрубок и через глушитель.

Из рисунков видно, что акустическая эффективность глушителя составила 20 дБ по общему уровню шума и 25–28 дБ в октавных полосах частот 1–2 кГц при перепаде давлений на нем 2,5 МПа. Эти величины достаточно хорошо согласуются с предварительной оценкой акустической эффективности данного устройства, что подтверждает правильность оценки и выбора аэродинамических параметров струи в глушителе для предварительного расчета его акустической эффективности.

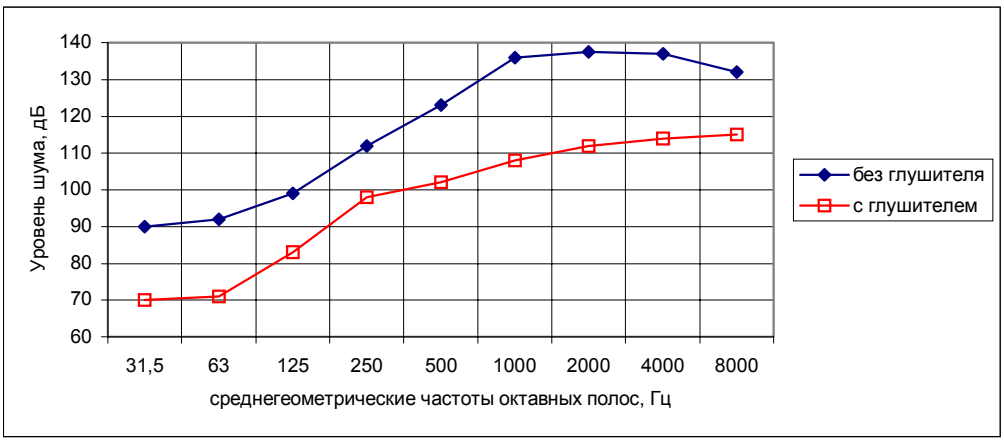

Рис. 3. Уровни воздушного шума в октавных полосах частот при сбросе воздуха через патрубок и через глушитель при давлении воздуха 2,5 МПа

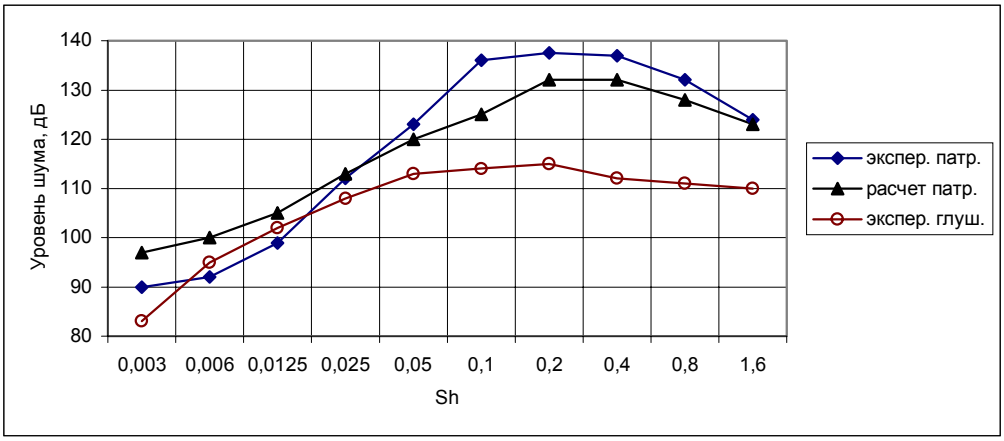

Рис. 4. Расчетные и экспериментальные зависимости уровней шума от числа Струхаля для воздушных струй, истекающих через патрубок и глушитель

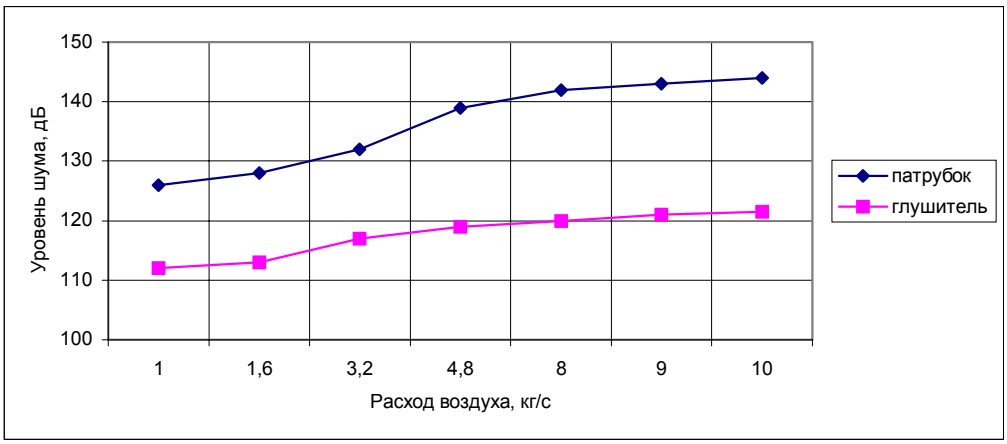

Рис. 5. Зависимость уровней воздушного шума газовых струй от расхода при истечении через патрубок и через глушитель

Кроме этого, из рис. 3 видно смещение частотного максимума шумоизлучения струи, формируемой глушителем, по сравнению с цилиндрической струей из октавной полосы частот 2 кГц в полосу частот 8 кГц.

Разработанный глушитель обеспечивает необходимую акустическую эффективность во всем диапазоне расходов воздуха от 1 кг/с до 10 кг/с (рис. 5).

Отличительной особенностью данного устройства является полное отсутствие в конструкции глушителя каких-либо пористых или шумопоглощающих материалов, заполняющих внутреннее пространство между ступенями. Использование таких материалов ограничило бы расход рабочей среды при тех же размерах глушителя. Весь эффект снижения шумности достигается за счет оптимизации структуры истечения струи, то есть основой эффекта является «чистая газодинамика».

Подобные устройства могут быть использованы в любых пневматических и пневмогидравлических системах для снижения шумности газовых струй при сбросе сжатого воздуха. Вследствие простоты и надежности в эксплуатации подобных устройств целесообразно устанавливать их на все концевые трубопроводы в системах со сжатым воздухом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авиационная акустика. Под ред. А. Г. Мунина, В. Е. Квитки. М., «Машиностроение», 1973 г.