

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЛУШИТЕЛЯ ШУМА ВЫХЛОПА ПНЕВМОСИСТЕМ

© 2004 А.А. Иголкин<sup>1</sup>, А.Н. Крючков<sup>2</sup>, Е.В. Шахматов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет

<sup>2</sup>Институт акустики машин

Рассмотрены основные принципы снижения шума выхлопа пневмосистем. Обоснована целесообразность снижения скорости выхлопной струи, а также разбиение ее на множество разнонаправленных струек, посредством применения глушителя шума. Разработана математическая модель расчета уровня шума, выхлопной струи пневмосистемы с учетом установки глушителя шума, позволяющая учитывать переходные процессы в пневмосистеме. Представлены результаты моделирования переходных процессов, а также расчет эффективности глушителя шума. Проведено сравнение расчетных данных падения давления в пневмоемкости с экспериментальными.

В целях создания эффективных конструкций пневмоглушителей, а также снижения затрат на их проектирование и доводку необходимо создание математических моделей и методик расчета таких устройств. Решение данной задачи существенно затруднено вследствие сложности и малоизученности взаимодействия газодинамических и акустических процессов в элементах глушителей. Необходимо отметить факт отсутствия в настоящее время адекватных математических моделей и методик расчета рассматриваемых устройств.

Расчетно-экспериментальные модели позволяют получить удовлетворительные результаты на основании многочисленных экспериментов и некоторых допущений.

Из литературных источников [1, 2, 3] известно, что акустическая мощность  $W$ , излучаемая цилиндрической струей, пропорциональна скорости струи в 6-8 степени (в зависимости от величины скорости), квадрату плотности воздуха в струе и квадрату диаметра струи:

$$W = k_0 \frac{\rho_c^2 U_c^8 D^2}{\rho_0 c_0^5}, \quad (1)$$

$k_0$  – коэффициент пропорциональности;  
 $k_0 = 3 \cdot 10^{-5}$  для модельных струй;  
 $k_0 = 1,5 \cdot 10^{-4}$  для натуральных струй;  
 $\rho_c$  – плотность среды в струе;

$U_c$  – скорость истечения;

$D$  – диаметр среза выхлопного сопла;

$\rho_0$  – плотность окружающей среды;

$c_0$  – скорость звука в окружающей среде.

Анализ закона восьмой степени показывает, что снижение уровня шума высокоскоростных турбулентных струй возможно за счет:

– снижения скорости струи;

– уменьшения плотности воздуха в струе;

– уменьшения диаметра струи;

– изменения структуры струи таким образом, чтобы преобразовать газовую струю с ярко выраженной направленностью в газовое “облако”, направленное концентрически от исходной струи.

Снижение скорости является наиболее эффективным способом уменьшения шума струй, вследствие зависимости звуковой мощности от скорости в 6-8 степени. В качестве глушителя шума часто применяют перфорированные насадки (рис 1).

Из формулы (1) следует, что снижение звуковой мощности струи может быть основано на следующих принципах, вытекающих:

– снижение выходной скорости и плотности воздуха в струе посредством многократного увеличения суммарной площади выходных отверстий и ступенчатого дросселирования;

– преобразование направленной ци-

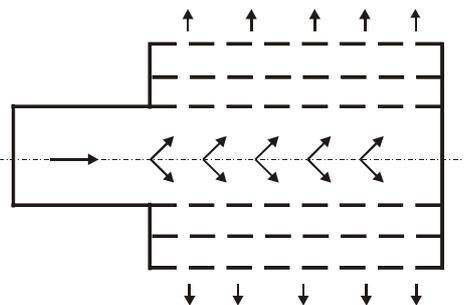


Рис. 1. Схема преобразования исходной струи в перфорированном насадке

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 высоких частот.

Исследования структуры потока в зоне смешения струй, истекающих из перфорированного насадка [1], показали, что схематично течение можно представить в виде совокупности двух участков (рис. 2). В первом,

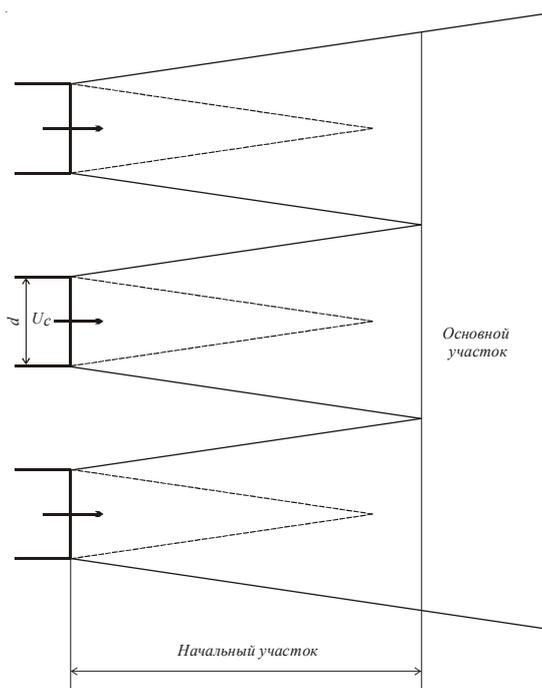


Рис. 2. Схема истечения выхлопного потока из многотрубчатого насадка

или начальном, участке истечение струек из каждой трубки происходит без какого-либо взаимодействия, т. е. независимо друг от друга. Длина начального участка определяется диаметром отверстий  $d$ , расстоянием между ними, условиями эжектирования воздуха между трубками и режимом истечения выхлопного потока. Течение во втором, или основном, участке можно представить в виде части некоторой эквивалентной круглой струи, параметры которой определяются из условия постоянства количества движения. В пределах начального участка внешние струйки осуществляют экранирование шума внутренних струек. Вследствие этого интенсивность излучения звука в окружающее пространство от внутренних струек ослабевает, а суммарная акустическая энергия начального участка меньше суммы акустических энергий всех струек в пределах этого участка. Частота максимального шума начального участка превышает частоту максимума в спектре шума исходной круглой струи. Увеличение числа отверстий и, следовательно, уменьшение их диаметра вызывает смещение спектра шума в область более высоких частот. Максимальное снижение уровней шума наблюдается при величине расстояния между отверстиями, равной диаметру отверстия. Уменьшение расстояния между отверстиями приводит к быстрому сливанию отдельных струек в единый турбулентный поток и, следовательно, уменьшению акустического эффекта. В то же время чрезмерное увеличение этого расстояния приводит к преобразованию струек в совокупность обычных свободных струй. В этом случае сумма акустических мощностей струек становится равной акустической мощности исходной струи, а практически единственный акустический эффект от применения многотрубчатого насадка заключается в перемещении спектра шума выхлопного потока в высокочастотную область.

Не менее важным показателем, кроме снижения уровня шума глушителем, является влияние установки глушителя на быстродействие пневмосистемы. Известно, что установка глушителя шума выхлопа увеличивает время опорожнения пневморесивера, то есть приводит к снижению быстродействия

системы. В некоторых случаях это недопустимо по техническим требованиям предъявляемым к пневмосистемам. К тому же снижение быстродействия пневмосистемы, например прессового оборудования, может привести к производственным травмам.

В связи с вышесказанным при моделировании глушителя шума необходимо знать не только то на сколько снизился шум выхлопа, но и параметры быстродействия системы после установки глушителя шума.

Разработанная авторами экспериментально-аналитическая модель пневмоглушителя шума выхлопа базируется на уравнениях энергии и движения сжатого воздуха в элементах пневмосистемы (рис. 3).

При разработке модели были приняты следующие допущения:

- вся акустическая мощность выхлопа создается только совокупностью струек из наружной перфорированной оболочки пневмоглушителя;
- акустическая мощность, излучаемая внутренними источниками шума пневмоглушителя, поглощается в засыпном материале;
- коэффициенты расхода всех проходящих

сечений постоянны.

Система нелинейных дифференциальных уравнений записывается для каждой полости рассматриваемой пневмосистемы с установленным на ней глушителем шума. Далее по формуле Лайтхилла с уточненным авторами коэффициентом  $K$  рассчитывается суммарная акустическая мощность излучаемая совокупностью струек, истекающих из наружной перфорированной оболочки глушителя

$$\begin{cases} \frac{dp_i}{dt} = (G_{вхi}RT_{i-1} - G_{выхi}RT_i) \frac{k}{V_i} \\ W = K \frac{\rho_c^2 U_c^8 D^2}{\rho_0 c_0^5} \\ L_{\Sigma} = 10 \lg(10^{0,1L_1} + 10^{0,1L_2} + \dots + 10^{0,1L_n}) \\ L = 10 \lg W + \Delta - 20 \lg R + 10 \lg \varphi \end{cases} \quad (2)$$

где  $p_i$  - давление в рассматриваемой полости;  
 $G_i$  - массовый расход воздуха;  
 $T_i$  - температура воздуха в магистрали;  
 $k$  - показатель адиабаты;  
 $V_i$  - объем рассматриваемой полости;  
 $R$  - газовая постоянная,

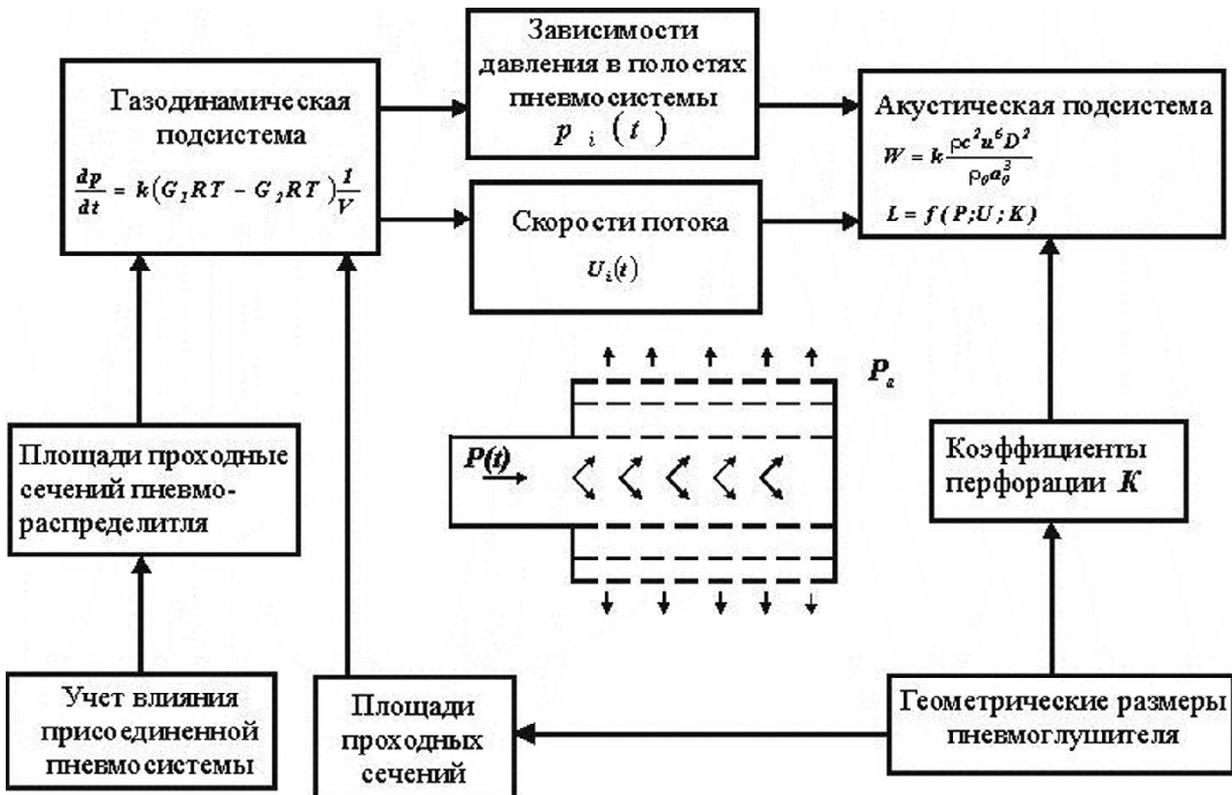


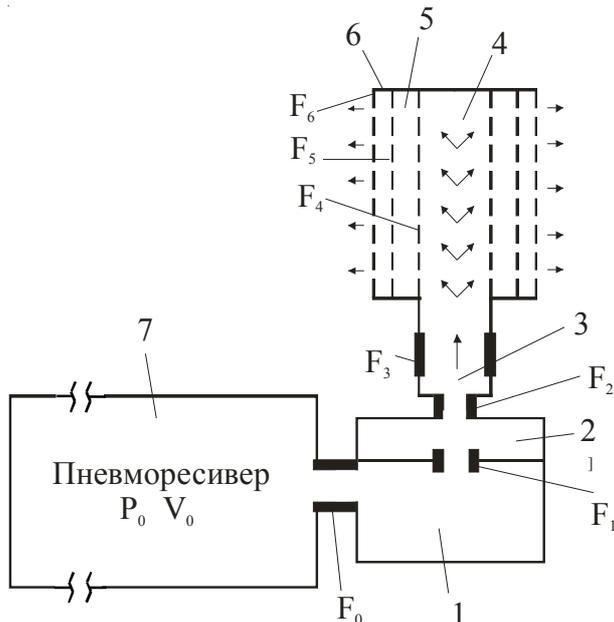
Рис. 3. Основные компоненты математической модели глушителя шума

( $R = 287$  Дж/ кг К для воздуха при  $T_m = 290$  К)  
 $K$  – эмпирический коэффициент пропорциональности, полученный авторами в результате серии экспериментов.

На рис. 4 представлена расчетная схема глушителя шума в составе пневмосистемы. На основании разработанной математической модели проведен расчет переходных процессов в пневмосистеме с учетом установки глушителя шума, с целью исследования влияния установки глушителя шума на быстрдействие пневмосистемы.

На рис. 5, 6 представлены расчетные зависимости давления в пневмоёмкости при различных условиях, полученные в результате решения системы нелинейных дифференциальных уравнений

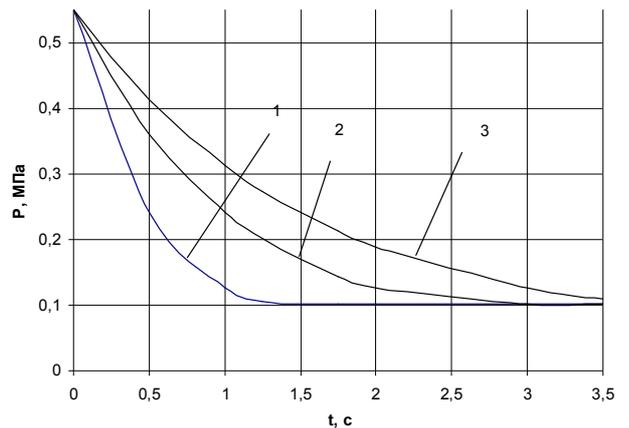
На рис. 7 представлены результаты теоретического исследования влияния установ-



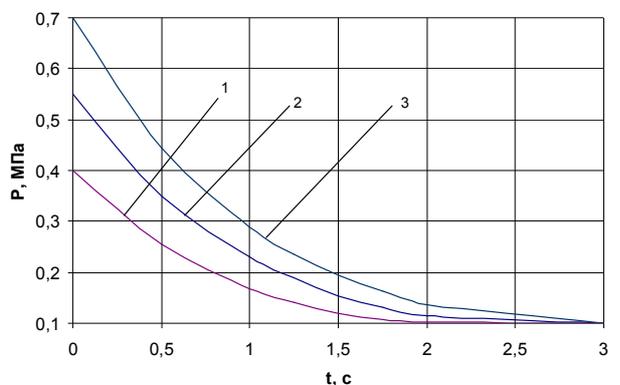
**Рис. 4.** Расчетная схема глушителя шума в составе пневмосистемы:

1 – полость в пневмораспределителе перед клапаном ( $P_1, V_1$ ); 2 – полость в пневмораспределителе после клапана ( $P_2, V_2$ ); 3 – полость в пневмораспределителе перед входом в пневмоглушитель ( $P_3, V_3$ ); 4 – полость центральной трубы ( $P_4, V_4$ ); 5 – расширительная полость пневмоглушителя ( $P_5, V_5$ ); 6 – полость с засыпным материалом ( $P_6, V_6$ ); 7 – пневморесивер ( $P_0, V_0$ );

$F_0$  – сечение на выходе из емкости;  $F_1$  – кольцевое сечение проходного сечения клапана;  $F_2$  – сечение в пневмораспределителе;  $F_3$  – вход в центральную трубу;  $F_4$  – отверстия центральной трубы;  $F_5$  – отверстия внутренней перфорации



**Рис. 5.** Расчетные зависимости давления при различных объемах пневмоёмкости: 1 – 100 л; 2 – 200 л; 3 – 300 л

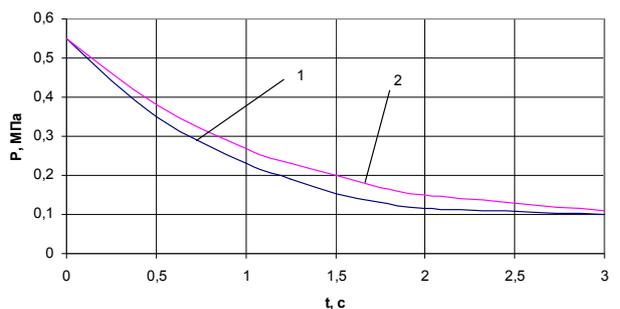


**Рис. 6.** Расчетные зависимости давления при различных начальных давлениях: 1 – 0,4 МПа; 2 – 0,55 МПа; 3 – 0,7 МПа

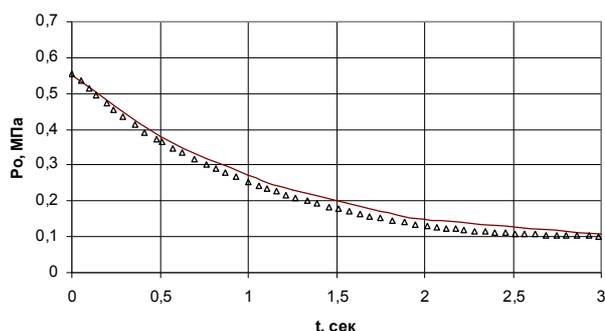
ки глушителя шума на переходные процессы в пневмосистеме.

Из рассмотрения рис. 7 видно, что при установке глушителя шума время падения давления в пневморесивере увеличивается. Для сравнения расчетной зависимости времени падения давления в пневморесивере с экспериментальными данными были приняты следующие исходные данные:

– начальное давление в пневморесивере



**Рис. 7.** Расчетные зависимости давления при различных начальных давлениях: 1 – без глушителя; 2 – с глушителем



**Рис. 8.** Зависимость давления в пневмоемкости от времени опорожнения:  
 — расчет     $\Delta$  — эксперимент

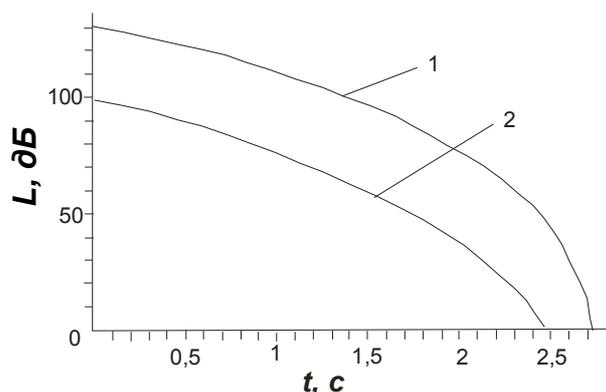
ре  $p_0 = 0,55$  МПа;  
 — емкость пневморесивера  $V=250$  л;  
 — истечение происходит через глушитель [4] с присоединительным размером 2".

Анализ рис. 8 показывает хорошую сходимость результатов моделирования с экспериментальными данными.

На базе разработанной модели проведен расчет шума выхлопа пневмосистемы с глушителем и без него. На рис. 9 представлена расчетная зависимость уровня шума от времени.

Расчетная эффективность глушителя шума составляет 30 дБ, что соответствует реальной конструкции глушителя [4].

Таким образом, разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать эффективность глушителя шума и время падения давления в пневморесивере с учетом установки глушителя шума выхлопа. Расчетные зависимости давления хорошо совпадают с экспериментальными данными, что свидетельствует об адекватности предложенной методики расчета.



**Рис. 9.** Расчетные значения уровня шума создаваемого глушителем в зависимости от времени опорожнения пневмоемкости:  
 1 – без глушителя; 2 – с глушителем

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аэродинамические источники шума/ А. Г. Мунин, В. М. Кузнецов, Е. А. Леонтьев. М.: Машиностроение, 1981.
2. Авиационная акустика: В 2-х ч. Ч. 1. Шум на местности дозвуковых пассажирских самолетов и вертолетов/ А. Г. Мунин, В. Ф. Самохин, Р. А. Шипов и др. М.: Машиностроение, 1986.
3. Расчеты и измерения характеристик шума, создаваемого в дальнем звуковом поле реактивными самолетами. М.: Машиностроение, 1968.
4. *Заболотный Н. Г., Крючков А. Н., Назаров О. В., Шахматов Е. В., Иголкин А. А.* Пневмоглушитель. Свидетельство на полезную модель № 28189 от 10.07.2002.
5. ГОСТ 25144 – 82. Пневмоглушители. Технические условия. Издательство стандартов, 1982.

## MATHEMATICAL MODEL OF AN EXHAUST OF PNEUMATIC SYSTEMS MUFFLER

© 2004 A.A. Igolkin<sup>1</sup>, A.N. Kruchkov<sup>2</sup>, E.V. Shakhmatov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Samara State Aerospace University

<sup>2</sup> Institute of Acoustic of Mashine

In the article the main principles of lowering of a noise of an exhaust of pneumatic systems surveyed. The expediency of lowering of exhaust speed of an exhaust jet, and also splitting it on set many direction jets, by means of application of a silencer is justified. The mathematical model of calculation of a noise level created exhaust jet designed in view of the installation of a silencer also permitting to calculate transients in the pneumatic system. The outcomes of simulation of transients, and also calculation of efficiency of a silencer are shown. Matching calculation datas of pressure drop in pneumocapacity with experimental is carried out.