

УДК 504.6

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭЖЕКТОРНОГО АЭРОДРОМНОГО ШУМОГЛУШИТЕЛЯ НА ЕГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

О.А. КАРТЫШЕВ

По заказу редакционной коллегии

Статья представлена доктором технических наук, профессором Чинючиным Ю.М.

Приведены и обобщены результаты аналитических и экспериментальных исследований газодинамических и акустических характеристик эжекторного аэродромного шумоглушителя.

**Ключевые слова:** эжекторный аэродромный глушитель шума, акустическая эффективность, газодинамические характеристики.

### Введение

Применение аэродромных глушителей шума, дефлекторов, экранов, предназначенных для снижения воздействия шума от работающего авиационного двигателя, значительно улучшает акустический климат, например, в зоне запуска и опробования силовых установок (СУ). Внедрение комплекса мероприятий по снижению шума, как правило, начинается с установки аэродромных глушителей шума (далее - АГШ или глушители). Акустическими характеристиками глушителей являются следующие величины:  $\Delta L$  - снижение шума глушителем (разность уровней звуковой мощности на выходе измерительной системы до и после установки глушителя), дБ;  $L_w$  - уровень звуковой мощности собственного шума глушителя, дБ;  $\Delta P_{полн}$  - потери давления в глушителе, Па [1]. Ряд конкретных практических задач по обоснованию и применению надежно могут быть решены только с привлечением результатов экспериментальных исследований [2,3]. Необходимы специфические подходы, учитывающие как высокие скорости и температуры газовых потоков, так и высокие уровни их звуковой мощности [4-6].

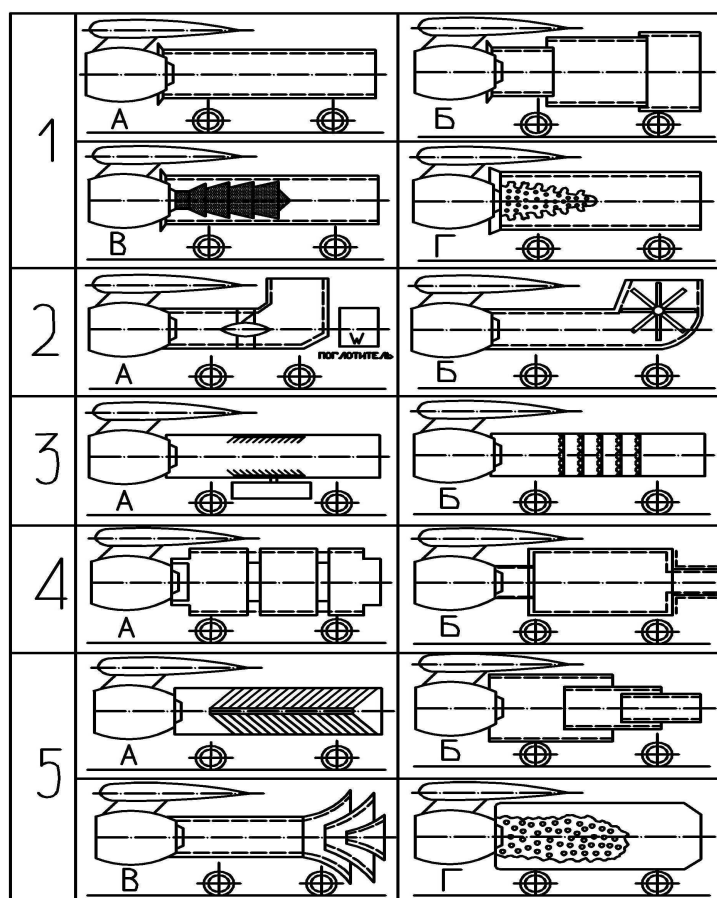
### Классификация глушителей шума

Глушители принято подразделять на глушители всасывания, выхлопа и комбинированные (рис. 1).

Первая группа - эжекторные глушители - могут иметь одноступенчатый (схема 1А) и многоступенчатый цилиндрический насадок (схема 1Б), покрытый внутри звукопоглощающим материалом, с применением активных турбулизаторов (схема 1В, схема 1Г).

Вторая группа - глушители с лопаточными устройствами. В них поток газа раскручивает установленную в цилиндрической насадке со звукопоглощающей облицовкой свободную или нагруженную турбину (схема 2А), ротационный смеситель или свободный турбовентильатор (схема 2Б). Вращающиеся лопатки препятствуют прямому акустическому излучению. Акустическая эффективность таких глушителей может достигать порядка 20 дБА снижения уровня шума при условии повышенного внутреннего звукопоглощения.

Третья группа - глушители с принудительным подмешиванием дополнительной массы. В цилиндрическую часть таких глушителей впрыскивается вода (схема 3А) или пена (схема 3Б, [7]), что способствует снижению температуры и скорости потока в выходном сечении глушителя. Иногда на выходе облицованного изнутри глушителя впрыскивается сжатый воздух. Акустическая эффективность глушителей этой группы составляет не более 10 дБА снижения уровня шума.



**Рис. 1.** Схемы различных шумоглушащих устройств выхлопа

Четвертая группа - камерные глушители. Они имеют одно- и многокамерные секции, облицованные изнутри звукопоглощающими материалами (схема 4А). С увеличением количества камер акустическая эффективность глушителя повышается. Отдельные камеры могут иметь регулируемые устройства для перепуска газа и изменения объема полости (схема 4Б).

Пятая группа - многоструйные глушители. Эти глушители могут быть выполнены по схеме с внутренним и внешним разделением потока дифференциальными выходными устройствами (схема 5А; схема 5Б, схема 5В) или с применением перфорированного насадка (схема 5Г) [8]. Реализованный в них активный принцип шумоглушения направлен на интенсификацию процесса смешения газового потока с окружающим воздухом, уменьшение размеров вихрей, повышение частоты акустического излучения, создание течения большинства струй в спутном потоке, изменение диаграммы направленности шума. Акустическая эффективность таких глушителей достигает 30 дБА снижения уровня шума в области частот 125...500 Гц.

Выбор конструктивных решений АГШ определяется требуемой акустической эффективностью и условиями эксплуатации. Наибольшее признание получили эжекторные схемы АГШ с внутренней облицовкой камеры смешения (КС) специальными звукопоглощающими конструкциями. Эжекторное подключение глушителя выхлопа к двигателю не создает повышенного противодавления на срезе сопла двигателя, исключает температурные и вибрационные нагрузки на двигатель, существенно упрощает процедуру стыковки глушителя с двигателем.

### **Теоретическая акустическая эффективность эжекторных глушителей**

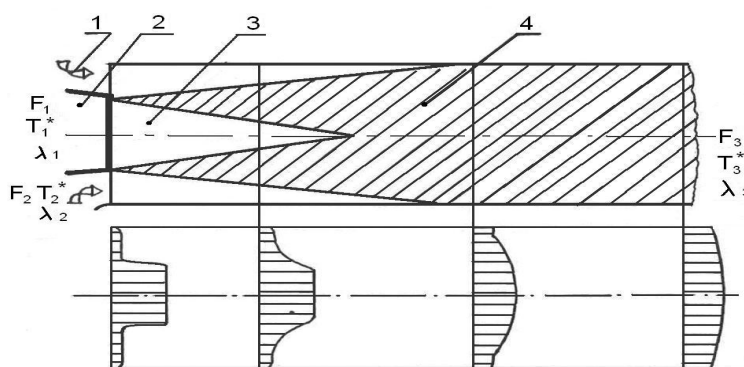
Наиболее предпочтительными для глушителей шума струи являются схемы с низкими значениями геометрического параметра эжектора - отношения площадей активного и пассивного

потоков -  $\alpha \sim 0,07 \dots 0,1$  [9]. С увеличением геометрического параметра, т.е. с уменьшением поперечного сечения камеры смешения эжектора, коэффициент эжекции  $n$  и акустическая эффективность слушателя эжекторного типа снижаются. Однако в ряде случаев возможно лишь применение глушителей, максимальные значения  $\alpha$  которых значительно превышают указанные выше и находятся в пределах  $0,3 \dots 0,45$ .

Ограничение площади поперечного сечения глушителя приводит к снижению расхода эжектируемого воздуха и эффективности глушителя. Если акустическая эффективность глушителей низконапорной эжекторной схемы составляет  $5 \dots 8$  дБА при длине КС не менее 8 калибров, то эффективность глушителей высоконапорной схемы не более 3 дБА. В качестве основного метода повышения акустической эффективности высоконапорного эжекторного глушителя шума струи предложено применение специальных механических устройств в конструкции АГШ выхлопа. В связи с этим возникает необходимость исследования степени влияния внесения дополнительного сопротивления на входе и внутри КС эжектора на повышение акустической эффективности последнего.

Для решения задачи была создана расчетная имитационная модель эжектора с цилиндрической камерой смешения. Исходными данными при расчетах являлись параметры газа на срезе сопла двигателя, а также степень расширения газа в сопле  $\pi_c$ . Для расчета эжектора исходными данными были: геометрический параметр эжектора  $\alpha$ , коэффициенты восстановления полного давления на входе  $\sigma_2^*$  и в КС  $\sigma_3^*$  АГШ, которые определялись из следующих выражений (расчетная схема на рис. 2):

$$\sigma_2^* = \frac{p_2^*}{p_1^*} = \frac{q(\lambda_2)}{q(\lambda_1)}; \quad \sigma_3^* = \frac{p_3^*}{p_1^*} = \frac{q(\lambda_3)}{q(\lambda_1)} \quad (1)$$



**Рис. 2.** Расчетная схема и поля скоростей в камере смешения (эжекторе):  
1 – эжектирующий воздух; 2 – сопло; 3 – ядро струи; 4 – камера смешения

Оценка акустической эффективности эжекторного глушителя производилась по разнице акустической мощности струи газа на входе и выходе из КС с учетом выражения

$$\Delta L = 10 \log \frac{\rho_1^2 u_1^8 F_1}{\rho_3^2 u_3^8 F_3}, \quad (2)$$

которое можно представить в виде

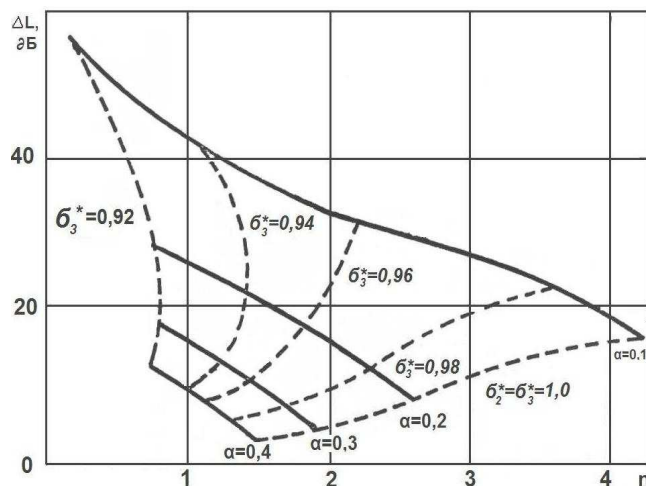
$$\Delta L = 10 \log \left[ \frac{p_1^{*2}}{(\sigma_2^* \sigma_3^* p_1^{*2})} \frac{\varepsilon^2(\lambda_1)}{\varepsilon^2(\lambda_3)} \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_3} \right)^8 \left( \frac{T_3^*}{T_1^*} \right)^2 \frac{\alpha}{1+\alpha} \right]. \quad (3)$$

Исходными данными для исследования являлись параметры струи двигателя АИ-25 в стандартных атмосферных условиях. Геометрический параметр АГШ и вносимое дополнительное

сопротивление, выраженное через коэффициенты восстановления полного давления, задавались в диапазоне

$$\sigma_1^* = 0,1 \dots 0,6; \quad \sigma_2^* = 0,92 \dots 1,0; \quad \sigma_3^* = 0,92 \dots 1,0.$$

Номограмма, приведенная на рис. 3, дает наглядное представление о возможном диапазоне изменения акустической эффективности глушителей эжекторной схемы и расхода эжектируемого воздуха при внесении дополнительного сопротивления в канал КС с различными значениями геометрического параметра эжектора.

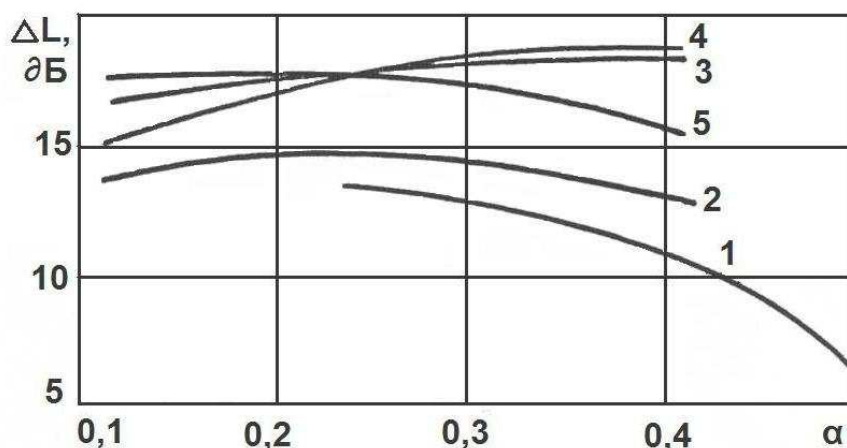


**Рис. 3.** Номограмма изменений акустической эффективности и коэффициента эжекции глушителя от геометрического параметра и вносимых потерь полного давления в камеру смешения эжектора

### Модельные исследования эффективности эжекторных глушителей

Экспериментальные исследования проводились на специальном стенде, состоящем из следующих элементов: генератора активного газа с ресивером; подводящего тракта активного газа и форкамеры с активным соплом; регулирующего дросселя; исследуемой модели АШ со сменными элементами; измерительной аппаратуры. Масштаб модели будущей натурной установки для двигателя АИ-25 самолета Як-40 с учетом основных конструктивных особенностей крепления двигателя к фюзеляжу самолета был выбран 1:30. Для создания потерь полного давления на входе устанавливался перфорированный насадок с изменяемой площадью подсоса наружного воздуха. В процессе эксперимента изменялась относительная площадь входа в эжектор в диапазоне  $\alpha = 0,04 \dots 0,5$ , а при установке ВПН в диапазоне  $\alpha = 0,13 \dots 0,48$ .

Из анализа результатов исследований показано, что влияние внесения дополнительного сопротивления в канал КС эжектора наиболее существенно влияет на изменение  $\lambda_3$ ,  $\Delta L$ . Это подтверждает важный вывод о том, что в конструкции АГШ эжекторной схемы для улучшения акустической эффективности глушителя лучше использовать внесение дополнительного сопротивления в КС, а не на входе в эжектор. Сопоставление величин коэффициентов модели показало, что наибольшее влияние на изменение акустической эффективности оказывает изменение геометрического параметра эжектора. Этот вывод согласуется с результатами имитационного моделирования и исследований [3, 10]. Выявлено, что для высоконапорных эжекторов наиболее приемлемым для установки в КС является турбулизатор, имеющий форму перфорированного конуса [4]. Это подтверждается исследованиями изменения акустической эффективности модели АГШ с различными турбулизаторами при изменении длины КС и геометрического параметра эжектора  $\alpha$  (рис. 4).



**Рис. 4.** Акустические характеристики эжекторного шумоглушителя при изменении параметра  $\alpha$  и установке различных турбулизаторов в канале смешения:  
 1- без турбулизаторов по данным [11]; 2- опыты автора;  
 2- 3-5 - с турбулизаторами типа "ПЦ", "ПК", "сетка" (коэффициент перфорации  $\bar{f}=0,82$ )

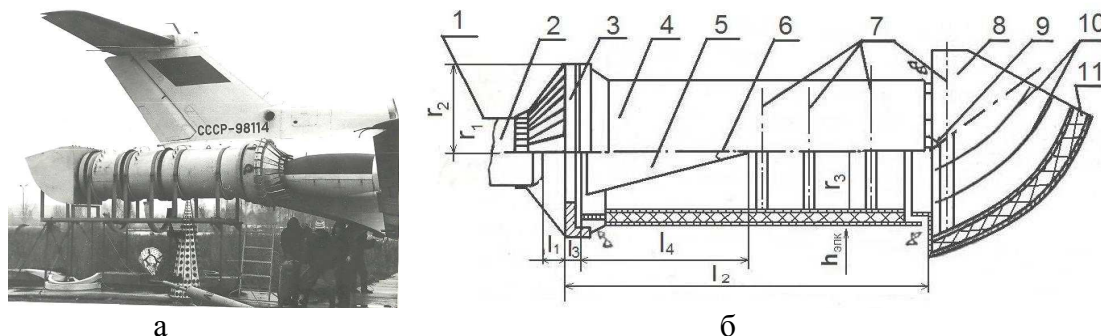
Экспериментальные исследования подтвердили результаты имитационного моделирования: установка в канал КС турбулизатора повышает акустическую эффективность эжектора, но в то же время приводит к снижению расхода эжектируемого пассивного потока. За счет установки турбулизатора в КС эжектора уменьшается протяженность эффективного объема турбулентной зоны, интенсифицируются процессы смешения, обеспечивается снижение скорости потока на выходе из КС, предоставляется возможность использования укороченной КС (5...6 калибров) в конструкции АГШ.

#### Результаты исследования характеристик натурного аэродромного глушителя

Проведенные в полевых условиях исследования газодинамических и акустических характеристик АГШ позволили установить взаимосвязь между ними, использование которой необходимо при разработке конструкций глушителей. С учетом результатов модельных испытаний был спроектирован и изготовлен натурный аэродромный глушитель шума выхлопа, выполненный на базе высоконапорной эжекторной схемы, эффективность которого была проверена на двигателе АИ-25 самолета Як-40. Внешний вид глушителя и его схема представлены на рис. 5. Характеристики шума в точках измерений ( $R=100$  м.) и измерение газодинамических параметров потока по тракту эжектора определялись при работе на характерных режимах двигателя без применения и с применением АГШ, выполненного на базе высоконапорного эжектора.

Анализ эффективности глушителя в различных его конфигурациях показывает, что с увеличением режима работы двигателя акустическая эффективность АШ возрастает, что соответствует данным модельного эксперимента. На взлетном режиме испытания АГШ для углов излучения  $\theta=120^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $150^\circ$  эффективность соответственно составляет:  $\Delta L_i=9$  дБ; 14,5 дБ; 20 дБ и  $\Delta L_A=4,5$  дБ; 13 дБ; 15 дБ. Экспериментальные данные, полученные при применении турбулизаторов в конструкции АГШ, свидетельствуют о том, что их использование позволяет увеличить акустическую эффективность глушителя при снижении шума во всем частотном диапазоне, причем наибольший эффект достигается на низких частотах. Эффективность глушителя в направлении максимального излучения на номинальном режиме работы двигателя до установки турбулизаторов составляла 10,5 дБ, а в конфигурации (б), (г) и (ж) соответственно - 17,5 дБ; 16,5 дБ; 15,5 дБ, коэффициенты сопротивления при этом равны  $\zeta=54$ ,  $\xi=43$ ,  $\zeta=39$ . Выявлено, что минимальное безопасное расстояние установки аэродромного глушителя шума, выполненного на базе высоконапорного эжектора с применением активных турбулизаторов относительно среза

сопла двигателя, составляет 0,2 калибра сопла. С увеличением этого расстояния до 1,2 калибра эффективность глушителя в дальнем акустическом поле падает на 4 дБ [6].



**Рис. 5.** Аэродромный глушитель шума: а - внешний вид; б - схема: 1 - мотогондола авиационного двигателя; 2 - входное устройство; 3 - эжектируемый воздух; 4 - камера смешения; 5 - турбулизатор; 6 - угол раскрытия турбулизатора; 7 - место расположения датчиков  $p^*$ ,  $p$ ,  $T^*$ ; 8 - выходное устройство; 9 - угол поворота потока; 10 - направляющие лопатки; 11 - ЗПК

Сравнение величин контролируемых параметров двигателя для случая применения АГШ и без АГШ показало, что без дополнительного сопротивления потоку в канале КС, обусловленного установкой турбулизатора, отклонений в величине контролируемых параметров  $n_{\text{КНД}}$  и  $T^*$ , не было [6]. При внесении дополнительного сопротивления в канал КС имело место отклонение контролируемых параметров, которое тем заметнее, чем больше величина вносимого сопротивления. Например, при внесении в канал КС сопротивления  $\zeta=54$  расход эжектируемого воздуха снизился в 2,8 раза, температура газов за турбиной возросла на 2%, частота вращения КНД снизилась на 1,4%. В этом случае запас газодинамической устойчивости КНД и КВД за счет смещения режимной точки на характеристики КНД уменьшился на 2%, а КВД - на 0,9% при условии, что границы устойчивой работы компрессоров остались неизменными. Установленное влияние испытанного АГШ в контролируемом диапазоне параметров двигателя находится на уровне допустимых пределов для двигателя АИ-25, тем не менее, вопрос влияния глушителя на двигатель нуждается в дальнейшем излучении.

#### Методика расчета основных параметров аэродромного глушителя шума выхлопа

Определение геометрического параметра эжектора  $\alpha$  осуществляется на основе конструктивных данных самолета (крепление силовой установки). Расчет акустической эффективности глушителя производится по формуле (3). При этом приведенная скорость на выходе из глушителя  $\lambda_3$ , в зависимости от режима работы двигателя и известного значения  $\alpha$ , определяется по следующему уравнению (для  $\sigma_3^*=1$ )

$$\begin{aligned} \lambda_3 = & -1,0982 + 0,9563\sigma_3^* + 3,6856\alpha - 0,9646\pi_c + \\ & + 0,5425\sigma_3^{*2} - 1,7892\alpha^2 + 0,2155\pi_c^2 - 2,5397\sigma_3^*\alpha + \\ & + 0,4693\sigma_3^*\pi_c + 0,3287\alpha\pi_c \end{aligned} \quad (4)$$

Сравнительная оценка полученного значения  $\Delta L$  с требуемым  $\Delta L_T$  должна производиться подбором  $\sigma_3^*$  до выполнения условия  $\Delta L \geq \Delta L_T$ , при этом величина  $\sigma_3^*$  ограничивается минимально-допустимым коэффициентом эжекции  $n_d$ . Определение величины сопротивления  $\zeta$ , вносимого турбулизатором, исходя из подобранного значения  $\sigma_3^*$ , осуществляется по формуле

$$\zeta = \frac{1 - \sigma^*}{\frac{k_3}{k_3 + 1} \varepsilon (\lambda_3) \lambda_3^2} \quad (5)$$

Определение коэффициента перфорации турбулизатора  $f_T$  по вычисленному значению  $\zeta$  производится с использованием диаграмм [12], причём для конусного турбулизатора значение  $f_T$  определится из выражения  $\bar{f}_e = f_0(1 - \sin \beta)$ . По предложенной методике в табл. 1 представлены результаты выполненных расчётов АГШ выхлопа для эксплуатируемых самолётов ГА.

Таблица 1

Основные расчетные конструктивные параметры АГШ выхлопа

| Тип ВС | Тип СУ  | $r_2$<br>м | $l_3$<br>м | $r_3$<br>м | $h_{зпк}$<br>м | $l_2$<br>м | $l_4$<br>м | $\beta^\circ$ | $\bar{f}_T$ для $\Delta L$ , дБ |      |      |
|--------|---------|------------|------------|------------|----------------|------------|------------|---------------|---------------------------------|------|------|
|        |         |            |            |            |                |            |            |               | 15                              | 20   | 25   |
| Ил-62М | Д-30КУ  | 1,6        | 12         | 1,2        | 0,15           | 0,65       | 3,5        | 15            | 0,3                             | 0,25 | 0,2  |
| Ту-154 | НК-8-2У | 1,4        | 12         | 1,1        | 0,15           | 0,60       | 3,5        | 15            | 0,3                             | 0,25 | 0,2  |
| Ту-134 | Д-30    | 0,95       | 10         | 0,8        | 0,10           | 0,40       | 2,4        | 10            | 0,25                            | 0,20 | 0,18 |
| Як-40  | АИ-25   | 0,70       | 6          | 0,5        | 0,10           | 0,30       | 1,5        | 7             | 0,23                            | 0,18 | 0,16 |

### Выводы

1. Увеличение акустической эффективности высоконапорного эжекторного глушителя шума струи может достигаться за счет внесения дополнительного сопротивления потоку как на входе, так и в камеру смешения эжектора, что приводит к снижению расхода эжектируемого воздуха и скорости потока на выходе из глушителя. Проведенные исследования позволили установить, что при равных значениях гидравлических потерь от дополнительного сопротивления на входе и в камере смешения эжектора, акустическая эффективность во втором случае значительно выше.

2. Установленные количественные и качественные зависимости коэффициента эжекции, скорости потока на выходе из глушителя и его акустической эффективности от геометрического параметра эжектора, степени сжатия активного потока, вводимого сопротивления на входе и в камеру смешения эжектора, позволяют обоснованно выбирать основные характеристики АГШ под заданные условия эксплуатации.

3. Проведено систематизированное экспериментальное исследование влияния конструктивных и режимных параметров АГШ на его эффективность, выявлены количественные зависимости изменения акустической эффективности АГШ от установки конусных турбулизаторов в канал камеры смешения. Так применение турбулизатора с коэффициентом перфорации  $f=0,175$  при работе двигателя АИ-25 на взлетном режиме привело к снижению расхода эжектируемого воздуха в 2,8 раза, при этом акустическая эффективность глушителя возросла на 7 дБА (12 дБА в направлении максимального излучения) по сравнению со случаем его отсутствия.

4. Экспериментально установлено влияние применения турбулизаторов на изменение спектральных характеристик шума; если полый шумоглушитель высоконапорной эжекторной схемы увеличивает высокочастотную составляющую шума, то с введением турбулизатора этого не происходит. Проведено систематизированное экспериментальное исследование влияния конструктивных и режимных параметров АГШ на его эффективность. Установка направляющих патрубков на отверстия турбулизатора позволяет уменьшить его длину и увеличить расход эжектируемого воздуха при практически той же эффективности АГШ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 28100-89. Защита от шума в строительстве. Глушители шума. Методы определения акустических характеристик. Государственный строительный комитет СССР. – М., 1989.
2. Картышев О.А., Медведев В.В. Выбор параметров аэродромных эжекторных глушителей шума / Труды ГосНИИ ГА. - 1986. - Вып. 250. - С. 36-40.
3. Картышев О.А. Результаты натурных испытаний аэродромного эжекторного шумоглушителя выхлопа / Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции по проблемам динамики, управления и безопасности полетов. - Рига, 1985.
4. Картышев О.А. Оценка влияния конструктивных особенностей эжекторного шумоглушителя на его газодинамические и акустические характеристики / Труды ГосНИИ ГА. - 1985. - Вып. 233. - С. 156-160.
5. Картышев О.А. Расчет потерь полного давления эжекторного шумоглушителя с перфорированным конусом / Труды ГосНИИ ГА. - 1985. - Вып. 236. - С. 80-83.
6. Картышев О.А. Особенности расположения эжекторного шумоглушителя и сопла реактивного двигателя при техническом обслуживании воздушных судов / Труды ГосНИИ ГА. - 1985. - Вып. 238. - С. 125-127.
7. Власов Е.В., Муниин А.Г., Фомин М.Г. и др. Передвижной аэродромный глушитель шума выхлопа реактивного двигателя. Оpubл. в Б.И., 1962, № 5.
8. Справочник проектировщика "Защита от шума" / под ред. Е.О. Юдина. - М.: Стройиздат, 1974.
9. Погодин А.С. Шумоглушающие устройства. - М.: Машиностроение, 1973.
10. Ененков В.Г., Пушкарев С.А. О влиянии газодинамических параметров на эффективность эжекторного шумоглушения. В кн.: Теория и практика охраны труда. – Рига: Изд-во РПИ, 1979.
11. Расчеты и измерения характеристик шума, создаваемого в дальнем звуковом поле реактивными самолетами / под ред. Л.И. Соркина. - М.: Машиностроение, 1968.
12. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. - М.: Машиностроение, 1975.

**RESEARCH OF INFLUENCE OF AIRFIELD EJECTOR NOISE MUFFLER STRUCTURAL FEATURES ON ITS GAS DYNAMIC AND ACOUSTIC PERFORMANCES****Kartyshev O.A.**

Results of analytical and experimental researches are shown and generalized for gas dynamic and acoustic performances of the airfield ejector noise muffler.

**Key words:** airfield ejector noise muffler, acoustic efficiency. gas dynamic performances.

**Сведения об авторе**

**Картышев Олег Алексеевич**, 1949 г.р., окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения (1976), кандидат технических наук, директор Авиационного экологического центра ФГУП ГосНИИ ГА, автор более 50 научных работ, область научных интересов – авиационная акустика, экология воздушного транспорта, история гражданской авиации.