

УДК 534.83:532.525.2

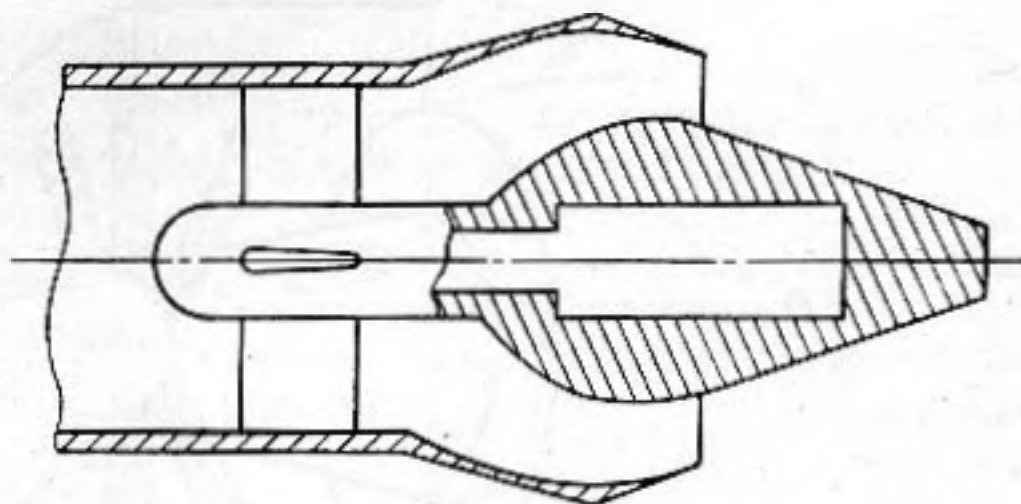
АЭРОАКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕХАНИЧЕСКОГО ШУМОГЛУШИТЕЛЯ В СХЕМЕ СОПЛА С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ТЕЛОМ

Соркин Л. И., Толстошеев М. Н.

На моделях шумоглушителя достигнуто уменьшение шума струи на $\Delta P_{NLM} = 8 P_N$ дБ при дополнительных потерях тяги $\Delta \bar{R} \sim 5\%$. Впервые приведены данные об изменении диаграммы направленности путем неравномерного расположения относительно оси струи элементов шумоглушения.

Использование механически вводимых в поток элементов (стержней, профилей, турбулизаторов и др.) с целью уменьшения шума струи реактивного двигателя все в большей степени привлекает авиационных исследователей и конструкторов [1—3]. Особенностью работы таких шумоглушителей является возможность исключения потерь тяги двигателя (сопла) на крейсерском режиме полета самолета: элементы шумоглушения в поток струи вводятся на режиме взлета или посадки и убираются из потока струи на крейсерском режиме.

В работе излагаются результаты модельных исследований механического шумоглушителя в виде вводимых в поток турбулизаторов в схеме сопла с центральным телом. Так как важной характеристикой шумоглушителя струи является соотношение между дополнительными поте-



Фиг. 1. Схематический чертеж модели сопла с центральным телом

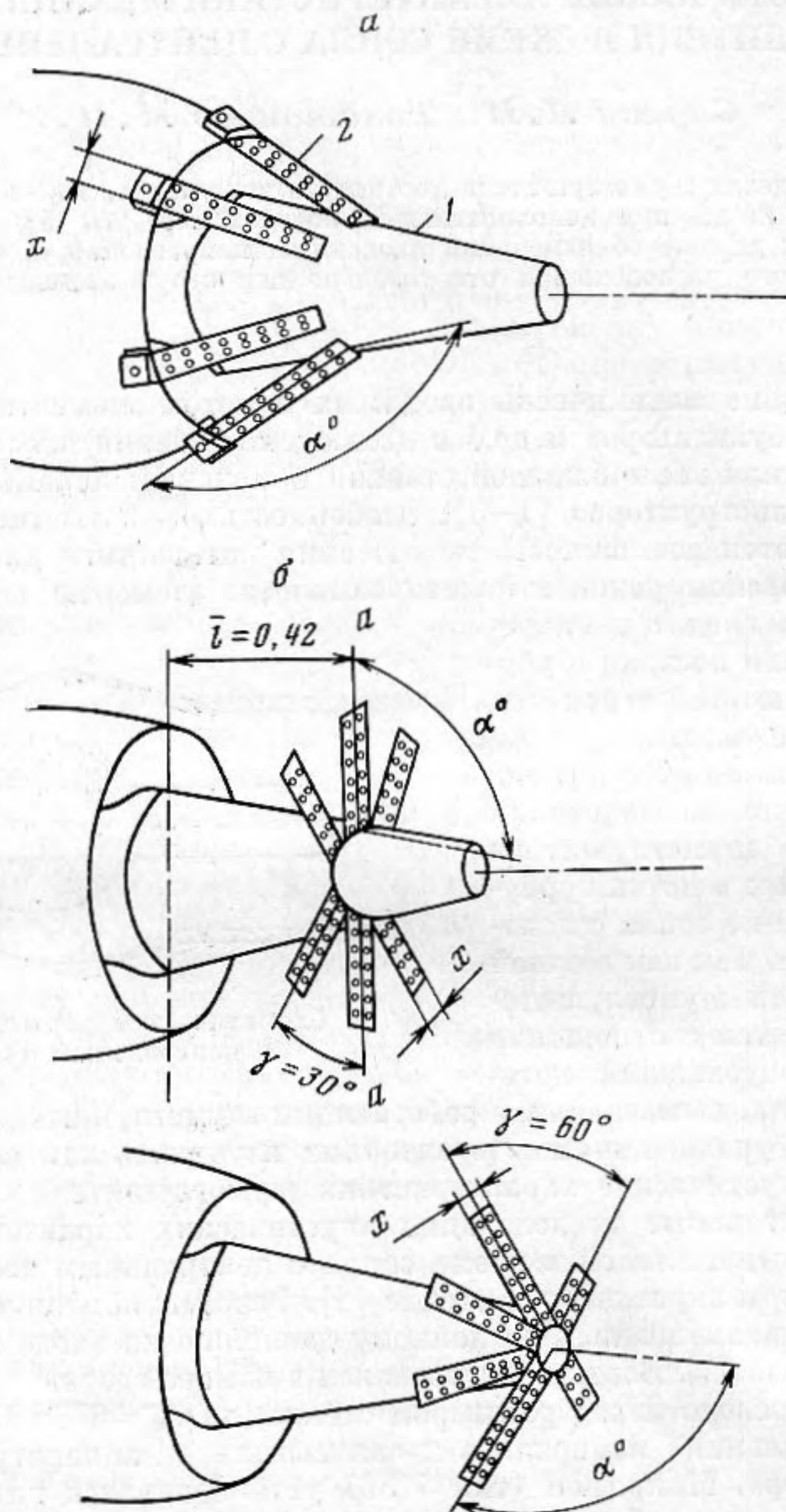
рями тяги сопла, вызываемыми работающим шумоглушителем, и величиной снижения уровней шума, то авторами изучались как аэродинамические, так и акустические характеристики шумоглушителя.

Экспериментальные исследования акустических характеристик механических шумоглушителей в схеме сопла с центральным телом проводились на открытом акустическом стенде [1]. Режимы истечения газа из модели сопла устанавливались по полному давлению на входе в сопло P_c^* и температуре газа T_c^* . Воздух подогревался в камере сгорания, установленной на трубопроводе перед ресивером стенда, до $T_c^* = 673 + 923$ К. Уровни звукового давления измерялись и записывались аппаратурой фирмы «Брюль и Кьер». Микрофон (тип 4136) устанавливался на специальной перемещаемой по дуге балке на расстоянии 6 м от среза сопла. Измерения проводились в контрольных точках $\theta = 30^\circ, 60, 90, 120, 135, 150^\circ$. Угол θ отсчитывался от входа в модель. В каждом испытании проводились контрольные измерения шума струи, истекающей из исходного сопла. В качестве исходного сопла использовалась модель сверхзвукового сопла с центральным телом. Схематический чертеж этой модели показан на фиг. 1.

Измерения аэродинамических (тяговых) характеристик исходного сопла и сопла с элементами шумоглушения проводились с помощью тензометрических весов, устанавливаемых на державке перед испытуемой моделью. Для акустических исследований использовалась модель сопла с площадью критического сечения $F_c = 60,44$ см², а для аэродинамических — другая модель с $F_c = 35,78$ см². Модель с уменьшенной площадью критического сечения соответствовала размерам державки с тензометрическими

весаи. Ниже приводятся результаты исследования трех вариантов механического шумоглушителя. На фиг. 2 показаны схемы и основные геометрические параметры испытанных вариантов. В качестве шумоглушащих элементов на модель исходного сопла устанавливались шесть или восемь турбулизаторов.

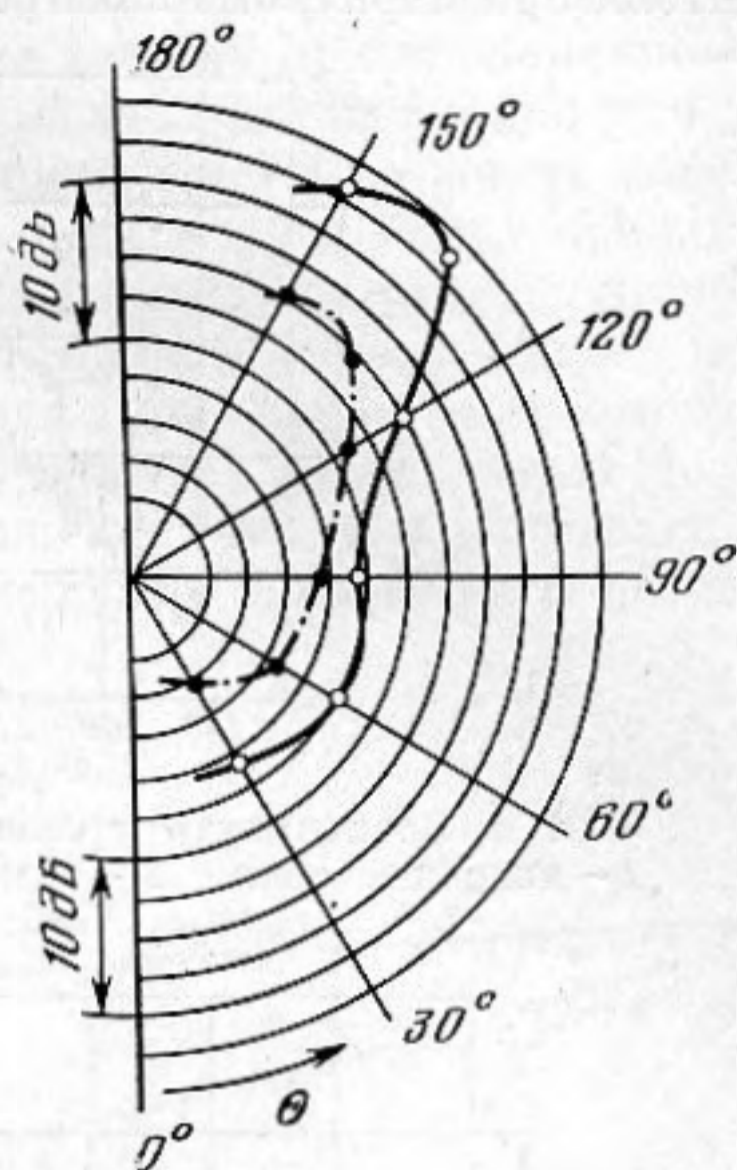
На фиг. 2, *a* изображен 1-й вариант шумоглушителя, у которого турбулизаторы — плоские перфорированные пластины, — устанавливались



Фиг. 2. *a* — Схема механического шумоглушителя реактивной струи — 1-й вариант, *б* — Схема механического шумоглушителя реактивной струи — 3-й вариант

на обечайке сопла. $N=6$ — число турбулизаторов, $\bar{x} = x/d_{\text{экв}}$ — относительная ширина турбулизатора, $d_{\text{экв}} = \sqrt{4F/\pi}$, \bar{s} — коэффициент проницаемости перфорации, выраженный в процентах, $\bar{x}=0,07$, ($\bar{s}=6$), $\bar{x}=0,15$, ($\bar{s}=13$), α — угол установки турбулизатора (см. фиг. 2, *a*), $\alpha=110, 150, 170^\circ$. Второй вариант отличался от первого тем, что турбулизаторы устанавливались на центральном теле. Турбулизаторы выполнялись в виде перфорированного уголка, имеющего ширину $\bar{x}=0,07$, $N=6$, $\bar{s}=6$. Турбулизаторы устанавливались на различном расстоянии от среза обечайки сопла

$\bar{l}=l/d_{\text{экс}}=0,11; 0,2; 0,42$ при постоянном угле $\alpha=90^\circ$. Третий вариант модели механического шумоглушителя отличался от 2-го варианта лишь формой турбулизаторов, они были выполнены в виде пластин, как и в 1-м варианте. В этом случае $\bar{l}=0,46$ ($\alpha=140^\circ$), $\bar{l}=1,1$ ($\alpha=70-130^\circ$), $\bar{x}=0,07$, $N=6$, $N=8$, $\bar{s}=0,18$. Некоторые из перечисленных вариантов шумоглушителей испытывались как при равномерном, так и при неравномерном расположении турбулизаторов относительно оси сопла (см. верхнюю схему на фиг. 2, б). При равномерном расположении турбулизаторов предполагается, что во всех меридиональных плоскостях, проходящих через ось струи, выходящей из сопла, диаграмма направленности звукового излучения остается неизменной. Иначе говоря согласно симметрии, геометрические места точек с одинаковым уровнем звукового давления в сечениях, перпендикулярных оси струи, представляют собой окружности. Однако в некоторых практически важных случаях требуется с целью уменьшения шума в определенном направлении изменить диаграмму направленности. Подобное изменение, в частности, можно осуществить путем придания выходному сечению сопла формы эллипса или прямоугольника. Тогда, как показывает опыт [4], в направлении большей оси эллипса или в направлении меньшей стороны прямоугольника уровни звукового давления становятся ниже, чем в направлениях, перпендикулярных указанным. Так, к примеру, достигается дополнительное снижение шума при использовании сопла типа



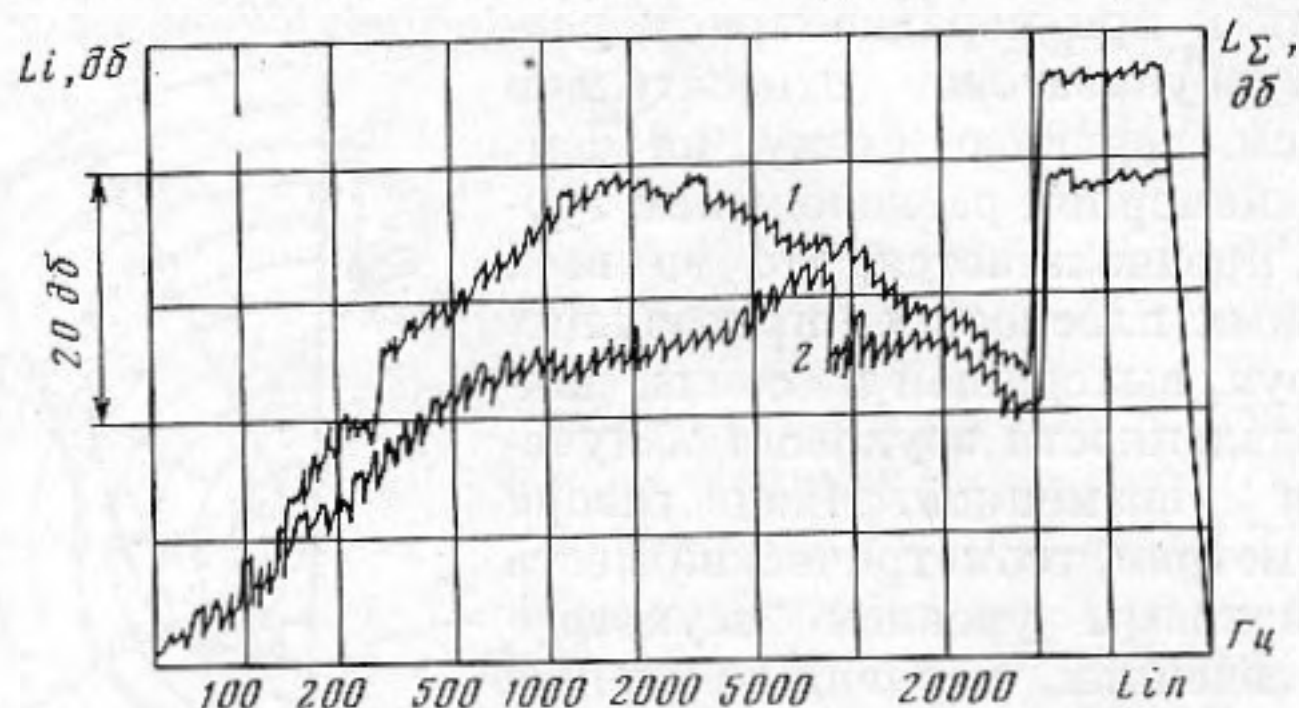
Фиг. 3. Значения суммарных уровней звукового давления в зависимости от угла направленности θ . $\pi_c^*=2,6$; $T_c^*=923$ К
 ○ — исходное сопло, ● — с механическим шумоглушителем. 3-й вариант: $N=6$; $\bar{l}=0,46$; $\bar{x}=0,07$; $\bar{s}=18$

28 на самолете «Конкорд» в направлении сбоку от ВПП. Авторами было высказано, а затем и подтверждено экспериментально предложение о том, что изменение диаграммы направленности может быть реализовано в механических шумоглушителях при сохранении формы выходного сечения сопла, но с неравномерным расположением элементов шумоглушителя, фиг. 2, б. При этом достигается также эффект уменьшения уровня шума в определенном направлении. Это направление совпадает с осью, вблизи которой группируются турбулизаторы при их неравномерном расположении, фиг. 2, б, ось «а-а». Подобные идеи о неравномерном расположении элементов шумоглушения с целью изменения диаграммы направленности были высказаны в патенте США [5].

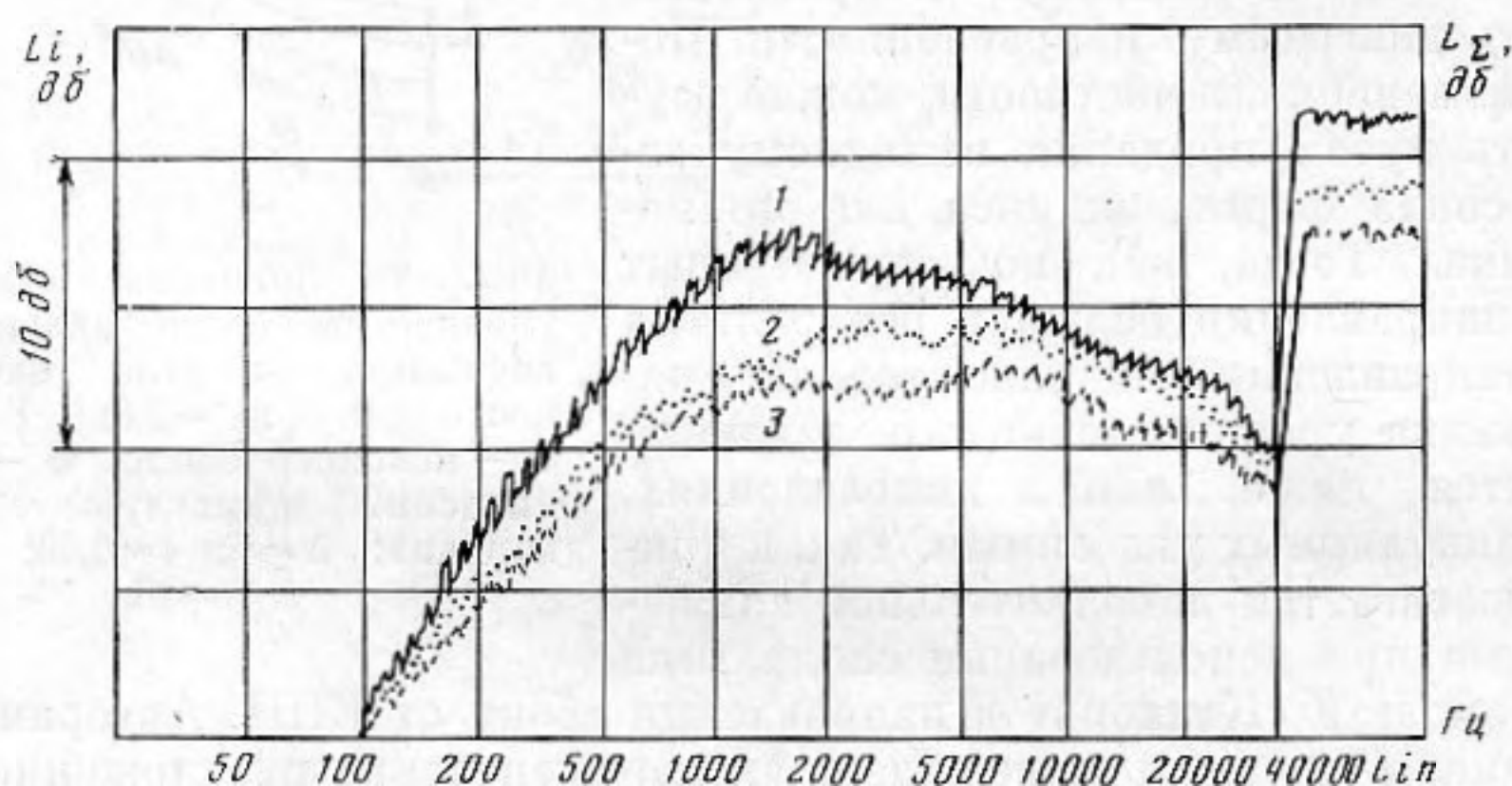
Общие представления о работе механического шумоглушителя рассматриваемого типа можно получить на примере результатов исследования модели 3-го варианта $\bar{l}=0,46$, $\bar{x}=0,07$, $\bar{s}=18$, $N=6$. На фиг. 3 приведена диаграмма направленности для шумоглушителя с шестью турбулизаторами, равномерно расположенными вокруг центрального тела ($\gamma=60^\circ$, фиг. 2, б) при $\pi_c^*=2,6$ и $T_c^*=923$ К ($\pi_c^*=P_c^*/P_n$, где P_n — давление в окружающей среде). В зависимости суммарных уровней звукового давления от угла направленности θ наблюдается наибольшее снижение шума в области его максимальных уровней при углах направленности $130-150^\circ$ и составляет ~ 9 дБ (ниже весь анализ для всех вариантов шумоглушителя дается для этих углов). Соответствующий акустический спектр для этой модели дан на фиг. 4. Имея в виду, что достигаемые эффекты уменьшения шума струи, связанные с трансформацией акустического спектра при введении в поток струи элементов шумоглушения, известны [1], следует все же для рассматриваемой модели отметить, что наибольшее снижение уров-

ней звукового давления наблюдается в области частот 500÷5000 Гц. Эта область частот характерна для шума струи в натуральных условиях (50÷500 Гц) и, следовательно, можно ожидать, что натуральный шумоглушитель будет достаточно эффективным.

Акустический спектр для рассматриваемого механического шумоглушителя при неравномерном расположении турбулизаторов ($\bar{l}=0,46$, $\gamma=30^\circ$,



Фиг. 4. Зависимость уровней звукового давления от частоты. $\theta=135^\circ$. 1 — исходное сопло, 2 — с механическим шумоглушителем. 3-й вариант: $N=6$; $\bar{l}=0,46$; $\bar{x}=0,07$; $\bar{s}=18$



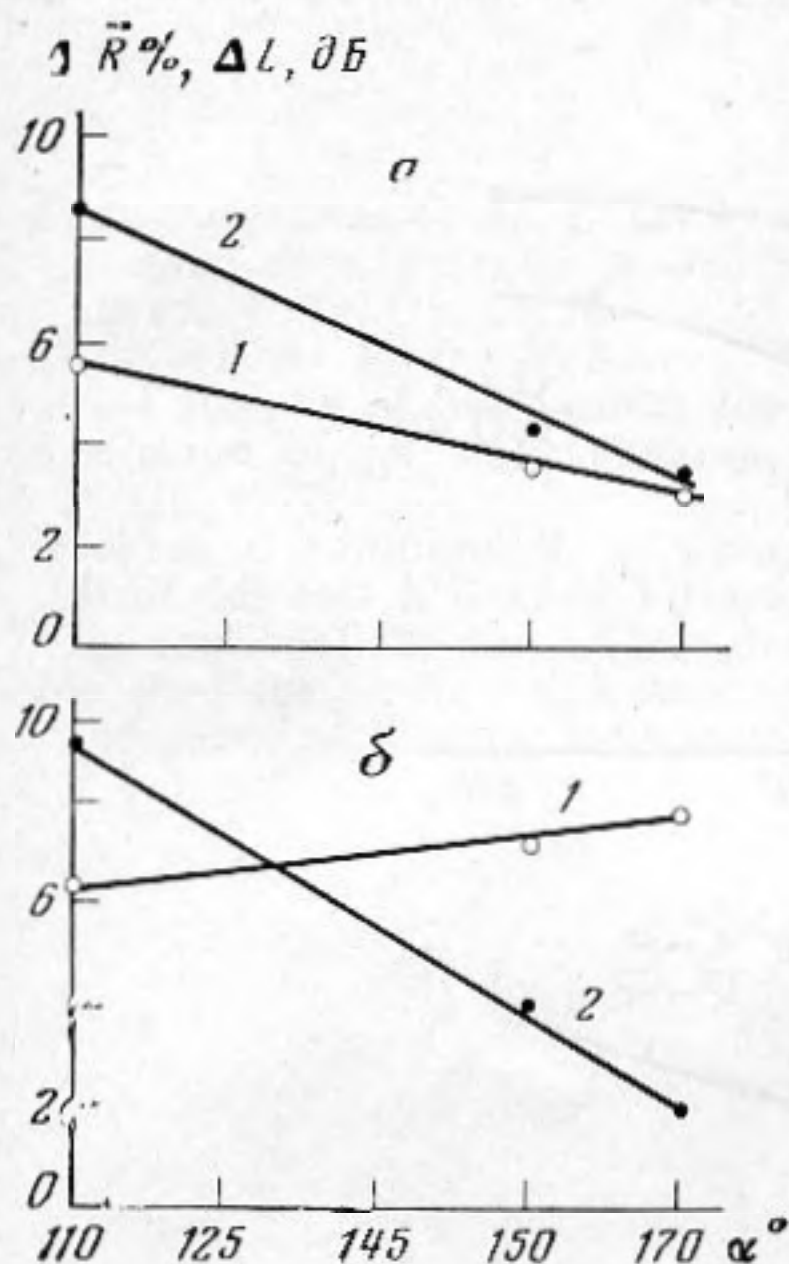
Фиг. 5. Зависимость уровней звукового давления от частоты. $\theta=135^\circ$, $\pi_c^*=2,6$; $T_c^*=673$ К. 1 — исходное сопло; 2 — с механическим шумоглушителем. 3-й вариант: $N=6$; $\bar{l}=0,46$; $\bar{x}=0,07$; $\bar{s}=18$; равномерное расположение турбулизаторов: $\gamma=60^\circ$, $\varphi=90^\circ$; 3 — с механическим шумоглушителем. 3-й вариант: $N=6$; $\bar{l}=0,46$; $\bar{x}=0,07$; $\bar{s}=18$; неравномерное расположение турбулизаторов: $\gamma=30^\circ$, $\varphi=0^\circ$

фиг. 2, б) представлен на фиг. 5. Акустические характеристики на фиг. 5 несколько отличаются от приведенных на фиг. 4 из-за различия в T_c^* . Плоскости, в которых располагается интересующая нас диаграмма направленности, будем характеризовать углом φ . В этих же плоскостях при измерениях располагался микрофон, т. е. при $\varphi=0^\circ$ и при $\varphi=90^\circ$. Если ось «а-а», около которой производится группирование турбулизаторов, совпадает с плоскостью микрофона ($\varphi=0^\circ$), то в этом направлении должно наблюдаться снижение шума. Действительно, на фиг. 5 отмечается значительное уменьшение уровней звукового давления как в отдельных $1/3$ октавных полосах частот, так и в величине суммарного уровня звукового давления. При этом четко наблюдается ожидаемая несимметрия распространения звукового излучения — в направлении угла $\varphi=90^\circ$ суммарные уровни звукового давления на 3 дБ выше, чем для направления $\varphi=0^\circ$. Иначе говоря, для реальных условий полета, если направление $\varphi=0^\circ$ и ось «а-а» совпадают, то, например, сбоку от ВПП можно ожидать большего снижения шума, чем в плоскости траектории полета. Приведенный на фиг. 5 спектр относится к углу $\theta=135^\circ$. При углах $\theta \leq 90^\circ$ снижение суммарных уровней шума остается одинаковым как для равномерного, так и для неравномерного расположения турбулизаторов. Однако трансформация акустического

спектра при $\varphi=0^\circ$ и $\varphi=90^\circ$ заметно различная. Это приводит к тому, что значительным образом изменяются уровни звукового давления, выраженные с учетом частоты, — уровни воспринимаемого шума в PN дБ.

Во всем диапазоне углов θ при $\varphi=0^\circ$ достигается большее уменьшение уровней воспринимаемого шума при неравномерном расположении шести турбулизаторов, чем при равномерном их расположении. Можно предположить, что так как при равномерном и неравномерном расположении число турбулизаторов одно и то же, то дополнительные потери тяги будут одинаковыми.

Отсюда следует, что экономическая эффективность механического шумоглушителя при неравномерном расположении турбулизаторов будет большая (снижение шума в направлении $\varphi=0^\circ$ на единицу потерь тяги возрастает).



Фиг. 6

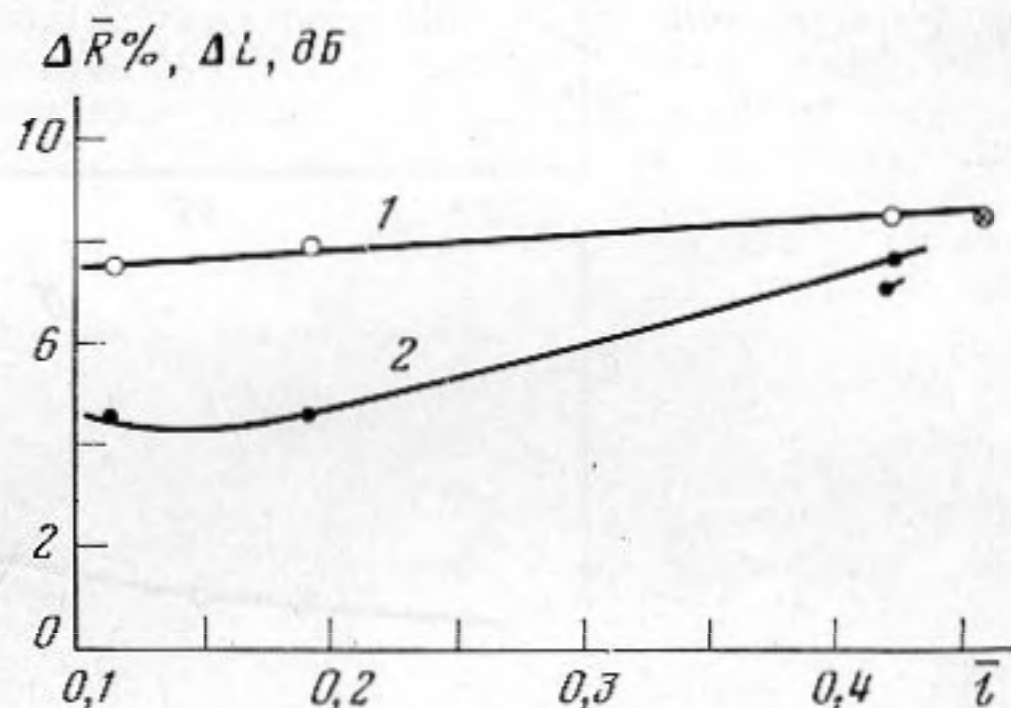


Рис. 7

Фиг. 6. Зависимости акустических (ΔL дБ, кривые 1) и аэродинамических ($\Delta \bar{R}$ %, кривые 2) характеристик механического шумоглушителя от угла α . 1-й вариант: $\theta=135^\circ$; $\pi_c^*=2,8$; $T_c^*=723$ К. ● — $\Delta \bar{R}$ %; ○ — ΔL дБ; а — $N=6$; $\bar{x}=0,07$; $\bar{s}=6$; б — $N=6$; $\bar{x}=0,15$; $\bar{s}=13$

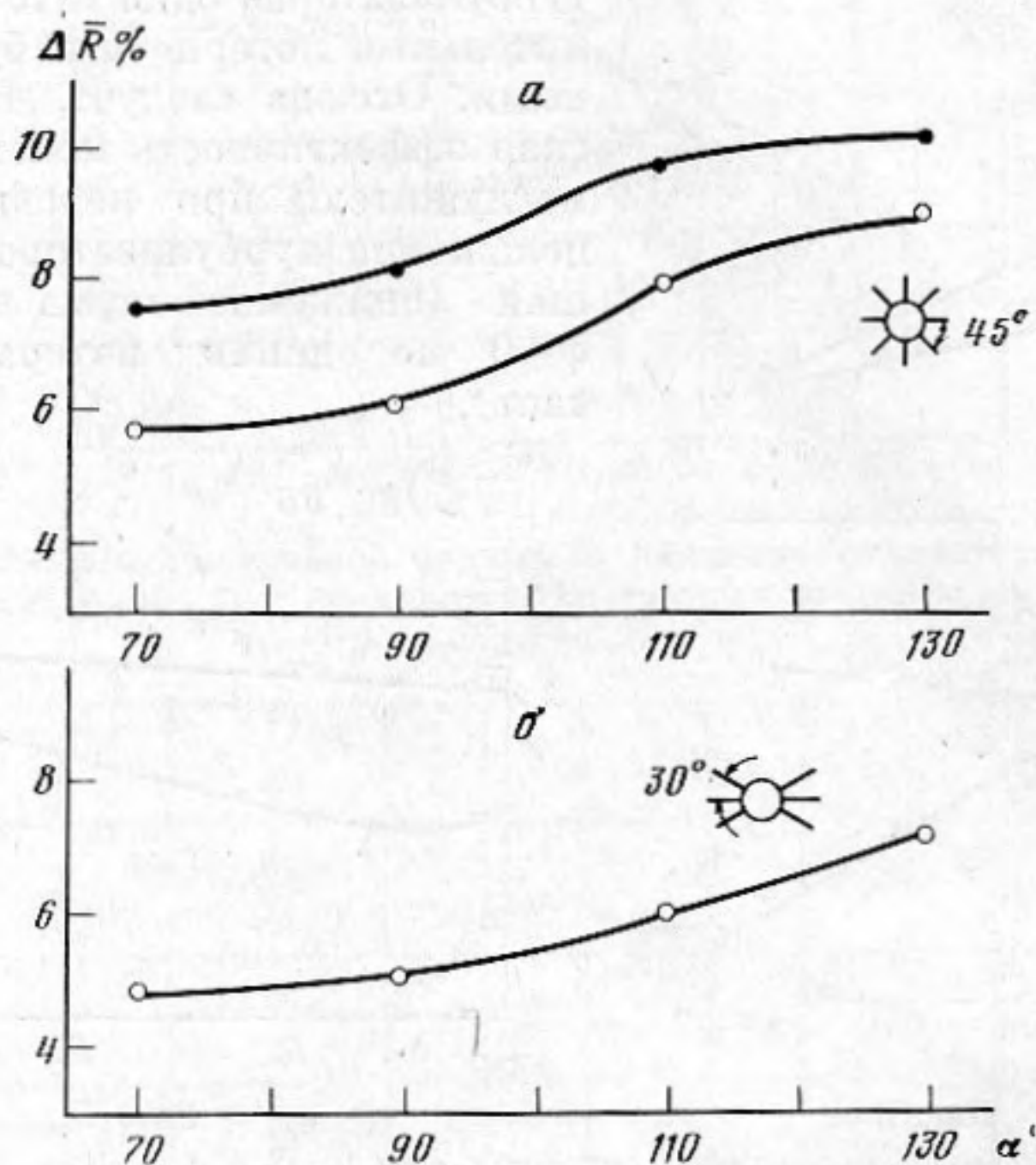
Фиг. 7. Зависимости акустических (ΔL дБ, кривая 1) и аэродинамических ($\Delta \bar{R}$ %, кривая 2) характеристик механического шумоглушителя от относительного расстояния \bar{l} . $\theta=135^\circ$; $\pi_c^*=2,8$; $T_c^*=723$ К. ● — $\Delta \bar{R}$ %; ○ — ΔL дБ. 2-й вариант: $N=6$; $\alpha=110^\circ$; $\bar{s}=6$; $\bar{x}=0,07$. ⊗ — ΔL дБ; 3-й вариант: $\bar{l}=0,46$; $\alpha=140^\circ$; $\bar{x}=0,07$; $\bar{s}=18$. ● — $\Delta \bar{R}$ %; 3-й вариант: $\bar{l}=0,42$; $\alpha=90^\circ$; $\bar{x}=0,07$; $\bar{s}=18$

Таким образом, применение механических шумоглушителей реактивной струи с неравномерным расположением элементов шумоглушения (турбулизаторов) в схеме сопла с центральным телом открывает новые возможности по повышению их акустической эффективности без дополнительных потерь тяги. Заканчивая изложение общих представлений о работе механических шумоглушителей, укажем, что для оценки экономической эффективности исследованных в настоящей работе механических шумоглушителей в практике принято ориентироваться на рекомендации ИКАО [3]. Они представляют собой зависимость между уменьшением шума $\Delta PNL M$ (максимальные значения) и дополнительными потерями тяги в процентах. Для опытного производства рекомендуется соотношение

$$\Delta PNL M / \lg \frac{\Delta R}{R} \cdot 100 = 12.$$

Результаты исследования 1-го варианта механического шумоглушителя с равномерным расположением турбулизаторов приведены на фиг. 6. Четко прослеживается влияние угла наклона α и увеличения площади перфораций \bar{s} . Чем больше угол α , тем меньше сопротивление вносимых в поток турбулизаторов, а следовательно, и меньшие дополнительные потери тяги $\Delta \bar{R} = (R_c - R_{c.ш.}) / R_{ид}$, где R_c — тяга исходного сопла, $R_{c.ш.}$ — тяга сопла

с элементами шумоглушения, $R_{ид}$ — идеальная тяга при полном изэнтропическом расширении струи от P_c^* до P_n . Потери тяги также уменьшаются с увеличением проницаемости турбулизаторов. Несмотря на то что турбулизаторы стали шире (фиг. 6, б) ($\bar{x}=0,15$), потери тяги при $\alpha=170^\circ$ уменьшаются почти в 2 раза при увеличении \bar{s} от 6 до 13%. С этими эффектами (увеличение ширины и проницаемости турбулизаторов) связано практически независимое от угла α уменьшение суммарного уровня звукового давления. Воздействие же на струю узких турбулизаторов



Фиг. 8. Зависимость аэродинамических ($\Delta \bar{R} \%$) характеристик механического шумоглушителя от угла α . 3-й вариант: $\theta=135^\circ$; $\pi_c^*=2,8$; $T_c^*=723$ К; $\bar{l}=1,1$. а — $N=8$; $\bar{x}=0,07$; ● — $\bar{s}=0$; ○ — $\bar{s}=18$; б — $N=6$; $\bar{x}=0,07$; $\bar{s}=18$, неравномерное расположение турбулизаторов, $\gamma=30^\circ$

(фиг. 6, а) по мере их отодвижения от среза обечайки сопла становится более слабым (α растет) и ΔL дБ падает.

Акустические и аэродинамические характеристики 2-го варианта шумоглушителя показаны на фиг. 7. По мере увеличения расстояния между срезом обечайки сопла и турбулизаторами потери тяги растут ($\alpha=\text{const}$). Это объясняется тем, что при $\pi_c=2,8$ сверхзвуковой поток непосредственно за срезом обечайки ускоряется, а затем к концу центрального тела тормозится. Поэтому внесение турбулизаторов в поток с большей скоростью вызывает большее сопротивление, а следовательно, и потери тяги, фиг. 7. Уменьшение суммарных уровней шума ΔL дБ практически остается для этой модели при различных значениях \bar{l} неизменным. Независимость величины уменьшения суммарных уровней шума ΔL дБ от \bar{l} была подтверждена и для моделей 3-го варианта шумоглушителя. Соответствующие значения $\Delta \bar{R}$ и ΔL дБ для двух моделей 3-го варианта приведены на фиг. 8. Они хорошо согласуются с данными для 2-го варианта, что, в частности, позволяет утверждать, что замена уголкового турбулизатора (2-й вариант) пластинчатыми (1-й вариант, более благоприятный для натурной убираемой конструкции) целесообразна.

Некоторые важные для выполнения реальной конструкции механического шумоглушителя соображения можно почерпнуть из рассмотрения фиг. 8, на которой даны зависимости потерь тяги от некоторых геометрических параметров турбулизаторов, расположенных в конце центрального

тела ($\bar{l}=1,1$). Можно ожидать, что соответствующим выбором числа турбулизаторов, проницаемости и угла α можно получить уменьшение шума порядка $8PNLM$ дБ (используя данные фиг. 6 и 7) при дополнительных потерях тяги, равных $\sim 5\%$ (фиг. 8).

Полученное соотношение по экономической эффективности механического шумоглушителя в схеме сопла с центральным телом близко к соотношению, рекомендованному ИКАО: $\Delta PNLM / \lg \frac{\Delta R}{R} \cdot 100 = 11,4$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крашенинников С. Ю., Соркин Л. И., Толстошеев М. Н., Яковлевский О. В. Исследование акустических и газодинамических характеристик шумоглушителей.— Акуст. ж., 1970, т. 16, № 1, с. 88–95.
2. Fitz-Simmons R. D., McKinnon R. A. and Johnson E. S. Flight and Wind Tunnel Test Results of Mechanical Jet Noise Suppressor Nozzle.— AJAA-80-0165.
3. Assesment of jet noise silencers for supersonic transports. Panel Report to JCAO WG/E, 1977.
4. Hoch R. G., Julliant M. et Lacambe H. Dispositifs Directionnels de Reduction du Bruit des Jets à Grande Vitesse. Communication présentée au Premier Symposium International sur des Progrès des Reacteurs d'Aviation, Marseille, 19–23, June, 1972.
5. Jon W. Vdoviac, Roy A. Krabacher. Propulsion nozzle with combined thrust reversor and sound suppressor mechanism (Патент США 3612209, класс 181–33, 1971).

Поступила в редакцию
18.III.1981