АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXIV 1978 Вып. 6

УДК 534.83:629.7

ШУМ СООСНЫХ СТРУЙ. ИЗОТЕРМИЧЕСКИЕ СТРУИ

В. М. Кузнецов, А. Г. Мунин

Разработан метод расчета шума соосных струй на основе рассмотрения трех основных областей излучения звука. Получены формулы для расчета акустической мощности кольцевой струи и соосных струй при различных соотношениях скоростей потоков внутреннего и внешнего контуров.

Проблема снижения шума выхлопной струи реактивного двигателя, возникшая в начале 50-х годов и обусловленная развитием реактивной авиации, остается актуальной и в настоящее время в связи с усилением мероприятий по охране окружающей среды и необходимостью удовлетворения все более ужесточающихся нормативных требований по шуму самолетов.

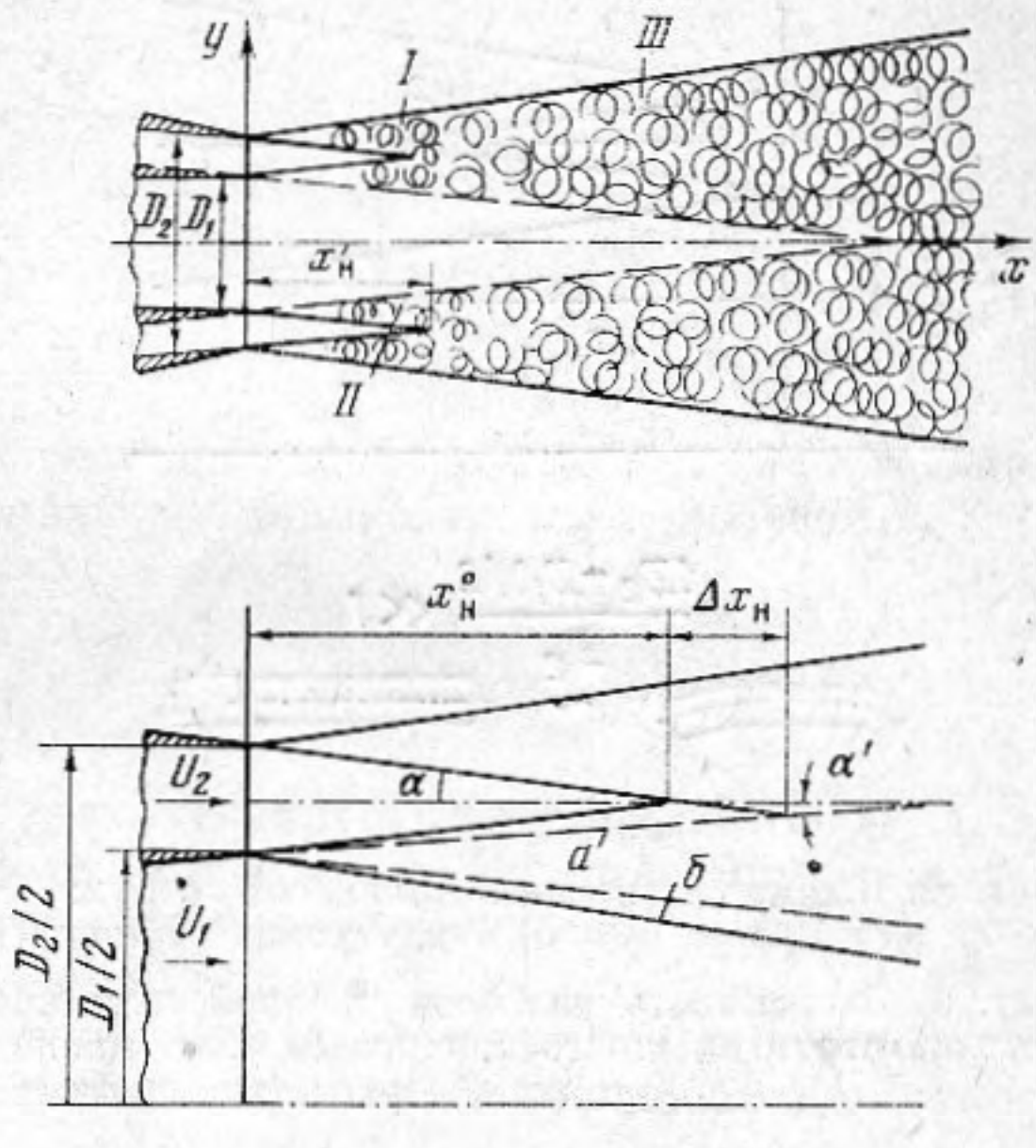
Выхлопная струя являлась основным источником шума турбореактивных двигателей (ТРД), которые использовались на ранней стадии развития пассажирской авиации. В настоящее время на пассажирских самолетах применяются двухконтурные турбореактивные двигатели (ТРДД), в которых с целью снижения шума часть потока пропускается с пониженной скоростью через внешний контур. Основными источниками шума ТРДД являются как струя двигателя, так и вентилятор-компрессор. Однако успешное использование в последние годы методов снижения шума вентилятора и применение звукопоглощающих облицовок в каналах силовой установки самолета привело к снижению излучаемого вентилятором шума и возрастанию относительной роли шума струи в общем шуме двигателя.

Особую актуальность проблема снижения шума выхлопа принимает для сверхзвуковых пассажирских самолетов в связи с большой тяговооруженностью их силовых установок. В качестве одного из вариантов снижения шума сверхзвуковых самолетов в настоящее время рассматривается возможность применения ТРДД с «перевернутым» профилем скоростей на выхлопе (скорость во внешнем контуре превышает скорость во внутреннем контуре).

Исследованию шума соосных струй посвящен ряд работ [1–6]. Однако в большинстве работ рассмотрены соосные струи с обычным профилем скоростей (скорость во внутреннем контуре превышает скорость во внешнем контуре). Для соосных струй с «перевернутым» профилем скоростей получены весьма противоречивые данные по их акустической эффективности. Ниже с единой позиции рассмотрен процесс образования шума в соосных струях различного типа и предложен метод расчета их акустических характеристик.

В зоне смешения соосных струй можно выделить три основные области излучения звука (фиг. 1): *I* — область смешения потока внешнего контура с окружающей средой, *II* — область смешения внутренней струи со спутным потоком внешнего контура, *III* — область совместного перемешивания потоков с окружающей средой, течение в которой можно представить в виде части некоторой эквивалентной струи [2].

Пониженные уровни шума соосных струй с обычным профилем скоростей объясняются уменьшением градиента средней скорости при смешении высокоскоростного внутреннего потока с окружающей средой. Для струй с «перевернутым» профилем скоростей пониженные уровни шума могут быть объяснены уменьшением длины ядра постоянной скорости потока внешнего контура, и, следовательно, уменьшением участка наиболее интенсивного излучения звука. Кроме того, при небольшой ширине кольцевого внешнего потока вследствие увеличения доли высокочастотных составляющих в спектре шума происходит ослабление интенсивности звука при распространении его в окружающей среде. Наличие «перевернутого» профиля температур потоков приводит к дополнительному снижению шума вследствие рефракции звука по направлению к оси струи.



Фиг. 1. Схема истечения соосных струй: *а* – границы пограничного слоя при истечении в спутный поток, *б* – в неподвижную среду

Акустическая мощность. Определение акустических характеристик соосных струй мы проведем, используя метод расчета шума струи по участкам [7]. Очевидно, что вклад каждой области в суммарный шум соосных струй зависит от соотношений геометрических и аэродинамических параметров внутреннего и внешнего контуров.

В общем виде выражение для мощности звука W, излучаемого элементарным объемом струи dV, может быть представлено в виде [7, 8]

$$dW=k\frac{\rho_c^2U_c^8}{\rho_0C_0^5}f^8(\eta)\frac{dV}{x}, \tag{1}$$

где k – коэффициент, ρ_c – плотность струи, U_c – скорость истечения, ρ_0 – плотность окружающей среды, C_0 – скорость распространения звука, $f(\eta)$ – функция, описывающая распределение пульсационных скоростей в зоне смешения, η – безразмерная координата, x – расстояние вдоль струи, отсчитываемое от плоскости среза сопла. Для круглой струи $\eta=(y-0{,}5D)/x$, $dV=2\pi y dx dy$, где y – расстояние от оси в радиальном направлении, D – диаметр среза сопла.

Используя данные по турбулентным характеристикам, можно получить известное выражение для акустической мощности круглой струи в диапазоне скоростей истечения, соответствующем $M=U_c/C_0=0{,}5\div2{,}0$:

$$W=k_0\frac{\rho_c^2U_c^8D^2}{\rho_0C_0^5}, \tag{2}$$

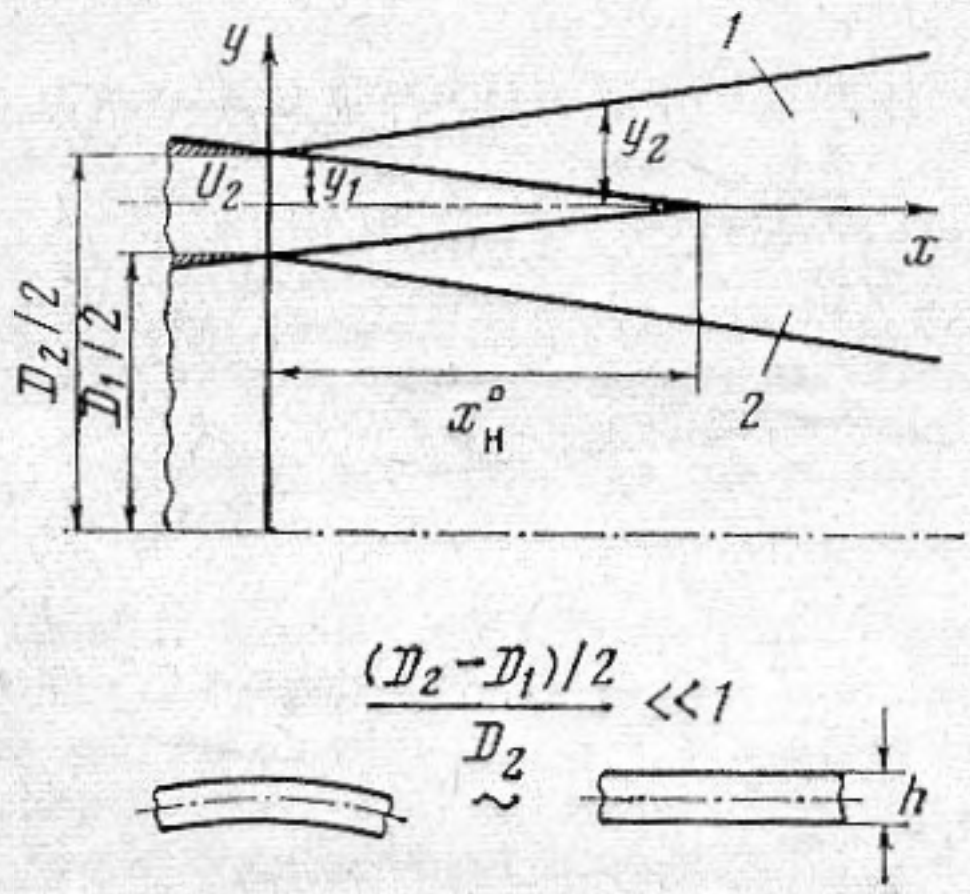
где $k_0=3\cdot10^{-5}$ [8, 9].

Кольцевая струя. Если в качестве предельного варианта соосных струй рассмотреть случай отсутствия потока во внутреннем контуре, то получаем кольцевую струю. Расчет акустической мощности кольцевой струи мы проведем в сопоставлении со случаем круглой струи при равенстве площадей среза сопел и скоростей истечения. Поскольку известно [7], что шум генерируется в основном вблизи среза сопла, то сравнительную оценку мы проведем только для начальных участков струй.

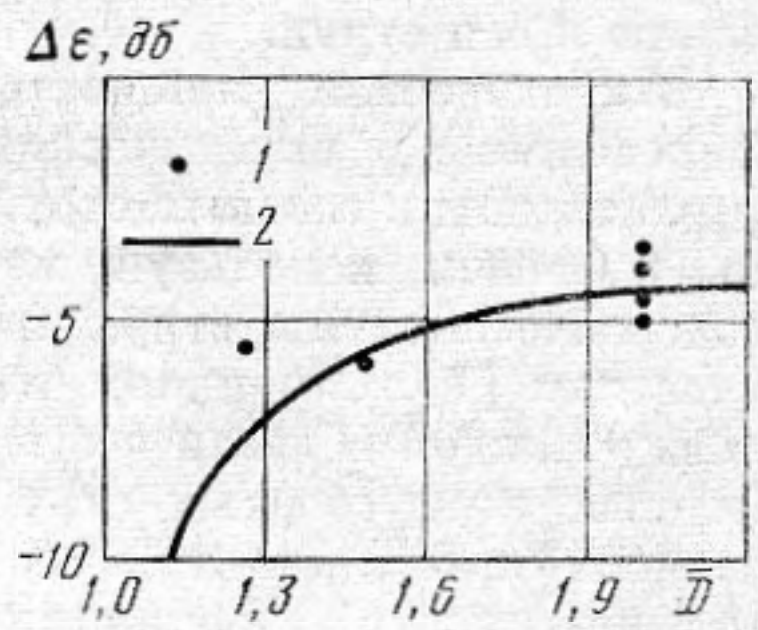
При истечении кольцевой струи образуются две идентичные кольцеобразные области смешений потока с окружающей средой (фиг. 2). Примем, что ширина кольцевого сопла $h=(D_2-D_1)/2$ мала по сравнению с внешним диаметром D_2, т. е.

$$(\bar{D}-1)/2\bar{D}\ll 1,$$

где $\bar{D}=D_2/D_1$, D_1 — диаметр сопла внутреннего контура. С учетом этого предположения, действительно справедливого при $\bar{D}<1{,}5$, участок кольцевой щели малой длины можно заменить участком щелевидного сопла. Аэродинамические характеристики струи, истекающей из щелевидного сопла,



Фиг. 2



Фиг. 3

Фиг. 2. Схема истечения кольцевой струи: *1* — внешняя область смешения, *2* — внутренняя область смешения

Фиг. 3. Зависимость разности уровней акустической мощности кольцевой струи и круглой струи внешнего контура от соотношения диаметров: *1* — экспериментальные точки, *2* — расчетные данные по формуле (10)

т. е. плоской струи, подобны соответственным характеристикам круглой струи [10].

Акустическая мощность элементарного объема турбулентного потока в зоне смешения кольцевой струи определяется из формулы (1), причем безразмерная координата имеет вид $\eta=(y-0{,}5h)/x$. Во внешней области смешения элементарный объем кольцевой струи будет $dV=2\pi[(D_1+D_2)/4+y]dydx$ (фиг. 2). Подставляя $y=(D_2-D_1)/4+\eta x$, $dy=xd\eta$, получаем $dV=2\pi(0{,}5D_2+\eta x)xdxd\eta$. Тогда акустическая мощность внешней области смешения в пределах существования ядра постоянных скоростей будет

$$W_{к.с}^{внеш}=2k\pi\frac{\rho_c^2U_2^8}{\rho_0C_0^5}\int_0^{x_н^0}\int_{\eta_1}^{\eta_2}f^8(\eta)(0{,}5D_2+\eta x)\,dx\,d\eta, \tag{3}$$

где $x_н^0=5(D_2-D_1)/2$ — длина начального участка, $\eta_1=[y_1-0{,}5(D_2-D_1)/2]/x$, $\eta_2=[y_2-0{,}5(D_2-D_1)/2]/x$, U_2 — скорость истечения из кольцевой щели. В результате интегрирования имеем

$$W_{к.с}^{внеш}=k\pi\frac{\rho_c^2U_2^8}{\rho_0C_0^5}x_н^0(a_1D_2+a_2x_н^0), \tag{4}$$

где $$a_1=\int_{\eta_1}^{\eta_2}f^8(\eta)d\eta=1{,}2\cdot10^{-2},\quad a_2=\int_{\eta_1}f^8(\eta)\eta d\eta=-1{,}8\cdot10^{-4}.$$

Во внутренней области смешения элементарный объем кольцевой струи равен $dV=2\pi[(D_1+D_2)/4-y]dxdy$, и, проводя интегрирование, мы полу-

чаем

$$(5)\qquad W_{\text{к.с}}^{\text{внутр}}=k\pi\frac{\rho_c^2U_2^8}{\rho_0C_0^5}x_{\text{н}}^0(a_1D_1-a_2x_{\text{н}}^0).$$

Суммарная акустическая мощность начального участка кольцевой струи будет, таким образом,

$$(6)\qquad W_{\text{к.с}}=2{,}5k\pi a_1\frac{\rho_c^2U_2^8(D_2^2-D_1^2)}{\rho_0C_0^5}.$$

Проведя интегрирование выражения (1) для начального участка круглой струи длиной $5D$, мы получаем

$$(7)\qquad W_{\text{кр.с}}=5k\pi(a_1+5a_2)\frac{\rho_c^2U_c^8D^2}{\rho_0C_0^5},$$

и, следовательно,

$$(8)\qquad W_{\text{к.с}}=W_{\text{кр.с}}\frac{a_1U_2^8(D_2^2-D_1^2)}{2(a_1+5a_2)U_c^8D^2}.$$

С учетом того, что абсолютная величина коэффициента a_2 значительно меньше a_1, разность уровней акустической мощности для кольцевой $\varepsilon_{\text{к.с}}$ и круглой $\varepsilon_{\text{кр.с}}$ струй имеет вид

$$(9)\qquad \Delta\varepsilon=\varepsilon_{\text{к.с}}-\varepsilon_{\text{кр.с}},$$
$$\Delta\varepsilon=80\lg(U_2/U_c)+10\lg[(D_2^2-D_1^2)/2D^2].$$

Если сравнивать кольцевую и круглую струи при равенстве скоростей истечения $U_c=U_2$ и площадей среза сопел $D^2=D_2^2-D_1^2$, то видно, что акустическая мощность кольцевой струи меньше акустической мощности соответственной круглой струи.

Если сравнивать кольцевую струю с круглой струей, истекающей со скоростью $U_c=U_2$ из сопла диаметром $D=D_2$, то разность уровней акустической мощности составляет

$$(10)\qquad \Delta\varepsilon=10\lg[(\overline{D}^2-1)/2\overline{D}^2].$$

Результаты экспериментальных исследований шума кольцевых струй соответствуют результатам расчета (фиг. 3). С уменьшением ширины кольцевого сопла, т. е. с уменьшением соотношения диаметров $\overline{D}$, разность уровней акустической мощности кольцевой струи и круглой струи внешнего контура возрастает.

Соосные струи с обычным профилем скоростей ($U_2/U_1<1$). Аэродинамические исследования [2] показали, что в пределах существования ядер постоянных скоростей (в начальном участке) истечение соосных струй можно представить как истечение внутренней струи в спутный поток внешнего контура и истечение внешней струи в окружающую среду (фиг. 1). Поэтому протяженность областей *I* и *II* может быть определена из закона нарастания толщины пограничного слоя при истечении струи в спутный поток и закона сужения ядра постоянных скоростей при истечении затопленной струи [10]

$$(11)\qquad x_{\text{н}}'=\frac{D_2-D_1}{2(\operatorname{tg}\alpha+\operatorname{tg}\alpha')}$$

где α — угол сужения ядра постоянных скоростей затопленной струи, $\operatorname{tg}\alpha=0,1$, α' — угол расширения внешней границы пограничного слоя струи в спутном потоке,

$$(12)\qquad \operatorname{tg}\alpha'=C\frac{1-m}{1+m}(0{,}584-0{,}134m),$$

$m=U_2/U_1$ — параметр спутности, U_1 — скорость истечения потока из внутреннего контура, $C=0{,}27$.

При исследовании течения в области *III* было установлено, что, начиная с некоторого расстояния от среза сопла, величина которого зависит от соотношения диаметров $\overline{D}$ и параметра спутности m, измеренные профили скоростей совпадают с универсальным профилем [10], характерным для свободной струи. Это послужило основанием для представления течения в области *III* как части струи, истекающей со скоростью U_1 из сопла некоторого эквивалентного диаметра $D_э$, расположенного в плоскости среза исходного сопла. Диаметр сопла эквивалентной струи определяется из условия постоянства количества движения

$$\rho_1 U_1^2 D_1^2+\rho_2 U_2^2 (D_2^2-D_1^2)=\rho_1 U_1^2 D_э^2, \tag{13}$$

где ρ_1, ρ_2 — плотности потоков внутреннего и внешнего контуров.

Для изотермических струй $\rho_1=\rho_2=\rho$ и

$$\overline{D}_э=\sqrt{1+m^2(\overline{D}^2-1)}, \tag{14}$$

где $\overline{D}_э=D_э/D_1$.

Поскольку источники звука в указанных трех областях некоррелированы между собой, акустическая мощность соосных струй может быть определена как сумма акустических мощностей для этих областей:

$$W_{с.с}=W_1+W_2+W_3. \tag{15}$$

Акустическая мощность, излучаемая областью *I*, определяется формулой

$$W_1=k'\frac{x_н'}{D_2}k_0\frac{\rho U_2^8 D_2^2}{C_0^5} \tag{16}$$

где $k'=0{,}13$ коэффициент, учитывающий долю энергии, излучаемой участком струи длиной один калибр среза сопла в общей энергии звука струи [8].

Акустическая мощность области *II* представляется как

$$W_2=k'\frac{x_н'}{D_1}\frac{x_н}{x_н^с}k_0\frac{\rho U_1^8 D_1^2}{C_0^5}(1+m)(1-0{,}75m)^7, \tag{17}$$

где $x_н=5D_1$ — длина начального участка круглой затопленной струи, $x_н^с$ — длина начального участка круглой струи в спутном потоке [10]

$$\frac{x_н^с}{x_н}=\frac{1+m}{2{,}16(1-m)(0{,}214+0{,}144m)^{0{,}5}} \tag{18}$$

При выводе формулы (17) принято, что относительная доля излучения звука объемом в начальном участке спутной струи по сравнению с излучением звука объемом такой же длины затопленной струи пропорциональна отношению длин начальных участков затопленной струи $x_н$ и струи в спутном потоке $x_н^с$.

Акустическая мощность области *III* определяется из рассмотрения излучения звука эквивалентной струей без учета участка протяженностью от среза сопла до $x_н'$:

$$W_3=k_0 k_э'\frac{\rho U_1^8 D_э^2}{C^5}\left(1-k'\frac{x_н'}{D_э}\right), \tag{19}$$

где $k_э'=[1+(\overline{D}^3-1)m^6]/[1+(\overline{D}^3-1)m^2]$ — экспериментальный коэффициент.

Разность $\Delta\varepsilon$ уровней акустической мощности соосных струй $\varepsilon_{с.с}$ и круглой струи внутреннего контура $\varepsilon'_{кр}$ равна

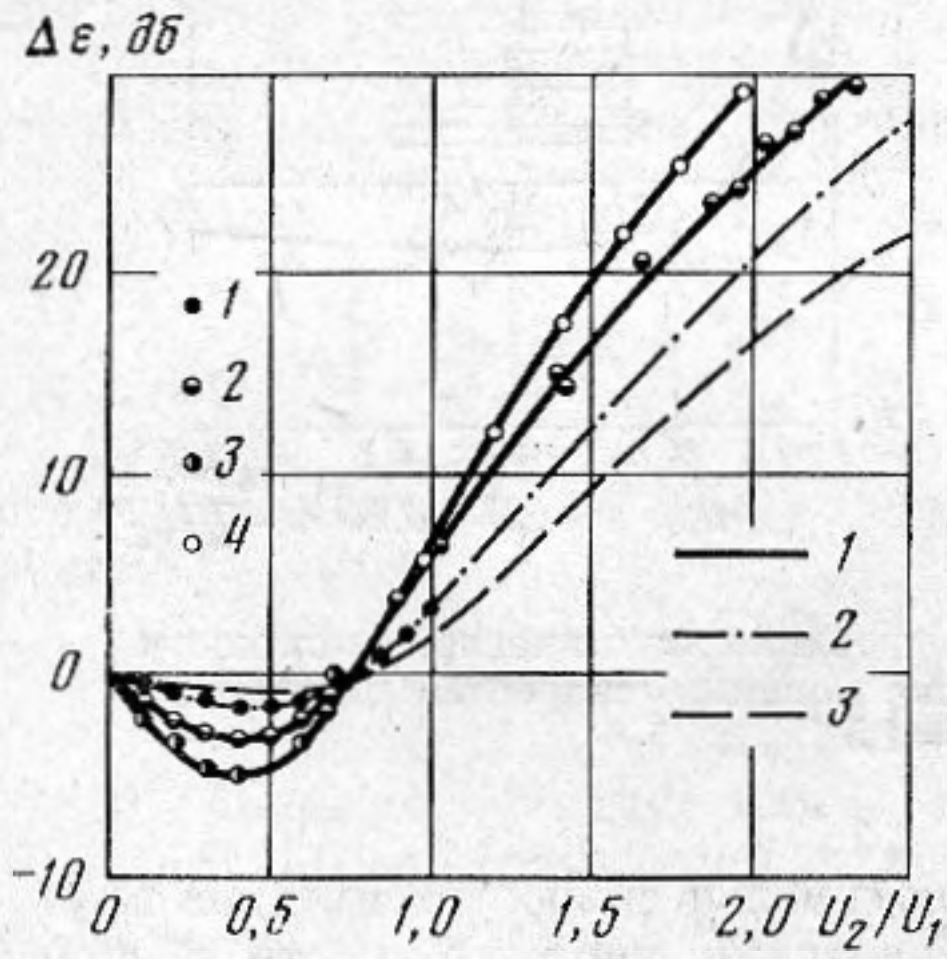
(20) $$\Delta\varepsilon=\varepsilon_{\text{с.с}}-\varepsilon'_{\text{кр.с}},$$

$$\Delta\varepsilon=10\lg\left[k'x_{\text{н}}'m^8\bar{D}+k'x_{\text{н}}'\frac{x_{\text{н}}}{x_{\text{н}}^{\text{с}}}(1+m)(1-0{,}75m)^7+\right.$$

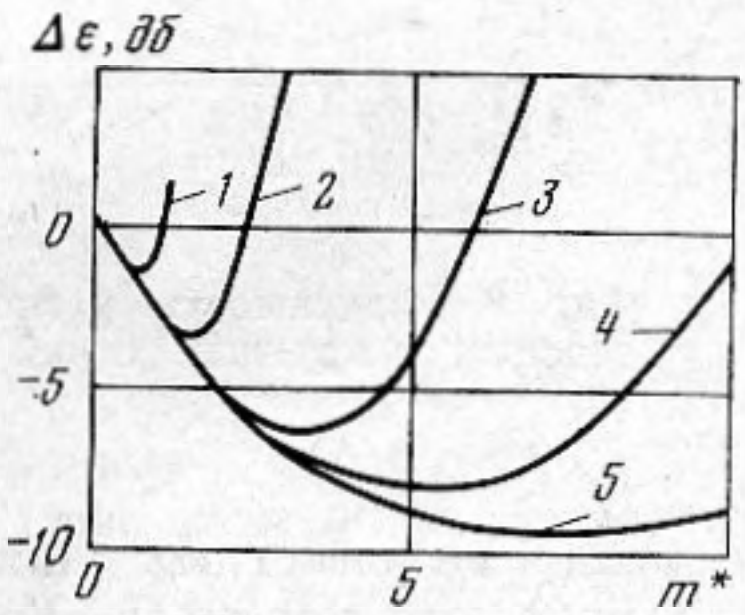
$$\left.+k_{\text{э}}'\bar{D}_{\text{э}}^2(1-k'\bar{x}_{\text{н}}'/\bar{D}_{\text{э}})\right].$$

$$\varepsilon=10\lg(W/W_0),\quad W_0=10^{-12}\ \text{вт},\quad \bar{x}=x/D_1.$$

С увеличением параметра спутности m от 0 до 0,4–0,5 акустическая мощность соосных струй уменьшается, а при дальнейшем увеличении m – возрастает (фиг. 4). Наибольшая величина снижения акустической



Фиг. 4



Фиг. 5

Фиг. 4. Зависимость разности уровней акустической мощности соосных струй и круглой струи внутреннего контура от соотношения скоростей потоков. Расчетные кривые соответствуют: *1* – $\bar{D}=2{,}0$; *2* – 1,5; *3* – 1,2; экспериментальные точки отвечают: *1* – $\bar{D}=1{,}5$; *2* – 2,0; *3* – 2,7; *4* – случай затопленной струи при $\bar{D}=2{,}0$

Фиг. 5. Зависимость разности уровней акустической мощности соосных струй и круглой струи внутреннего контура от степени двухконтурности: *1* – $\bar{D}=1{,}5$; *2* – 2,0; *3* – 3,0; *4* – 4,0; *5* – 5,0

мощности соосных струй по сравнению с акустической мощностью круглой струи внутреннего контура возрастает с увеличением соотношения диаметров $\bar{D}$. При $m=0{,}7-0{,}8$ уровни акустической мощности соосных струй и круглой струи приблизительно равны.

Рассмотрим изменение акустической мощности соосных струй в зависимости от степени двухконтурности m^*, которая определяется как отношение расхода во внешнем контуре к расходу во внутреннем контуре:

$$m^*=\frac{\rho_2U_2(D_2^2-D_1^2)}{\rho_1U_1D_1^2};$$

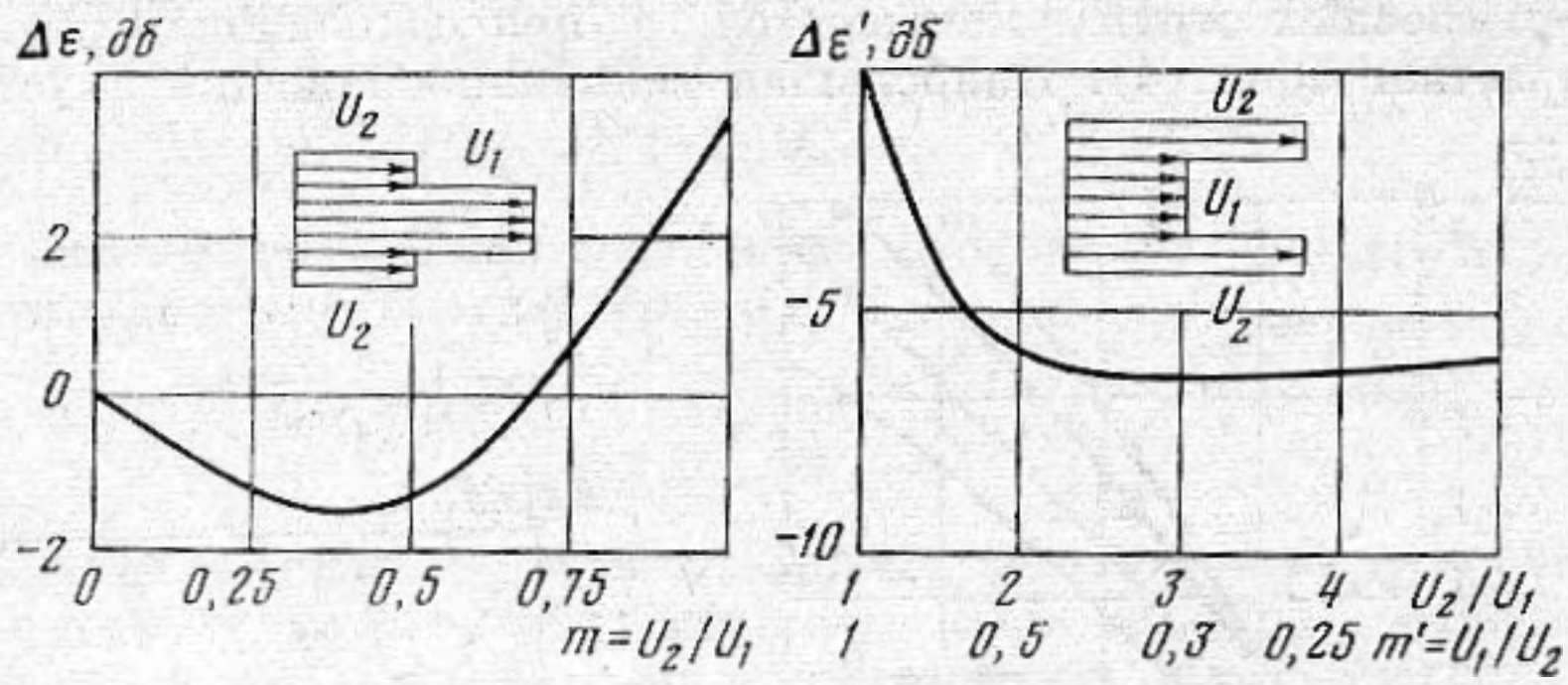
для изотермических струй $m^*=m(\bar{D}^2-1)$.

При увеличении степени двухконтурности акустическая мощность соосных струй сначала уменьшается, а затем возрастает (фиг. 5). Для определенного соотношения диаметров $\bar{D}$ существует оптимальная степень двухконтурности, при которой соосные струи дают наибольшее снижение $\Delta\varepsilon$ акустической мощности по сравнению с круглой струей внутреннего контура. Абсолютная величина $\Delta\varepsilon$ растет с увеличением m^* и $\bar{D}$.

Экспериментальные исследования пространственного распределения шума соосных струй показали, что характеристики направленности сум-

марного шума подобны соответственным характеристикам круглой струи. Спектры шума при различных углах наблюдения и спектры акустической мощности, представленные как функции от параметров эквивалентной струи, т. е. в виде функции от числа $Sh=fD_э/U_1$, где f — частота, практически совпадает с аналогичными спектральными характеристиками круглой струи [9].

Поэтому для инженерной практики может быть рекомендован следующий метод расчета шума изотермических соосных струй с обычным профилем скоростей. Акустическая мощность рассчитывается по формуле



Фиг. 6. Зависимость разности уровней акустической мощности соосных и круглых струй от соотношения скоростей истечения, $\bar{D}=1{,}5$

(15), исходя из известных диаметров сопел и скоростей потоков внутреннего и внешнего контуров. Характеристики направленности и спектры шума определяются по параметрам эквивалентной струи на основе методов расчета шума круглой струи.

Соосные струи с «перевернутым» профилем скоростей ($U_2/U_1>1$). В общем виде акустическая мощность соосных струй с «перевернутым» профилем скоростей представляется в виде суммы акустических мощностей областей смешения *I*, *II* и *III* (фиг. 1). Также как и в случае соосных струй с обычным профилем скоростей составляющие акустической мощности выражаются с помощью формул, аналогичных формулам (15)—(17) и (19). Однако можно указать диапазоны изменения соотношения скоростей потоков внутреннего и внешнего контуров, в которых формула для расчета акустической мощности соосных струй с «перевернутым» профилем скоростей представляется в упрощенном виде.

Так, при большой величине соотношения скоростей потоков $U_2/U_1\geqslant 10$ акустическую мощность соосных струй практически можно считать равной акустической мощности соответствующей кольцевой струи и определять согласно выражениям (8), (9) или (10).

В диапазоне изменения соотношения скоростей $2<U_2/U_1<10$ вследствие существования значительных градиентов скоростей при смешении высокоскоростного потока внешнего контура с окружающей средой и с потоком внутреннего контура истечение соосных струй можно представить в виде истечения кольцевой струи внешнего контура, с одной стороны, в неподвижную окружающую среду, а с другой — в спутный поток внутреннего контура.

В этом случае, так же как и при рассмотрении кольцевой струи, истекающей в неподвижную среду, оценку шума проведем в сравнении со случаем круглой струи, исходя из расчета шума начальных участков, учтя при этом увеличение длины начального участка кольцевой струи вследствие менее интенсивного нарастания ширины внутренней области смешения по сравнению со случаем истечения в неподвижную среду (фиг. 1).

Математически увеличение интенсивности излучения внешней области смешения отражается в увеличении предела интегрирования в формуле (3) на величину $\Delta x_н$, определяемую из законов сужения ядра постоянных скоростей затопленной струи и струи в спутном потоке:

$$\Delta x_н = \frac{(D_2-D_1)/4-x_н^0 \operatorname{tg}\alpha'}{\operatorname{tg}\alpha+\operatorname{tg}\alpha'}, \tag{21}$$

где α' — угол сужения ядра постоянных скоростей струи в спутном потоке, $\operatorname{tg}\alpha'=\operatorname{tg}\alpha(x_н/x_н^c)$ вычисляется с помощью выражения (18). При оценке шума внутренней области смешения учтем также, что длина начального участка струи в спутном потоке составляет $x_н'=x_н^0+\Delta x_н$ вследствие влияния внешней области смешения.

Тогда, исходя из формул (4) и (5), акустическую мощность соосных струй при $2\leqslant U_2/U_1$ можно представить в виде

$$W_{с.с}=k_0\frac{\rho U_2^8(D_2-D_1)D_2}{2C_0^5}\frac{x_н'}{x_н^0}\left[1+\frac{x_н}{x_н^c\overline{D}}(1+m')(1-0{,}75m')^7\right], \tag{22}$$

где $m'=U_1/U_2$.

Разность уровней акустической мощности соосных струй и круглой струи, истекающей из сопла внешнего контура диаметром D_2 со скоростью U_2, будет

$$\Delta\varepsilon'=10\lg\left\{\frac{(\overline{D}-1)}{2\overline{D}}\frac{x_н'}{x_н^0}\left[1+\frac{x_н}{x_н^c\overline{D}}(1+m')(1-0{,}75m')^7\right]\right\}. \tag{23}$$

В диапазоне изменения соотношения скоростей $1\leqslant U_2/U_1\leqslant 2$ $(0{,}5\leqslant m'\leqslant 1{,}0)$ с увеличением m' все большее влияние на суммарный шум соосных струй оказывает область взаимного перемешивания потоков внутреннего и внешнего контуров (область *III*) вследствие того, что скорости потоков становятся сравнимыми по величине.

В этом случае акустическую мощность, излучаемую областями *I* и *III*, целесообразно оценить при помощи введения эквивалентной струи, истекающей со скоростью U_2 из сопла диаметром $D_э$, величина которого определяется из условия постоянства количества движения.

Тогда акустическая мощность соосных струй при $1\leqslant U_2/U_1\leqslant 2$ представляется в виде

$$W_{с.с}=k_0\frac{\rho U_2^8}{C^5}\left[k_э'D_э^2+\frac{(D_2-D_1)D_1}{2}\frac{x_н'}{x_н^0}\frac{x_н}{x_н^c}(1+m')(1-0{,}75m')^7\right] \tag{24}$$

где $k_э'=k_э/k_0$ — коэффициент пропорциональности, определенный из условия $W_{с.с}=k_0\rho U_2^8D_2^2/C_0^5$ при $U_2/U_1=1$ и равенства выражений (24) и (22) при $U_2/U_1=2$, $k_э'=\psi^\beta$, $\psi=3\overline{D}(\overline{D}-1)/(4\overline{D}^2-3)$, $\beta=1{,}33(1-m'^2)$, $\overline{D}_э=\sqrt{\overline{D}^2+m'^2}-1$.

Следует отметить, что в рассматриваемом диапазоне соотношений скоростей вклад от внутренней области смешения в суммарный шум мал вследствие небольшой разницы скоростей потоков. Поэтому при оценке шума соосных струй в формуле (24) можно ограничиться только первым членом. Тогда разность уровней акустической мощности соосных струй и круглой струи внешнего контура определяется соотношением

$$\Delta\varepsilon'=10\lg k_э'+20\lg(\overline{D}_э/\overline{D}). \tag{25}$$

Результаты расчета и экспериментальных исследований шума соосных струй с «перевернутым» профилем скоростей приведены на фиг. 4 совместно с результатами исследований шума соосных струй с обычным профилем скоростей, что позволяет проследить общую тенденцию изменения акустической мощности при изменении соотношения скоростей потоков внутреннего и внешнего контуров.

Зависимость разности уровней акустической мощности соосных и круглых струй от соотношения скоростей U_2/U_1 при $\bar{D}=1{,}5$ представлена на фиг. 6. Для соосных струй с обычным профилем скоростей и с «перевернутым» профилем скоростей оптимальная величина параметра спутности, при которой наблюдается наибольшее снижение шума по сравнению с исходной круглой струей, равна $m=m'=0{,}3-0{,}5$.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Williams T. J., Ali M. R. H., Anderson J. S.* Noise and flow characteristics of coaxial jets. J. Mech. Eng. Science, 1969, *11*, 2, 133–142.
2. *Кузнецов В. М., Мунин А. Г., Самохин В. Ф.* Акустическая мощность дозвуковой изотермической двухконтурной струи. Тр. ЦАГИ, 1970, вып. 1207, стр. 10–17.
3. *Gutierrez O. A.* Aeroacoustic studies of coannular nozzles suitable for supersonic cruise aircraft applications. Proc. of the SCAR Conf., 1976, p. 2, 469–490.
4. *Кузнецов В. М., Мунин А. Г.* Характеристики шума неизотермических соосных струй. Тр. IX Всесоюзн. акустич. конф. М., 1977, стр. 13–16.
5. *Chen C. Y.* Predictions of aeroacoustic characteristics of coaxial jets. AIAA J., 1977, *15*, 3, 297–298. Русский перевод. Ракетная техника и космонавтика, М., «Мир», 1977, *15*, № 3, 12–14.
6. *Packman A. B., Kozlowski H., Gutierres O.* Jet noise characteristics of unsuppressed duct burning turbofan exhaust system. J. Aircraft, 1977, *14*, 3, 227–232.
7. *Мунин А. Г., Науменко З. Н.* Звуковая мощность участков дозвуковой струи. Уч. зап. ЦАГИ, 1970, *1*, 5. 29–38.
8. *Мунин А. Г.* Связь аэродинамических и акустических параметров дозвуковой газовой струи. Промышленная аэродинамика. М., Оборонгиз, 1962, вып. 23, стр. 200–214.
9. *Власов Е. В., Мунин А. Г.* Исследование акустических характеристик свободной турбулентной струи. Акуст. ж., 1964, *10*, 3, 271–275.
10. *Абрамович Г. Н.* Теория турбулентных струй. М., Физматгиз, 1960.

Поступила
23 января 1978 г.