

УДК 534.83:629

О СВЯЗИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ И АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СООСНЫХ СТРУЙ

КУЗНЕЦОВ В. М., ЛАВРУХИНА М. П., МУНИН А. Г.

Представлены результаты экспериментальных исследований распределений средних и пульсационных скоростей в зоне смешения изотермических соосных струй с обычным и «перевернутым» профилем скоростей (скорость внешнего потока превышает скорость внутреннего потока). На основе использования этих результатов осуществлена сравнительная оценка шума соосных струй с различным начальным профилем скоростей и проведено сравнение с данными экспериментальных исследований шума.

В последнее время в качестве одного из вариантов снижения шума выхлопа двигателей пассажирских самолетов все большее внимание привлекает идея разработки двухконтурного турбореактивного двигателя с переменным циклом работы [1]. Режим работы такого двигателя предусматривает преобразование (перевертывание) профилей скоростей и температур потоков внутреннего и внешнего контуров, т. е. наряду с обычным режимом работы, характерным для существующих двигателей, предусматривается режим работы, при котором скорость и температура потока внешнего контура превышают скорость и температуру потока внутреннего контура («перевернутый» профиль скоростей и температур).

Исследования акустических характеристик соосных струй [2-4] показали, что путем изменения начального профиля скоростей можно добиться снижения интенсивности выхлопного шума. Настоящая работа посвящена исследованию аэродинамических характеристик соосных струй с различным профилем скоростей. Установлено, что существует вполне определенная связь между изменением интенсивности шума соосных струй, связанным с изменением начального профиля скоростей, и изменением структуры турбулентного потока в зоне смешения.

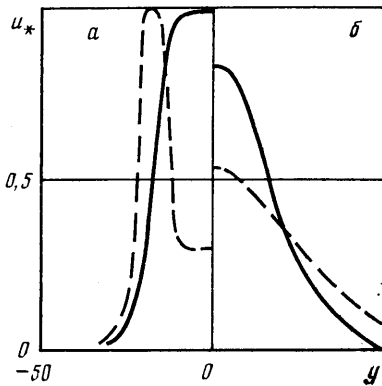
Соосные струи представляют своеобразное сочетание затопленной струи и струи, истекающей в спутный поток. Вблизи среза сопла поток внешнего контура перемешивается с окружающей средой, и одновременно происходит взаимное перемешивание потоков внутреннего и внешнего контуров. Тем самым выравнивание начального профиля средних скоростей осуществляется за счет двух процессов смешения. После смыкания пограничных слоев, соответствующих этим процессам, начиная с некоторого расстояния от среза сопла, выхлопной поток уже можно считать единой затопленной струей [1].

Рассмотрим поле средних и пульсационных скоростей в зоне смешения соосных струй на примере истечения из двухконтурного сопла с практически равной площадью среза внутреннего и внешнего контуров $D_* = D_2/D_1 = 1,4$, где D_1 и D_2 — диаметры внутреннего и внешнего сопел соответственно. Для такого двухконтурного сопла при взаимном обмене скоростей потоков сохраняется постоянным импульс, а изменения интенсивности акустического излучения можно считать только следствием изменений условий перемешивания внутреннего и внешнего потоков с окружающей средой.

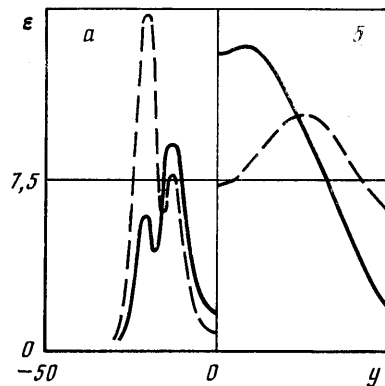
Распределения средней скорости u в сечениях $x_* = 1$ и 10 приведены

на фиг. 1, а и б соответственно, а распределение пульсационной скорости u' в этих же сечениях — на фиг. 2, а и б (сплошные кривые, в том числе и на остальных фигурах, соответствуют обычному профилю скоростей, $m = u_2/u_1 = 0,3$, а пунктирные кривые — «перевернутому» профилю скоростей, $m' = u_1/u_2 = 0,3$, u_1, u_2 — скорость истечения внутреннего и внешнего потоков соответственно, $u_* = u/u_{\max}$, $u_{\max} = 100$ м/с, $x_* = x/D_1$, x — расстояние вдоль оси от плоскости среза сопла $D_1 = 30$ мм, y мм — расстояние от оси в радиальном направлении, $\varepsilon (\%) = \sqrt{\langle u'^2 \rangle} / u_{\max}$).

Вблизи среза сопла вследствие существования двух областей смешения с каждой стороны от оси в профилях пульсационной скорости имеются



Фиг. 1



Фиг. 2

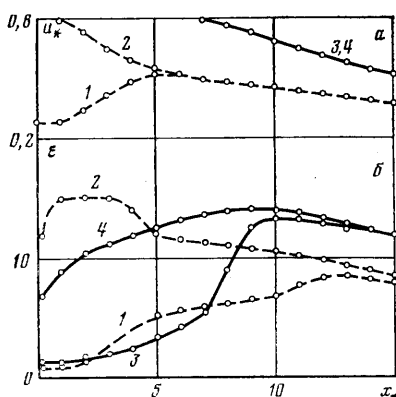
два максимума, которые постепенно сливаются по мере увеличения осевого расстояния. Поскольку градиент средней скорости при смешении высокоскоростного потока внешнего контура с неподвижной средой больше, чем при смешении потоков внутреннего и внешнего контуров, то вблизи среза сопла максимальная интенсивность турбулентности составляет большую величину в соосных струях с «перевернутым» профилем скоростей. При удалении от плоскости среза сопла происходит постепенное исчезновение ядер постоянных скоростей потоков внутреннего и внешнего контуров, сопровождающееся возрастанием осевой интенсивности турбулентности и смещением в сторону оси максимумов интенсивности турбулентности и максимума средней скорости в случае «перевернутого» профиля скоростей.

На фиг. 3 показано изменение вдоль соосных струй средней скорости и интенсивности турбулентности на оси (кривые 1 и 3) и максимальных в поперечном сечении средней скорости и интенсивности турбулентности (кривые 2 и 4). В соосных струях с обычным профилем скоростей величины осевой и максимальной средней скорости в любом сечении, естественно, совпадают, а падение скорости на оси начинается после исчезновения ядра постоянной скорости внутренней струи (кривые 3 и 4, фиг. 3, а). В случае «перевернутого» профиля скоростей с увеличением осевого расстояния величина максимальной средней скорости в сечении начинает уменьшаться (кривая 2), а осевая скорость возрастать (кривая 1) на значительно меньшем расстоянии от плоскости среза сопла. Размывание высокоскоростного потока внешнего контура сопровождается несколько более интенсивным увеличением ширины зоны смешения. На больших расстояниях от среза сопла максимальная (кривые 2 и 4, фиг. 3, б) и осевая (кривые 1 и 3) интенсивности турбулентности, так же как и максимальная средняя скорость, составляют большую величину в случае обычного профиля скоростей.

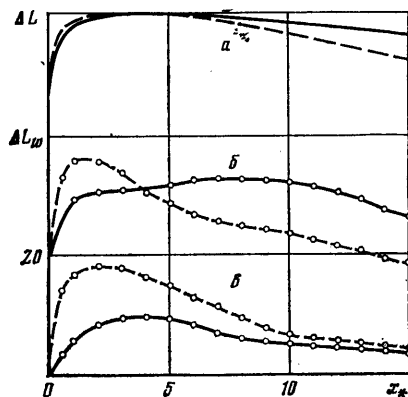
Следовательно, при истечении из двухконтурного сопла с относительно

узким внешним контуром $D_* = 1,4$ затухание полей средних и пульсационных скоростей более интенсивно происходит в соосных струях с «перевернутым» профилем скоростей. Экспериментальные исследования также показали, что при большей величине соотношения диаметров, например при истечении соосных струй из двухконтурного сопла $D_* = 2,1$, $D_1 = 20$ мм, различие интенсивностей затухания полей средних и пульсационных скоростей в зоне смешения выражено менее отчетливо для различных начальных условий.

Исходя из представленных выше результатов измерений, можно объяснить различие характеристик шума соосных струй с обычным и «перевер-



Фиг. 3



Фиг. 4

нутым» профилем скоростей и провести сравнительную оценку интенсивности акустического излучения. В качестве исходного используем выражение для акустической мощности элементарного объема dV турбулентного потока [5, 6]

$$dW = k \int_V (u'u)^2 dV, \quad dV = 2\pi y dy dx$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Видно, что об изменении интенсивности акустического излучения вдоль турбулентных струй можно судить по распределению величины производения средней и пульсационной скоростей в различных поперечных сечениях. Так, результаты соответствующей оценки изменения акустической мощности струи, обусловленного изменением степени начальной турбулизации потока, обнаруживают хорошее соответствие с данными экспериментальных исследований [5].

Сравнение шума соосных струй с различным профилем скоростей проведем при постоянстве внешнего диаметра сопла D_2 и максимальной скорости истечения u_{\max} , т. е. условию равенства тяги будем удовлетворять только за счет вариаций соотношений скоростей потоков и диаметров внутреннего и внешнего контуров. Рассмотрим сначала случай истечения соосных струй из сопла с практически равной площадью среза внутреннего и внешнего контуров ($D_* = 1,4$) при одинаковой величине соотношения скоростей потоков $m = m' = 0,3$.

Очевидно, что при удалении от плоскости среза сопла вследствие более быстрого затухания полей средних и пульсационных скоростей интенсивность излучения шума более резко должна затухать в случае «перевернутого» профиля скоростей. Например, такая закономерность отмечается при измерении шума вблизи внешней границы зоны смешения соосных струй (фиг. 4, а, где $\Delta L = L - L_{\max}$, L — уровень суммарного шума, дБ).

Результаты расчета изменения акустической мощности вдоль оси,

исходя из интегрирования в поперечных сечениях зоны смешения выражения $(u'u)^4 y dy$, представлены на фиг. 4, б в виде функции ΔL_w от x_* , где $\Delta L_w = 10 \cdot \lg (dW/dx_*)$, дБ. Сравнительную оценку суммарной акустической мощности можно провести посредством вычисления площади под каждой кривой $dW/dx_* = \varphi(x_*)$.

Вблизи среза сопла ($x_* < 4$) вследствие большей интенсивности турбулентных пульсаций скорости интенсивность излучения шума составляет большую величину в случае «перевернутого» профиля скоростей (фиг. 4, б). На значительных расстояниях $x_* > 5$ от среза сопла интенсивность излучения больше в случае обычного профиля скоростей вследствие больших значений средней скорости и интенсивности турбулентности.

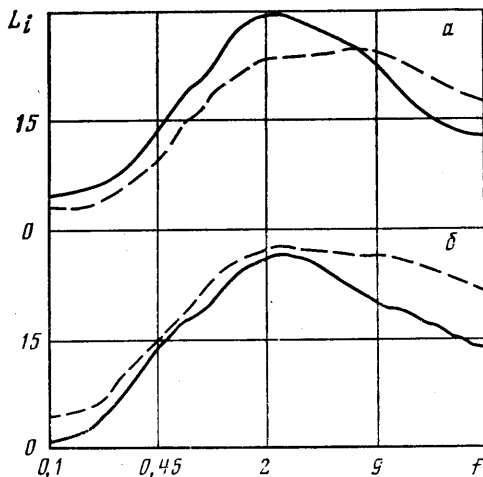
Расчитанное распределение интенсивности излучения шума вдоль оси позволяет объяснить также наблюдающееся различие спектральных характеристик шума соосных струй с различным профилем скоростей, результаты измерения которых представлены на фиг. 5, а в виде $L_i = \varphi(f)$, где L_i — уровень акустической мощности в третьоктавной полосе частот, f , кГц — частота.

Известно [7], что высокочастотный шум излучается в основном вблизи среза сопла, а низкочастотный — на значительном удалении. По мере перемещения от среза сопла интенсивность излучения высокочастотных составляющих шума ослабляется, а низкочастотных — возрастает. Поэтому в случае «перевернутого» профиля скоростей интенсивность излучения больше в области высоких частот, а в случае обычного профиля скоростей — в области низких частот (фиг. 5, а).

В целом соосные струи с обычным профилем скоростей являются более интенсивным генератором шума; рассчитанная и экспериментально определенная разность уровней акустической мощности составляет примерно 3 дБ. Меньшая величина акустической мощности соосных струй с «перевернутым» профилем скоростей объясняется небольшой шириной внешнего контура и, следовательно, резким снижением протяженности ядра высокоскоростного потока или уменьшением длины участка наиболее интенсивного излучения звука.

При истечении соосных струй с различным профилем скоростей из двухконтурного сопла с относительно широким внешним контуром $D_* = 2,1$, $D_i = 20$ мм меньшая акустическая мощность генерируется в случае обычного профиля скоростей (фиг. 4, в и 5, б). Разности уровней акустической мощности, определенные экспериментальным и расчетным путем, составляют 4,5 и 6 дБ соответственно. Отметим, что в этом случае истечения условие постоянства тяги выполняется при различной величине соотношения скоростей потоков внутреннего и внешнего контуров $m = 0,8$ и $m' = 0,3$.

Пониженные уровни шума соосных струй с обычным профилем скоростей, истекающих из двухконтурного сопла с относительно широким внешним контуром, обусловлены существенным снижением градиента средней скорости при смешении высокоскоростного внутреннего потока с окружающей средой и, следовательно, снижением интенсивности турбулентных пульсаций скорости. Наиболее отчетливо превышение уровней шума



Фиг. 5

в случае «перевернутого» профиля скоростей наблюдается в области высоких частот (фиг. 5, б), что объясняется большой величиной разности интенсивностей акустического излучения вблизи среза сопла (фиг. 4, в).

Сравнение шума соосных струй с обычным профилем скоростей, истекающих из сопла $D_*=2,1$, $m=0,6$, и шума равных по тяге соосных струй с «перевернутым» профилем скоростей, истекающих из сопла $D_*=1,4$, $m'=0,3$, показало также, что несколько меньшая акустическая мощность генерируется в случае обычного профиля скоростей. Наиболее отчетливо разница уровней шума также проявляется в области высоких частот и обусловлена существенным различием интенсивности излучения соосных струй вблизи среза сопла.

Таким образом, установлена вполне определенная связь между распределением в зоне смешения средних и пульсационных скоростей и интенсивностью акустического излучения, т. е. изменения акустических характеристик соосных струй, связанные с преобразованием начального профиля скоростей, объясняются изменением структуры турбулентного потока в зоне смешения. При истечении соосных струй из двухконтурного сопла с относительно узким внешним контуром с точки зрения генерирования менее интенсивного шума целесообразно использование «перевернутого» профиля скоростей, а при истечении из сопла с широким внешним контуром — обычного профиля скоростей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов В. М., Мушин А. Г. Шум соосных струй. Изотермические струи.— Акуст. ж., 1978, т. 24, в. 6, с. 878–887.
2. Bhuiani P. K. A unique coannular plug nozzle jet noise prediction procedure.— AIAA Pap., 1980, № 1007. 10 p.
3. Мушин А. Г., Власов Е. В., Каравосов Р. К., Кузнецов В. М., Лебедева О. В. Активные методы снижения шума реактивных струй.— В кн.: Сборник докл. 3-й Всесоюз. конф. по борьбе с шумом и вибрацией, Челябинск, 1980. Вып. 1. Челябинск, 1980, с. 245–248.
4. Таппа Н. К. Coannular jets — are they really quiet and why? — J. Sound and Vibration, 1980, v. 72, № 1, p. 97–118.
5. Кузнецов В. М., Мушин А. Г. Исследование акустических характеристик турбулентных струй.— Акуст. ж., 1981, т. 27, в. 6, с. 906–913.
6. Lighthill M. J. On sound generated aerodynamically. 1. General theory.— Proc. Roy. Soc. Ser. A., 1952, v. 211, № 1107, p. 564–587.
7. Мушин А. Г., Кузнецов В. М., Леонтьев Е. А. Аэродинамические источники шума. М.: Машиностроение, 1981. 248 с.

Москва

Поступила в редакцию
7.VIII.1981