

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ.
ШУМЫ И ВИБРАЦИИ

УДК 534.83

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ШУМА
РЕАКТИВНЫХ СТРУЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ПАССАЖИРСКИХ САМОЛЕТОВ

© 2010 г. В. М. Кузнецов

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского

Московский комплекс ЦАГИ

105005 Москва, ул. Радио 17

E-mail: vmkuznetsov@mtu-net.ru

Поступила в редакцию 10.08.08 г.

Рассмотрено современное состояние проблем снижения авиационного шума. Отмечено, что для удовлетворения ужесточающихся нормативных требований по шуму для пассажирских самолетов необходимо применение эффективных способов снижения шума струй турбореактивных двигателей. Представлены результаты экспериментальных исследований методов снижения шума струй, проведенных в заглушенной камере ЦАГИ. Определена акустическая эффективность методов снижения шума струй за счет применения сопел с вырезами шевронного типа в боковых стенках, изменения параметров двухконтурного сопла посредством изменения относительного расположения сопел внутреннего и внешнего контуров, установки эжекторного шумоглушающего сопла и организации истечения газового “термоакустического” экрана вблизи выхлопа реактивной струи.

PACS: 43.28.Ra

ВВЕДЕНИЕ

Снижение вредного воздействия авиационного шума на пассажиров и население, проживающее вблизи аэропортов, является весьма сложной проблемой, которая должна решаться посредством осуществления комплекса различных мероприятий с учетом технических возможностей и экономической целесообразности [1, 2].

Постановка и способы решения современных проблем снижения нежелательного воздействия авиационного транспорта на окружающую среду и человечество иницируются международной организацией гражданской авиации ИКАО. В рамках этой организации создан постоянно действующий Комитет по защите окружающей среды от воздействия авиации САЕР, занимающийся проблемами снижения авиационного шума и эмиссии вредных выбросов из авиационных двигателей.

В соответствии с введенными в 2006 году нормами Главы 4 Стандарта ИКАО допустимая суммарная величина уровней шума современного самолета в контрольных точках на местности уменьшена на 10 EPN дБ по сравнению с действующими нормативными требованиями по шуму Главы 3. В ближайшие годы ожидается дальнейшее ужесточение международных нормативных требований по авиационному шуму, что должно сопровождаться постепенным ограничением и запретом эксплуатации наиболее шумных самолетов в международных аэропортах. Однако уже в настоящее время существует мнение, что новые

нормы являются недостаточно жесткими и в ближайшие годы при разработке перспективных нормативных требований Главы 5 необходимо предусмотреть снижение допустимых уровней шума самолетов еще на 10 EPN дБ [2].

В России разработана и выполняется “Комплексная Программа работ на период 2002–2010 гг. по проблеме снижения шума, эмиссии и повышения точности навигации отечественных самолетов и вертолетов в обеспечение требований норм ИКАО и ЕС”. В принятой Программе считается необходимым обеспечение соответствия уровней шума современных самолетов нормативным требованиям Главы 4 Стандарта ИКАО; предусмотрены также разработка и внедрение рекомендаций по снижению уровней шума самолетов с определенным запасом относительно новых нормативных требований ИКАО.

Снижение интенсивности шума, излучаемого используемыми на современных и перспективных самолетах двухконтурными турбореактивными двигателями, может быть осуществлено применением совокупности различных методов снижения. Определенный выигрыш в снижении уровней шума выхлопного потока достигается за счет усовершенствований конструктивных элементов выхлопных устройств двигателей сложной конфигурации, приводящих к изменению условий истечения струй и их смешения с окружающей средой. Что касается возможностей снижения уровней шума со стороны выхлопа современных двухконтурных турбореактивных двига-



Рис. 1. Выхлопная часть двигателя с двухконтурным шевронным соплом.

телей, то здесь, конечно, разумно рассматривать только те способы, которые не приводят к значительным потерям тяги силовой установки.

Данная статья является продолжением опубликованной ранее в журнале обзорной статьи по шуму пассажирских самолетов [1], в которой представлены способы снижения шума самолетов за счет размещения в каналах силовой установки различных звукопоглощающих конструкций, изложены проблемы снижения шума самолетов с винтовентиляторными двигателями и шума сверхзвуковых пассажирских самолетов, дано описание характерных особенностей источников шума обтекания элементов планера самолета; рассмотрены также проблемы и методы снижения шума в кабинах пассажирских самолетов. В настоящей работе, рассматривающей возможности снижения уровней шума перспективных самолетов за счет изменения условий истечения реактивных струй двигателей, представлены результаты экспериментальных исследований методов снижения шума струй, подразумевающих возможность их практической реализации на натуральных изделиях.

Основное внимание при решении проблем снижения шума самолетов должно уделяться снижению интенсивности генерируемого шума, т.е. созданию малошумных двигателей, выбору рациональной в отношении акустики компоновки летательного аппарата, применению в силовой установке глушителей шума и специальных конструкций и материалов для снижения шума [3, 4]. В ближайшие годы для российских исследователей в области авиационной акустики актуальными являются исследования по снижению шума перспективных гражданских регионального, ближнемагистрального, магистрального самолетов и, в частности, исследования по созданию эффективных

систем шумоглушения нового поколения для силовых установок разрабатываемых самолетов Суперджет-100, МС-21 для обеспечения выполнения требований по шуму на местности Главы 4 Стандарта ИКАО с запасом не менее 10 EPNдБ.

Снижение уровней шума современных и перспективных дозвуковых самолетов может быть достигнуто за счет сбалансированного снижения интенсивности источников шума и применения звукопоглощающих конструкций в силовой установке, например, за счет применения высокоэффективной системы шумоглушения в канале воздухозаборника и шевронных сопел, смесителей потоков в выхлопной части двигателя [1, 5]. Так, концепция сбалансированного снижения шума реализуется, например, в рамках проекта "Quieted Tehnology Demonstrator" и заключается в увеличении площади звукопоглощающих конструкций в воздухозаборнике и применении шевронных кромок сопел двигателя (рис. 1).

Достаточно высокая акустическая эффективность при определенном режиме истечения может быть получена, например, при применении сопел с центральным телом, перфорированной поверхностью стенок и так называемых "bluebell" сопел [6, 7, 8]. Эти сопла имеют синусоидальную линию кромки шевронного типа и синусоидальную форму поперечного сечения (рис. 2). В основе конструкции таких весьма оригинальных сопел лежат две концепции, связанные с использованием шевронов для увеличения выходного периметра сопла или увеличения области смешения потоков и с использованием внутренних гофров для увеличения интенсивности смешивания основного потока со вторичным потоком. Недостатком конструкции этих сопел является зависимость акустической эффективности от режима истечения; при отклонении от расчетного режима акустический эффект менее заметен.

Многочисленные экспериментальные исследования [5, 9, 10] показали, что применение шевронных сопел (рис. 1, 2) весьма привлекательно с точки зрения простоты конструкции устройств при незначительном изменении тяги силовой установки. Аналогичным акустическим эффектом обладает также многосопловое устройство для снижения шума реактивной струи, где газ как к периферийным, так и к основному соплу поступает из общей камеры смешения [11] (рис. 3). Максимальный акустический эффект в случае применения этого глушителя достигает величины $2 \div 3$ дБ в широкой полосе частот и объясняется тем, что при высокочастотном звуковом облучении происходит ослабление турбулентного смешения в начальном участке струи, уменьшение характерного масштаба турбулентности в слое смешения и, следовательно, снижение широкополосного шума [12, 13]. Применение шевронных сопел или многосоплового устройства при

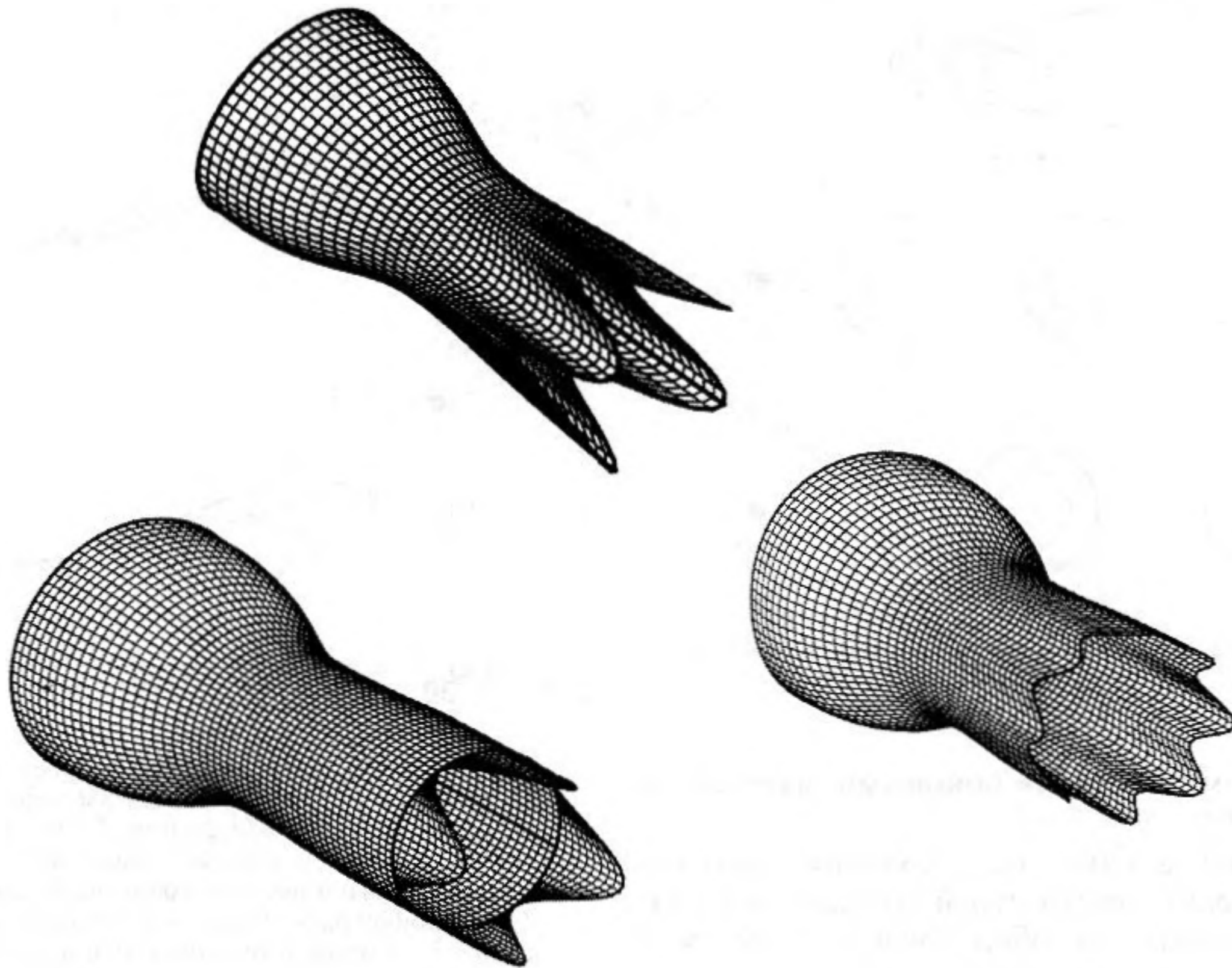


Рис. 2. Схемы сопел, выполненных в виде “колокола”.

сверхзвуковых режимах истечения приводит к уменьшению интенсивности дискретных составляющих шума.

Итак, для достижения эффекта снижения уровней генерируемого шума со стороны выхлопа реактивного двигателя необходимо изменение начальных условий истечения, приводящее к изменению условий смешения истекающих потоков с окружающей средой и вызывающее снижение интенсивности акустического излучения движущейся средой. Далее представлены результаты экспериментальных исследований методов снижения шума струй, вызывающих снижение интенсивности акустического излучения истекающих струй и, в частности, вызывающих изменение характеристик направленности шума струй в плоскостях, перпендикулярных направлению истечения, т.е. приводящих к нарушению симметричности звуковых полей реактивных струй.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для снижения уровней шума в направлениях, соответствующих, например, контрольным точкам измерений шума на местности в окрестностях аэропорта могут быть применены такие способы как создание “газового экрана” между реак-

тивной струей и окружающей средой, изменение относительного расположения сопел внутреннего и внешнего контуров турбореактивного двигателя и изменение конструкций этих сопел.

Снижение уровней генерируемого шума в выбранном направлении относительно выхлопа двигателя может быть достигнуто за счет простого изменения формы конструкции выходного устройства, а именно, применения конического

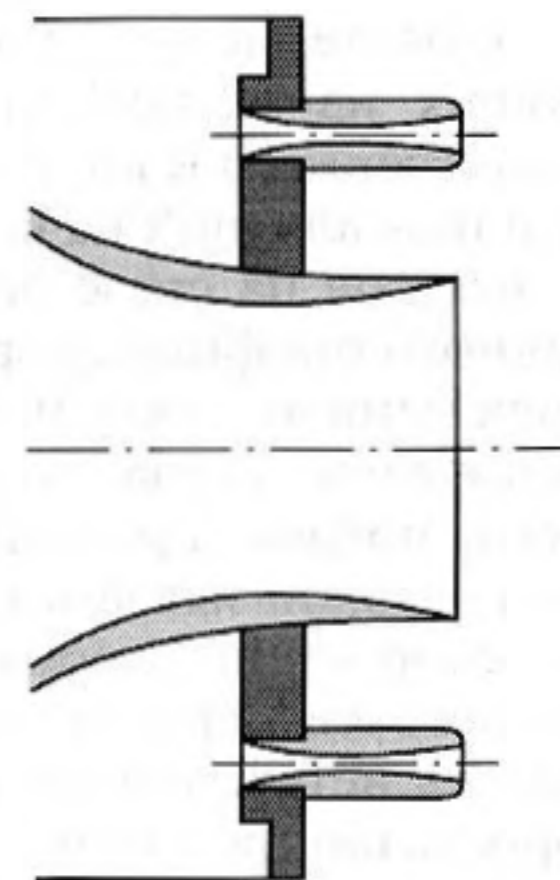


Рис. 3. Схема многосоплового устройства.

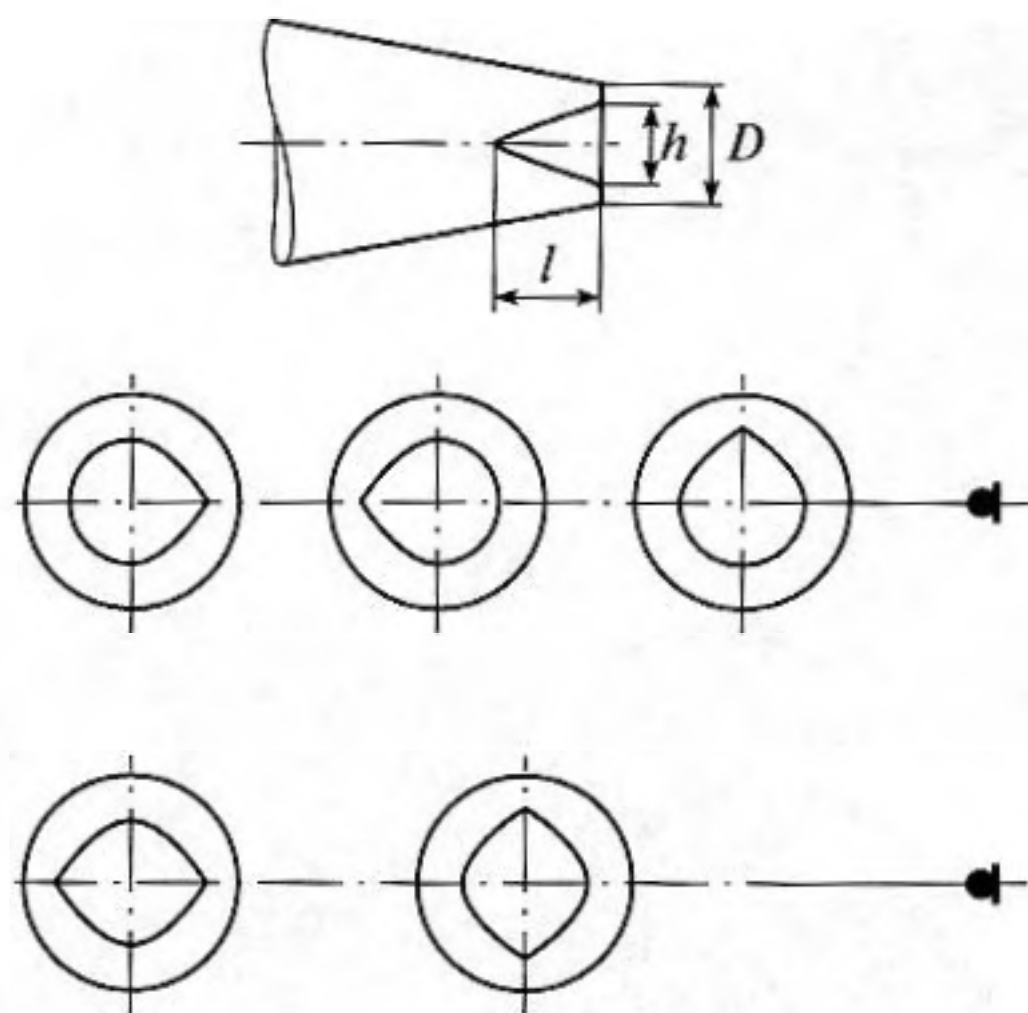


Рис. 4. Схемы модельных сопел с вырезами в боковых стенках.

сопла с одним или двумя боковыми вырезами в стенке (рис. 4).

Экспериментальные исследования аэроакустических характеристик струй проводились в заглушенной камере [3], оборудованной системой подачи сжатого воздуха и вывода его из камеры в окружающую среду. При расположении микрофона со стороны выреза при небольших углах наблюдения θ уровни суммарного шума уменьшаются на величину порядка 3 дБ (рис. 5), а уровни высокочастотных составляющих шума снижаются на величину до 7–8 дБ (рис. 6); при больших углах наблюдения уровни шума незначительно возрастают. Меньшая интенсивность акустического излучения со стороны выреза объясняется более равномерным смещением выхлопного потока с окружающей средой [13, 14]. Очевидно, что боковые вырезы в стенках выхлопных сопел должны быть ориентированы в направлении расположения контрольных точек измерений шума на местности при взлете или наборе высоты самолета.

Измерения характеристик шума соосных струй, истекающих из эксцентрично расположенных сопел внутреннего и внешнего контуров (рис. 7), проводились для двух начальных профилей скоростей потоков на срезе двухконтурного сопла [13]: обычного профиля скоростей, характерного для современных двухконтурных турбореактивных двигателей, когда скорость истечения внутреннего потока превышает скорость внешнего потока, и так называемого “перевернутого” профиля скоростей, рассматриваемого в качестве возможного для перспективных двигателей, когда скорость истечения внешнего потока превышает скорость внутреннего потока.

При изменении относительного расположения сопел внутреннего и внешнего контуров в

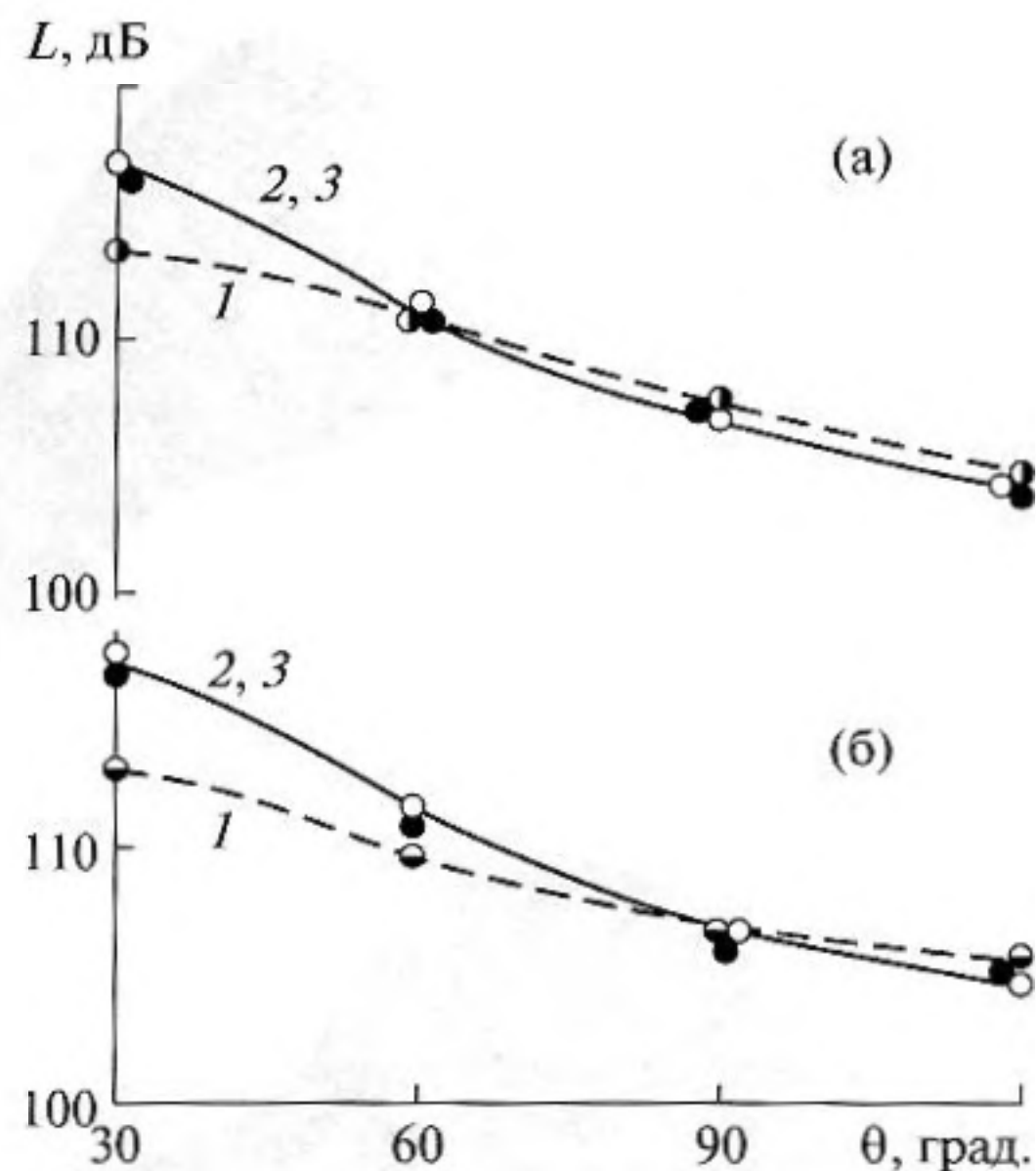


Рис. 5. Характеристики направленности шума струй, истекающих из сопла а) – с одним вырезом в стенке, б) – с двумя вырезами в стенке; 1 – микрофон расположен со стороны выреза в плоскости, проходящей через ось струи и место наибольшего выреза в стенке, 2 – микрофон расположен в перпендикулярной плоскости, 3 – случай истечения струи из круглого сопла; $R = 1.5$ м, $D = 50$ мм, $U_c = 300$ м/с.

продольном направлении и при эксцентричном расположении сопел звуковое поле истекающих соосных струй изменяется. Так, при эксцентричном расположении внутреннего и внешнего сопел нарушается симметричность зон смешения истекающих соосных струй относительно продольных осей сопел. Вследствие этого изменяются характеристики направленности шума по сравнению с характеристиками круглой струи как в плоскости, перпендикулярной направлению истечения, так и в плоскости, параллельной направлению истечения со стороны наибольшего удаления кромок сопел.

В плоскости, перпендикулярной направлению истечения, диаграмма направленности шума соосных струй (кривая 1 на рис. 8), истекающих из эксцентрично расположенных сопел, имеет эллипсовидный характер; при этом максимальные уровни шума наблюдаются со стороны соприкосновения сопел, а минимальные – со стороны их наибольшего удаления друг от друга. Причем уровни шума соосных струй, истекающих из эксцентрично расположенных сопел, со стороны их наибольшего удаления меньше, а со стороны соприкосновения сопел – больше, чем уровни шума струй, истекающих из сопел без эксцентриситета (кривая 2 на рис. 8). В плоскости, параллельной направлению истечения, характеристика направленности шума соосных струй со стороны соприкосновения сопел подобна соответствующей

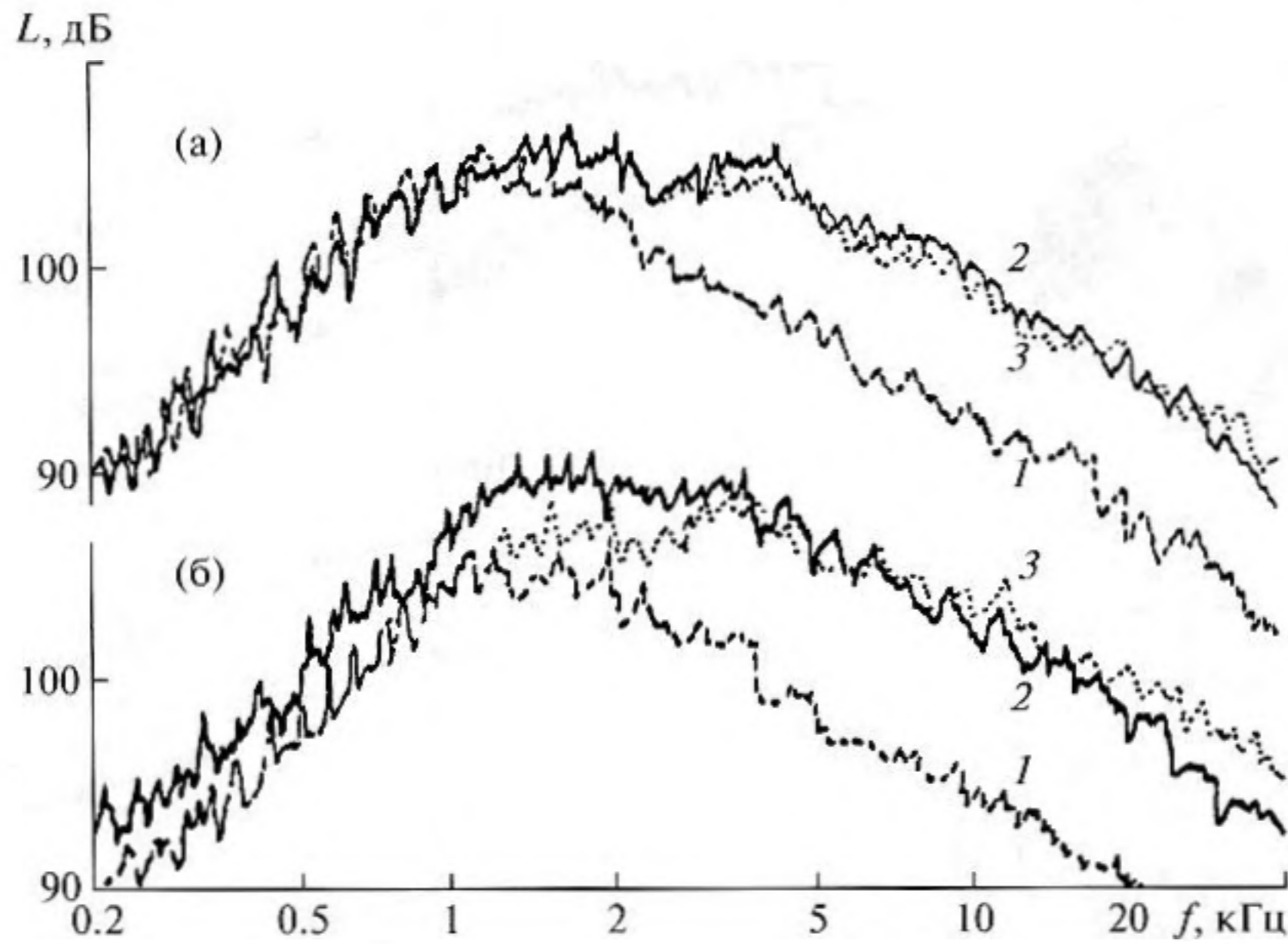


Рис. 6. Спектры шума струй, истекающих из сопла а) — с одним вырезом в стенке, б) — с двумя вырезами в стенке; 1 — микрофон расположен со стороны выреза в плоскости, проходящей через ось струи и место наибольшего выреза в стенке, 2 — микрофон расположен в перпендикулярной плоскости, 3 — случай истечения струи из круглого сопла; $R = 1.5$ м, $\theta = 30^\circ$, $D = 50$ мм, $U_c = 300$ м/с.

шей характеристике одиночной струи. Со стороны наибольшего удаления сопел характеристика направленности шума несколько выравнивается, так что разность максимальных и минимальных уровней шума становится меньше. Спектральный состав шума соосных струй при этом изменяется незначительно.

Такое изменение пространственного распределения шума соосных струй с обычным профилем скоростей объясняется изменением условий истечения высокоскоростной струи внутреннего контура [15, 16]. Так, со стороны соприкосновения кромок сопел внутренний поток истекает уже не в спутный поток внешнего контура, а практически в неподвижную среду, что приводит к увеличению градиента средней скорости и, следовательно, увеличению интенсивности акустического излучения. Со стороны наибольшего удаления сопел возрастает поперечный размер внешнего потока, что соответственно увеличивает соотношение диаметров сопел. Это приводит к затягиванию процесса смешения высокоскоростной внутренней струи со спутным потоком внешнего контура, большему проявлению эффекта экранирования звука турбулентным потоком и выражается в снижении интенсивности акустического излучения со стороны наибольшего удаления сопел.

В случае “перевернутого” профиля скоростей эксцентричность расположения сопел вызывает незначительное увеличение уровней шума соосных струй (до $1 \div 2$ дБ). Это объясняется тем, что

шум соосных струй с “перевернутым” профилем скоростей обусловлен в основном смещением высокоскоростного потока внешнего контура с окружающей средой. При эксцентричном расположении сопел происходит преобразование вы-

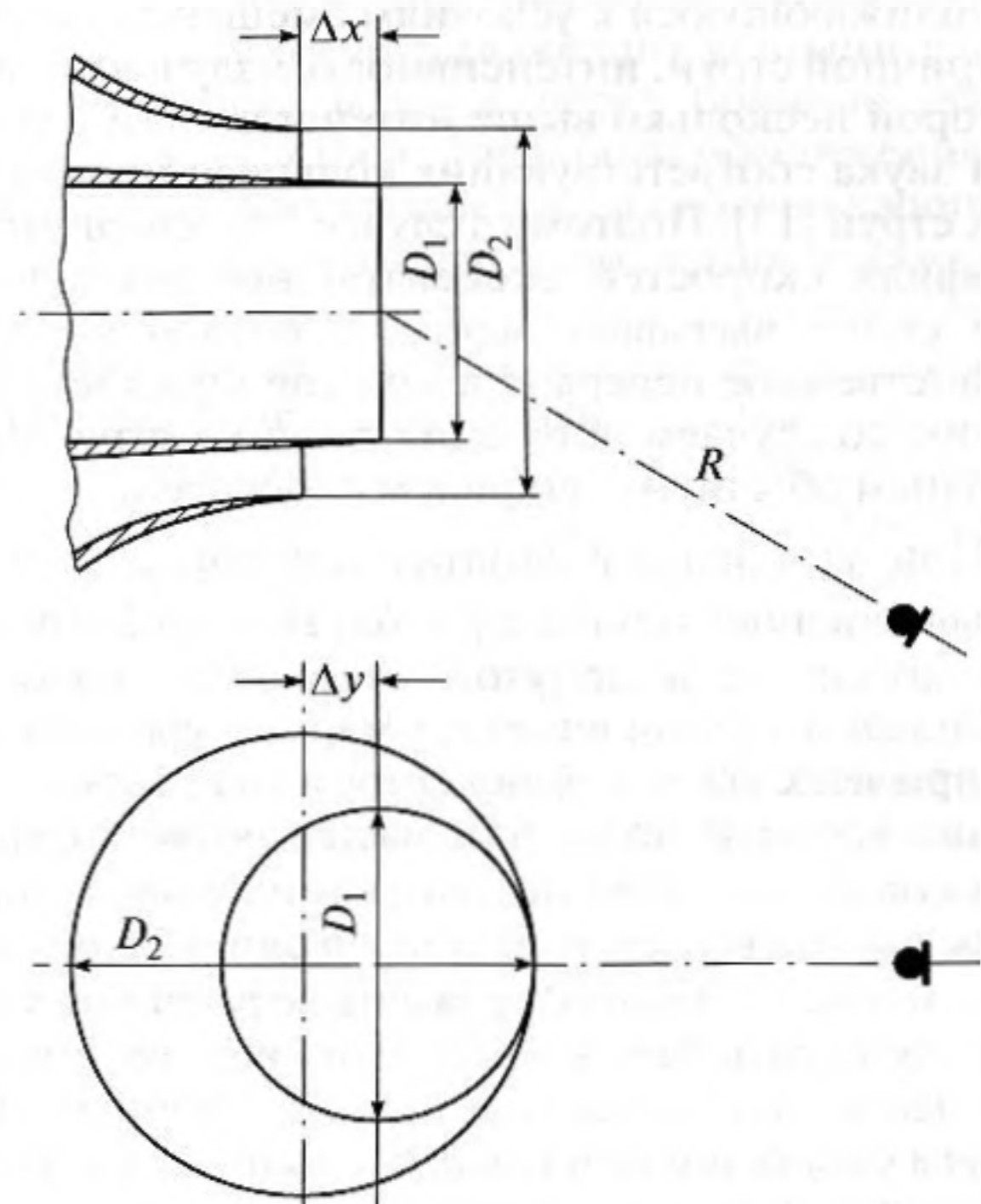


Рис. 7. Схема относительного расположения сопел внутреннего и внешнего контуров.

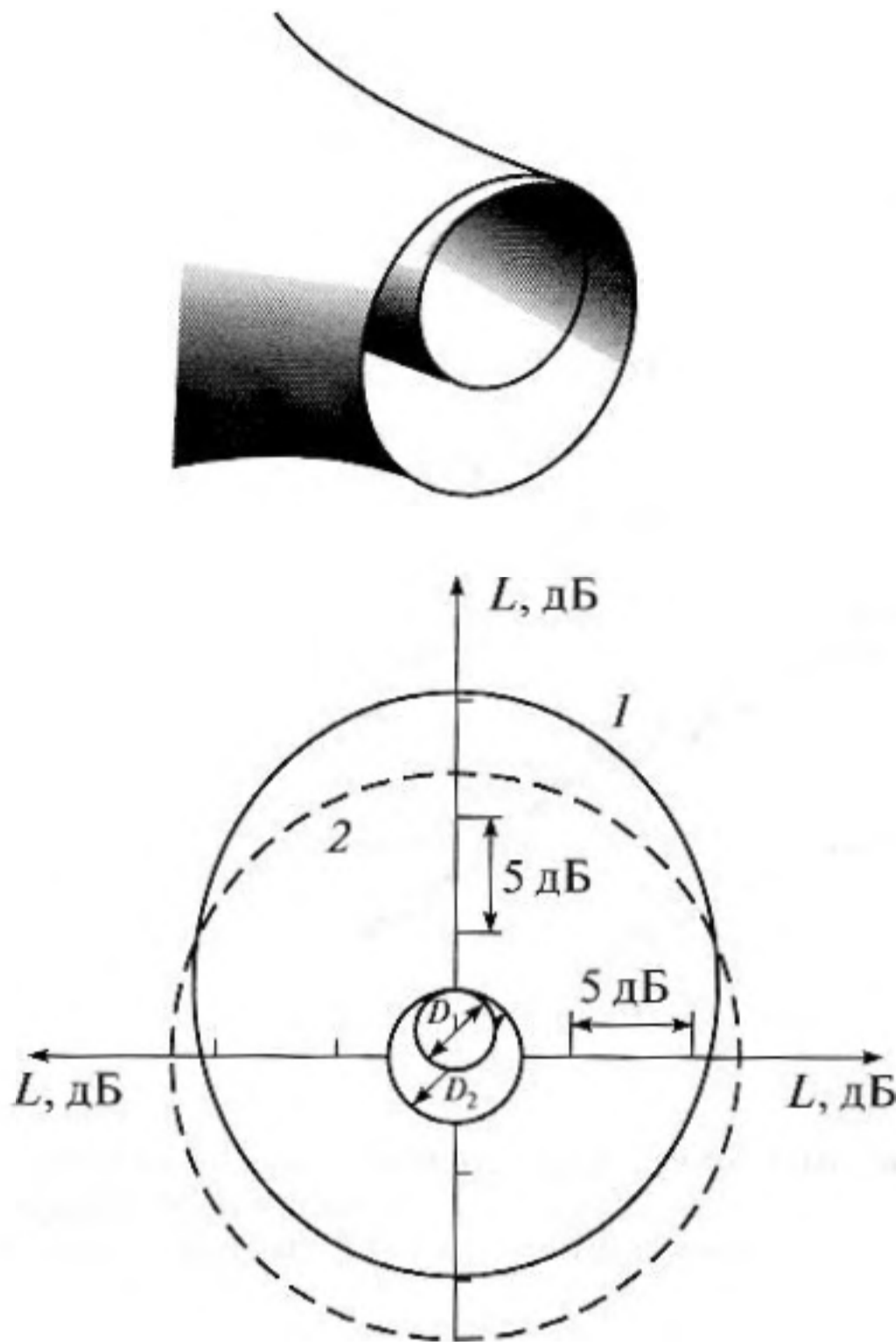


Рис. 8. Характеристика направленности шума соосных струй $D_2/D_1 = 2.1$; $D_1 = 20$ мм; $U_2/U_1 = 0.5$ при угле наблюдения $\theta = 30^\circ$ в плоскости, перпендикулярной направлению истечения.

соосной струи внешнего контура в струю, по условиям смещения постепенно приближающуюся к условиям смещения осесимметричной струи, интенсивность излучения звука которой несколько выше интенсивности излучения звука соответствующих кольцевой или соосных струй [13]. Поэтому в случае "перевернутого" профиля скоростей эксцентричное расположение сопел вызывает менее значительное пространственное перераспределение шума по сравнению со случаем истечения соосных струй с начальным обычным профилем скоростей.

При утопленном внутреннем сопле относительно внешнего сопла $\Delta\bar{x} = \Delta x/D_1 = -0.33$ (рис. 7) для случая "перевернутого" профиля скоростей наблюдается увеличение суммарных уровней шума при всех углах наблюдения и некоторое снижение уровней шума при выдвинутом внутреннем сопле $\Delta\bar{x} = 0.33$ по сравнению с расположением выходных сечений сопел в одной плоскости $\Delta\bar{x} = 0$ (рис. 9). Наиболее заметное различие уровней шума отмечается в области средних и высоких частот. Шум соосных струй с обычным профилем скоростей при таких расположениях сопел различается незначительно.

Сравнение характеристик шума соосных струй с различным профилем скоростей показывает,

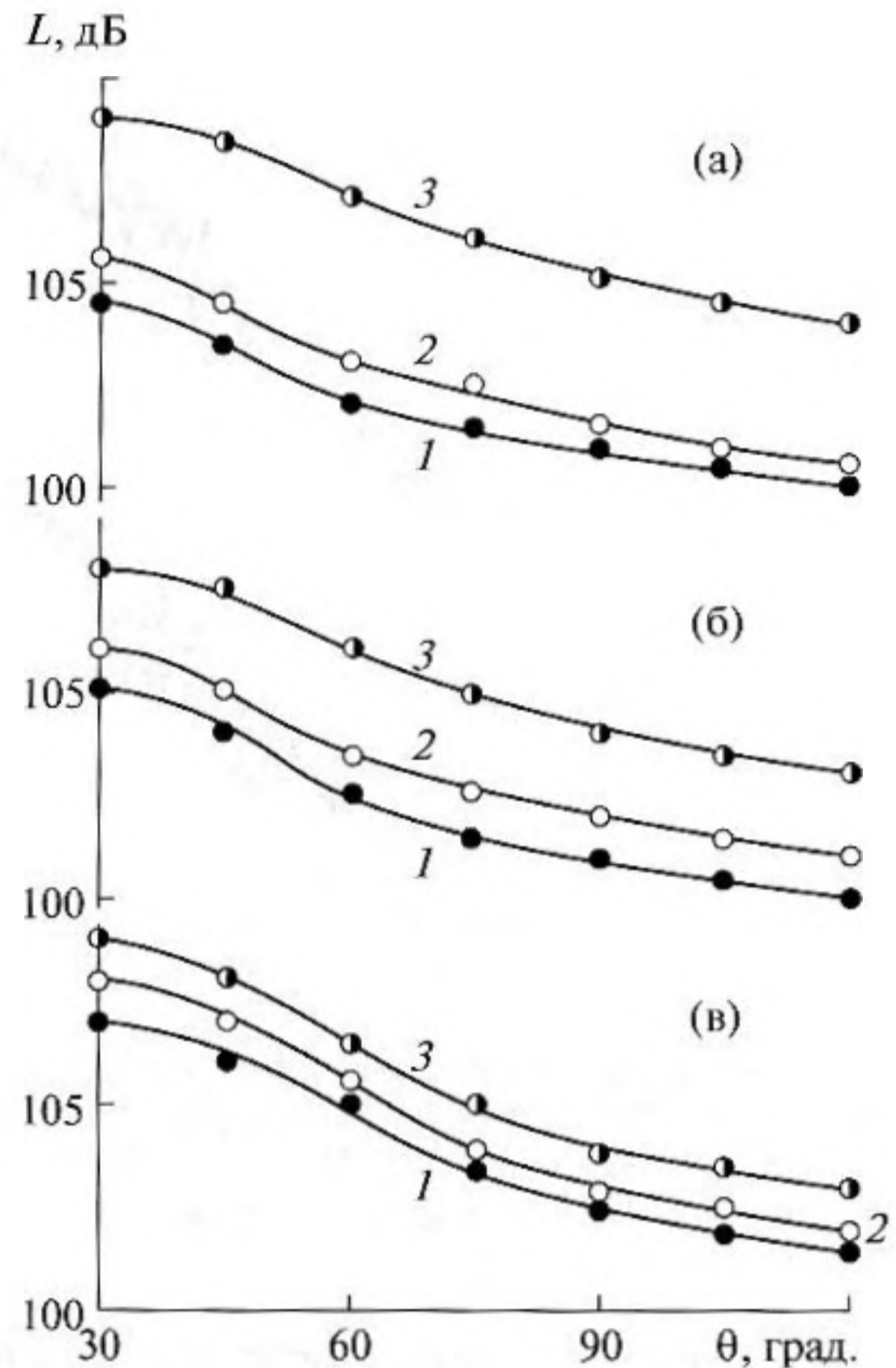


Рис. 9. Характеристики направленности шума соосных струй с "перевернутым" профилем скоростей $D_1 = 30$ мм, $D_2 = 42$ мм, $U_2 = 300$ м/с а) — $m' = U_2/U_1 = 0.3$, б) — $m' = 0.5$, в) — $m' = 0.8$ при различных величинах относительного продольного смещения сопел внутреннего и внешнего контуров 1 — $\Delta\bar{x} = 0.33$, 2 — $\Delta\bar{x} = 0$, 3 — $\Delta\bar{x} = -0.33$.

что при выдвинутом внутреннем сопле характеристики направленности и спектры шума сопоставляются так же, как и при расположении сопел в одной плоскости. Так, при небольших углах наблюдения $\theta = 30^\circ$ меньшие уровни шума наблюдаются для "перевернутого" профиля скоростей; спектры шума при различных углах наблюдения и спектры акустической мощности сопоставляются таким образом, что в области низких и средних частот более шумными являются соосные струи с обычным профилем скоростей, а в области высоких частот $f > 10000$ Гц — струи с "перевернутым" профилем скоростей (рис. 10). При утопленном внутреннем сопле меньшие уровни суммарного шума наблюдаются в случае обычного профиля скоростей. Спектры шума при различных углах наблюдения и спектры акустической мощности сопоставляются по аналогии с предыдущим случаем: большие уровни шума в области низких частот наблюдаются для обычного профиля скоростей, а в области высоких частот — для "перевернутого" профиля скоростей.

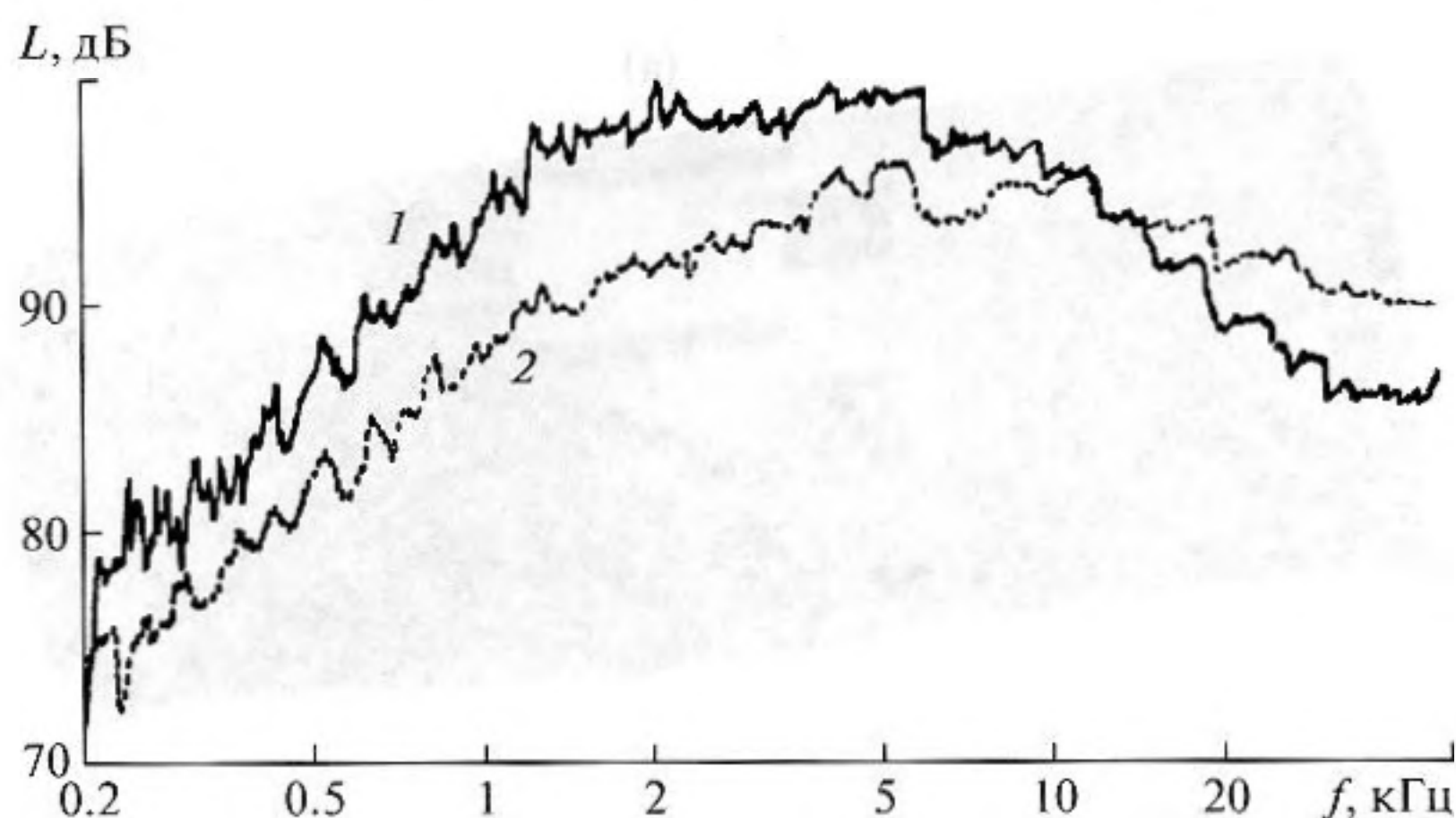


Рис. 10. Спектры шума соосных струй $D_1 = 30$ мм, $D_2 = 42$ мм, $\Delta \bar{x} = 0.33$, $U_{\max} = 300$ м/с, $m = m' = 0.5$ при угле наблюдения $\theta = 30^\circ$, $R = 1.5$ м; 1 — обычный профиль скоростей на срезе двухконтурного сопла, 2 — “перевернутый” профиль скоростей.

Таким образом, за счет изменения относительного расположения сопел внутреннего и внешнего контуров можно добиться некоторого снижения уровней генерируемого шума истекающих соосных струй. Практическая реализация этого метода снижения шума струй определяется возможностями реализации соответствующих конструкторских решений для конкретного двухконтурного турбореактивного двигателя и необходимостью обеспечения действующих нормативных требований по шуму самолетов.

Особая ситуация по удовлетворению нормативных требований по шуму в окрестностях аэропортов возникает в связи с разработкой сверхзвукового пассажирского самолета второго поколения. Проблема снижения шума связана с необходимостью применения на самолете силовой установки большой тяговооруженности, т.е. с большой скоростью истечения реактивных струй. Последние исследования показывают, что удовлетворение действующих норм Главы 3 Стандарта ИКАО для пассажирских самолетов возможно при применении оптимальных эксплуатационных процедур взлета и посадки и при использовании в силовой установке двухконтурного турбореактивного двигателя, снабженного эжекторным шумоглушителем струй [17–20]. В случае введения более жестких норм ИКАО по шуму на местности проблема снижения уровней шума сверхзвукового пассажирского самолета до требуемых величин существенно усложняется.

Необходимость удовлетворения требований по снижению уровней шума при взлете и посадке самолета и по обеспечению низких потерь тяги при сверхзвуковых скоростях полета самолета определяет формы конструкций шумоглушащих эжекторных сопел с несколькими подвижными элементами для регулировки режимов истечения

струй [19, 20]. Перспективы разработки эффективных эжекторных шумоглушащих сопел, обеспечивающих удовлетворение современных нормативных требований ИКАО по шуму самолетов на местности, практически определяют возможности создания в ближайшие годы сверхзвукового пассажирского самолета второго поколения [20–22].

Снижение интенсивности акустического излучения может быть осуществлено посредством интенсификации процессов смешения выхлопного потока с окружающей средой за счет совместного применения многолепестковых насадков и средств, осуществляющих дополнительное эжектирование воздуха через боковые стенки сопла или эжектора. Трудности обеспечения достаточно низких уровней шума вблизи аэропорта связаны с тем, что для выполнения высокоскоростного крейсерского полета самолета требуемая тяга двигателей и, следовательно, скорости истечения реактивных струй должны быть достаточно высокими. Задача состоит в том, чтобы при взлете самолета за счет создания систем переменной геометрии сопел минимизировать или устранить шум волновых структур и создать идеально расширенный поток в широком диапазоне перепадов давлений и режимов работы силовой установки [23]. Из рассматриваемых в настоящее время схем шумоглушения реактивных струй двигателей наибольшую возможность практической реализации имеет система шумоглушения, состоящая из многоэлементного гофрированного или многолепесткового насадка и эжекторного устройства [18, 20, 22].

В эжекторном осесимметричном или прямоугольном шумоглушащем сопле за счет эжектирования окружающего воздуха, разбиения основного потока на несколько составляющих и интен-

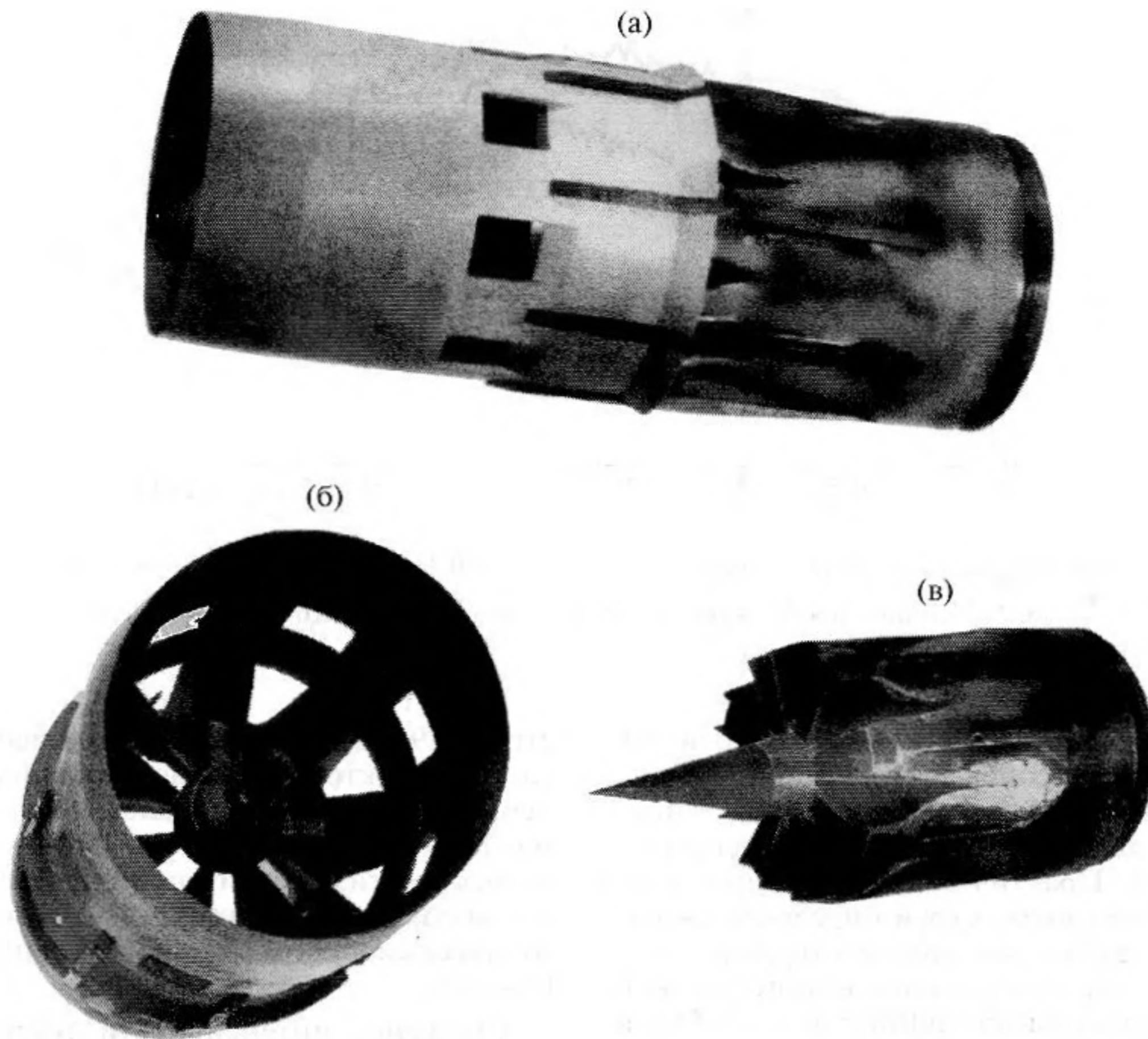


Рис. 11. Общий вид (а) — эжекторного шумоглушащего сопла, (б) — эжектора с дополнительными окнами в боковой стенке, (в) — смесителя.

сивного перемешивания потоков происходит существенное снижение скорости истечения на выхлопе из эжектора. Характеристиками эффективного смешения основного высокоскоростного и эжектируемого воздушного потоков обладает эжекторное шумоглушащее сопло (рис. 11), которое состоит из обечайки с гофрами, центрального тела и эжектора. Гофры изменяемого удлинения, разделяя высокоскоростной поток на восемь частей, формируют условия для эжектирования окружающего воздуха и его последующего смешения с основным потоком. Внутренняя поверхность каждого гофра образует профилированное сверхзвуковое сопло, рассчитанное на определенный перепад давлений. В стенках эжектора имеются специально спрофилированные дополнительные окна для подвода эжектируемого воздуха в зону смешения; эжектор сменяем и крепится на различных расстояниях от места, где внешняя поверхность сопла становится сужающейся. Трансформация шумоглушащего сопла от конфигурации, соответствующей дозвуковому полету самолета, к конфигурации, соответствующей полету со сверхзвуковой скоростью, может обес-

печиваться за счет дополнительных подвижных пилонов, расположенных на оси выходного сечения каждого гофра. Для такой схемы трансформации сопла необходимо небольшое количество подвижных элементов, что обеспечивает минимальные утечки газа из сопла и незначительные дополнительные потери тяги [20].

Измерения акустических характеристик проводились для условий истечения струй из сопел с конфигурациями, соответствующими режиму полета самолета с дозвуковой скоростью, т.е. условиям взлета самолета, определяющим шумленность местности в окрестностях аэропорта. Измеренные уровни шума сравнивались с уровнями шума исходной струи, истекающей из осесимметричного профилированного сопла с одинаковой площадью критического сечения. Уровни суммарного шума струи, истекающей из эжекторного шумоглушащего сопла, при всех углах измерения θ меньше уровней шума исходной струи. Снижение уровней шума истекающего потока при применении этого эжекторного шумоглушащего сопла достигается за счет интенсификации процесса смешения высокоскоростного

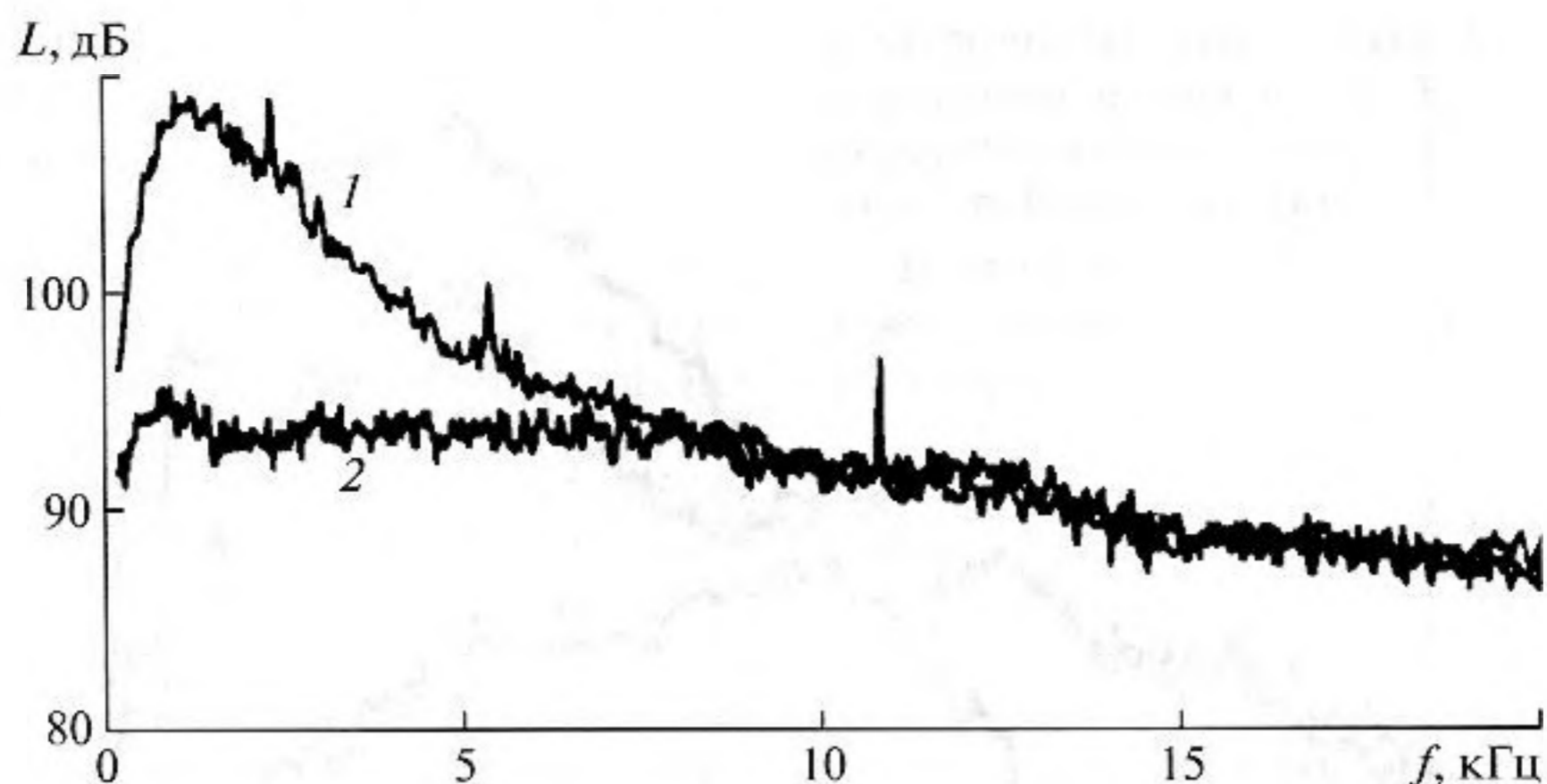


Рис. 12. Узкополосные спектры шума струй, истекающих из: 1 – исходного круглого сопла, 2 – эжекторного шумоглушающего сопла, при угле наблюдения $\theta = 30^\circ$.

потока с окружающей средой и дополнительного эжектирования воздуха через окна в стенках эжектора.

Наибольшее снижение уровней шума истекающей струи как в статических, так и в условиях спутного потока, при применении эжекторных шумоглушающих сопел наблюдается в направлении наиболее интенсивного излучения струи, составляющем приблизительно угол $\theta = 30^\circ$ с направлением истечения основного потока. С увеличением угла наблюдения θ величина снижения уровней шума истекающей струи несколько снижается для всех эжекторных сопел. Установка эжекторного шумоглушающего сопла вызывает также существенное изменение спектрального состава генерируемого шума. Узкополосные спектры шума исходной струи и струи, истекающей из эжекторного сопла, приведены на рис. 12 для угла наблюдения $\theta = 30^\circ$ и перепада давлений $\pi_c = 2.8$. Максимальное снижение уровней шума истекающей струи при анализе в третьоктавных полосах частот достигает величины 17 дБ в диапазоне частот $f = 1.0 \div 2.0$ кГц. Применение эжекторного сопла приводит к исчезновению дискретных составляющих в спектрах шума истекающей струи по сравнению со спектром шума исходной струи при всех углах наблюдения.

При сравнении акустических характеристик струй, истекающих из эжекторных осесимметричного и прямоугольной формы шумоглушающих сопел, установлено, что акустическая эффективность применения прямоугольного сопла больше в области высоких частот, а акустическая эффективность применения осесимметричного сопла больше в области низких частот [18]. Потери тяги при режимах работы, соответствующих дозвуковым скоростям полета самолета, составляют несколько меньшую величину при применении осе-

симметричного сопла [20, 22]. Потери тяги для крейсерских скоростей полета при применении обеих эжекторных шумоглушающих сопел приблизительно одинаковы.

Следует отметить, что для проведения расчетной оценки уровней составляющих шума, образующегося при истечении струй из эжекторных шумоглушающих сопел, необходимы обширные исследования по определению аэродинамических параметров потоков в зонах смешения основного высокоскоростного потока с эжектируемым воздухом [24 ÷ 26].

Перспективным методом снижения шума струйных течений различного вида является организация совместного истечения исходной струи и газового, например, подогретого воздушного слоя, истекающего параллельно из щелеобразного, полукольцевого или серповидного сопла (рис. 13). При такой компоновке возможно экранирование шума струи турбореактивного двигателя и снижение интенсивности акустического излучения в

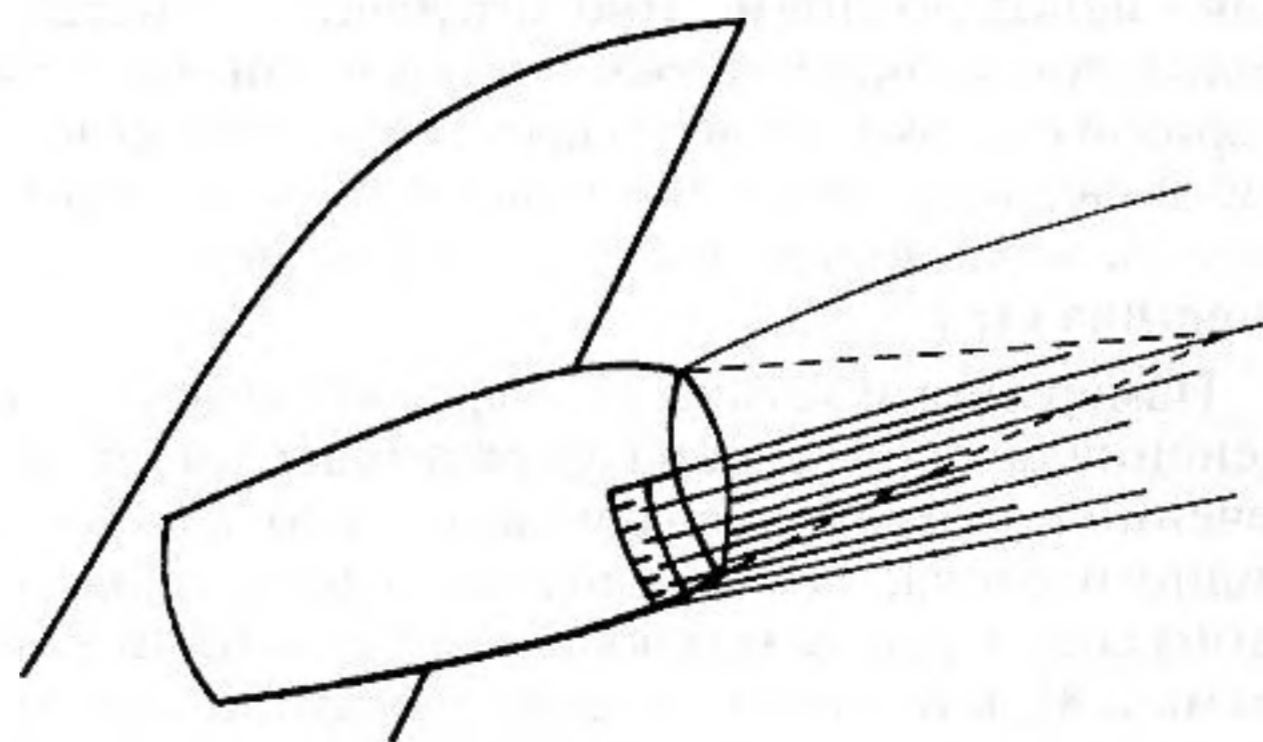


Рис. 13. Схема экранирования шума турбореактивного двигателя с помощью “термоакустического” газового экрана.

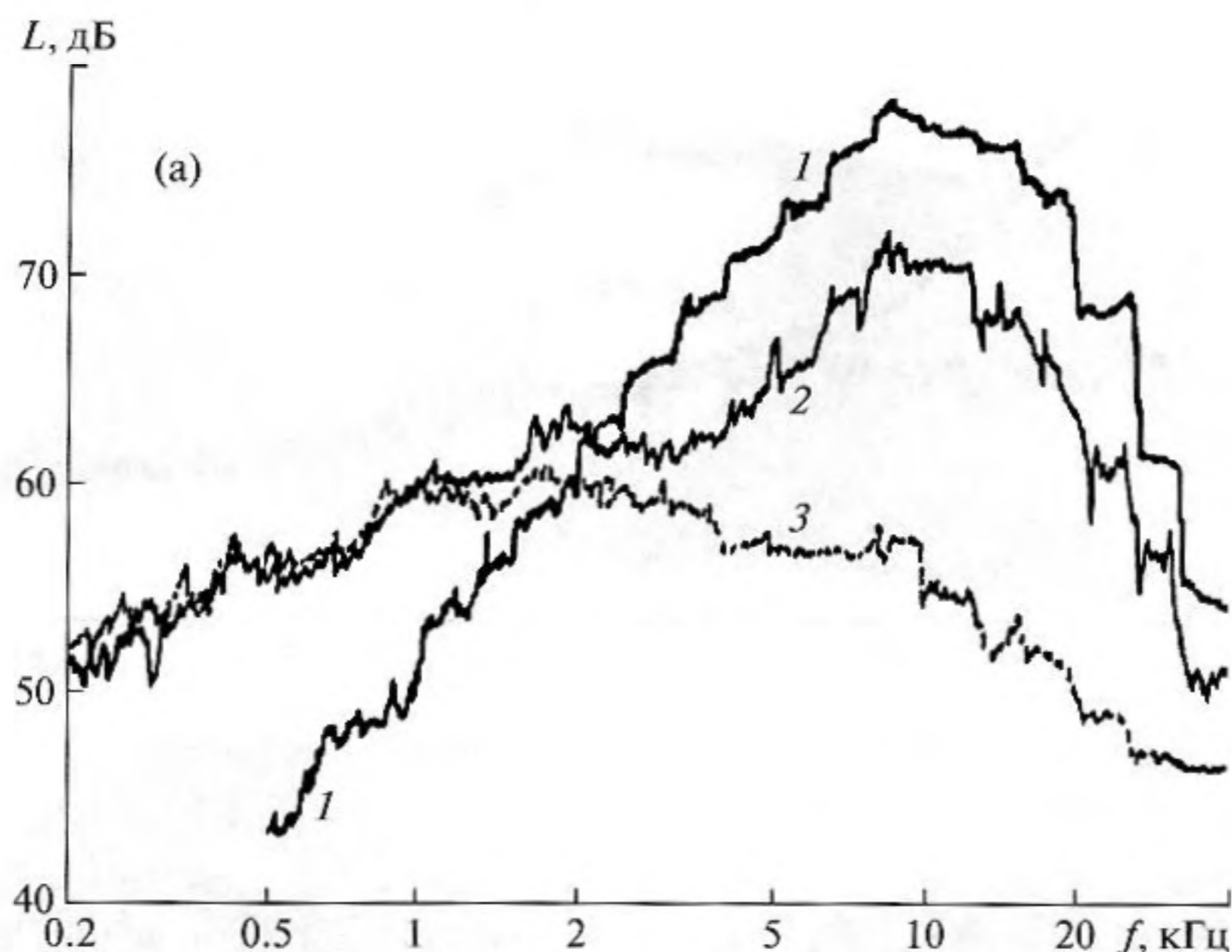


Рис. 14. Спектры шума 1 – струйного источника звука, 2 – струйного источника при акустическом экранировании струей, истекающей из прямоугольного щелевидного сопла $h = 5$ мм, $b = 120$ мм, $U_c = 100$ м/с, $T_c = 600$ К, 3 – одиночного газового слоя.

каком-либо выбранном направлении. Создание между реактивной струей и наблюдателем газового или “термоакустического” экрана возможно посредством отбора за камерой сгорания двигателя части подогретого газа и организации вторичного потока параллельно направлению истечения основного потока. Проявляющийся в последние годы практический интерес к исследованиям эффективности такого метода снижения шума обусловлен изучением возможностей и преимуществ разработки двухконтурных турбореактивных двигателей с изменяемым режимом работы.

При применении этого способа снижения шума используется свойство звуковых волн испытывать отражение и преломление при прохождении через слой движущегося газа с градиентами средней скорости и температуры [27]. Так, например, при использовании многотрубчатого насадка роль газовых экранов выполняют внешние периферийные струи, а наблюдающийся эффект в области высоких частот обусловлен отчасти акустическим экранированием, т.е. отражением звука от внешних струй.

Измерения акустической эффективности применения газового экрана, образующегося при истечении подогретого воздушного потока из щелевидного сопла, проводились при расположении этого сопла между микрофонами и источниками шума [28], которыми являлись воздушные турбулентные дозвуковые или сверхзвуковые струи, истекающие из круглых сопел. Наибольшее снижение уровней шума струй при применении газового экрана отмечается при небольших углах на-

блюдения $\theta = 15^\circ - 45^\circ$, соответствующих области наиболее интенсивного акустического излучения струй.

В случае экранирования звукового поля струи нагретым воздушным потоком, истекающим из прямоугольного щелевидного сопла, наиболее заметное снижение уровней шума наблюдается в области высоких частот и составляет величину $5 \div 7$ дБ (рис. 14). Причем, чем далее вниз по потоку расположен микрофон, тем большая величина снижения уровней шума отмечается. Это связано с тем, что если исходить из лучевой картины распространения звука, то по мере перемещения вниз по потоку возрастает угол падения на газовый слой звукового луча и, следовательно, отражающая способность газового слоя. Увеличение температуры, скорости истечения воздушного потока и толщины щелевого сопла приводит к возрастанию эффекта акустического экранирования. Так, при увеличении температуры воздушного потока возрастание акустической эффективности газового экрана объясняется существованием в газовом слое, помимо градиента средней скорости, еще градиентов плотности и температуры движущейся среды, приводящих к увеличению эффектов отражения и рассеяния излученного струей звука.

При использовании почти всех рассмотренных способов снижения шума струйных течений не происходит значительного изменения тяговых характеристик струй. Если такие потери допустить, то возможно применение эжекторных шумоглушащих сопел, как, например, в случае рас-

смотренной выше ситуации с сверхзвуковым пассажирским самолетом.

Разработка способов снижения интенсивности генерируемого силовой установкой шума является довольно продолжительным процессом, включающим разработку специальных технологий по уменьшению интенсивности основных источников шума силовой установки, внедрение специальных авиационных конструкций, обеспечивающих практическую реализацию методов снижения шума. Ставящаяся в настоящее время задача по достижению снижения уровней шума на 20 дБ в течение ближайших 20–25 лет может потребовать внедрения совершенно новых авиационных технологий.

Разработка новых средств снижения шума пассажирских самолетов, заканчивающаяся внедрением в реальные изделия, обычно происходит в течение нескольких лет. Так, процесс создания системы шумоглушения силовой установки самолета обычно включает целую последовательность этапов научно-исследовательских, расчетных, проектных и экспериментальных работ. Во-первых, необходимо провести расчетные исследования по определению требуемого снижения уровней шума самолета и требуемой эффективности системы шумоглушения силовой установки, обеспечивающей выполнение нормативных или заданных заказчиком требований по шуму. Затем следует определиться с общей концепцией относительно схемы системы шумоглушения: тип смесителя потоков в двухконтурном двигателе и выхлопного шумоглушающего устройства, тип звукопоглощающих конструкций (ЗПК) и места их возможного расположения в каналах силовой установки; необходимо провести расчетные исследования параметров ЗПК, шумоглушающих устройств и составить технические задания на изготовление модельных конструкций. Следующим этапом работ является изготовление моделей смесителей потоков, шумоглушающих устройств и образцов ЗПК; затем проводятся испытания моделей на экспериментальных установках, обеспечивающих проведение исследований в условиях, близких к натурным условиям эксплуатации, например, испытания в заглушенной камере с системой подачи воздуха, имитирующей истечение потоков из двухконтурного двигателя в спутный поток воздуха или условия взлета и посадки самолета; проводятся также испытания на экспериментальной установке “канал с потоком” для определения эффективности ЗПК в условиях, близких к условиям эксплуатации в каналах силовой установки. После анализа полученных результатов испытаний следует выдача рекомендаций на изготовление натуральных образцов, а после их изготовления проводятся испытания на двигательном стенде или в самолетной компоновке. Затем следует расчетное определение уровней шума самолета в

контрольных точках на местности в окрестностях аэропорта и выдача заключения о соответствии акустических характеристик самолета нормативным требованиям по шуму.

Работа выполнена частично при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 08-01-00697).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов В.М. Проблемы снижения шума пассажирских самолетов // Акуст. журн. 2003. Т. 49. № 3. С. 293–317.
2. Кузнецов В.М. Проблемы снижения шума самолетов – вызов человечеству в виде последствий технического прогресса // Труды международного симпозиума-семинара “Актуальные проблемы акустической экологии и защиты от шума”. М.: НИИСФ РААСН. 2006. С. 111–115.
3. Кузнецов В.М., Мунин А.Г. Авиационная акустика // ЦАГИ – основные этапы научной деятельности 1968–1993. М.: “Наука”, Физматлит. 1996. С. 556–569.
4. Кузнецов В.М. Основы теории шума турбулентных струй. М.: Физматлит, 2008. 239 с.
5. Bartlett P., Humphreys N., Phillipson P., Lan J., Nesbitt E., Premo J. The joint Rolls-Royce/Boeing quiet technology demonstrator programme. 10-th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. USA. Paper 2004–2869. 2004. P. 1–11.
6. Gilinsky M.M., Kuznetsov V.M., Nark D.M. Acoustics and aeroperformance of nozzles with screwdriver shaped and axisymmetric plugs. 4-th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. France, 1998. Paper 98–2261, 1998. P. 1–28.
7. Gilinsky M.M., Blankson I.M., Kuznetsov V.M., Chernyshev S.A. Aeroperformance and acoustics of the nozzle with permeable shell. 5-th AIAA/CEAS Aeroacoustics conference. USA, 1999. Paper AIAA/CEAS 99–1924. 18 p.
8. Seiner J.M., Gilinsky M.M. Nozzle thrust optimization while reducing jet noise. First joint CEAS/AIAA Aeroacoustics conference. Germany, 1995. Paper CEAS/AIAA 95–149. 21 p.
9. Krashennnikov S.Ju., Mironov A.K., Pavlyukov E.V. An investigation of possibility of turboengine exhaust jet noise reduction using chevron nozzles. 6-th Int. symposium “Transport noise and vibration”. Russia. 2002. 7 p.
10. Власов Е.В., Каравосов Р.К. Применение сопла с неосесимметричной кромкой для снижения шума реактивной струи авиационного двигателя. Доклады VI науч. конф. по гидроавиации “Гидроавиасалон-2006. Москва, 2006. С. 245–250.
11. Гиневский А.С., Власов Е.В., Каравосов Р.К. Акустическое управление турбулентными струями. М.: Физматлит, 2001. 240 с.
12. Aeroacoustics of flight vehicles: theory and practice. Volume 1: Noise sources. Volume 2: Noise control / Edited by H.H. Hubbard. NASA Reference Publication, 1258. WRDC Technical Report, 90–3052. Pub-

- lished for the Acoustical Society of America through the American Institute of Physics. 1995. 1024 с.
13. *Мунин А.Г., Кузнецов В.М., Леонтьев Е.А.* Аэродинамические источники шума / М.: Машиностроение. 1981. 248 с.
 14. *Tam C.K.W., Viswanathan K., Ahuja K.K., Panda J.* The sources of jet noise: experimental evidence // 13-th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, USA. Paper 2007-3641. 2007. P. 1-32.
 15. *Birch S.F., Khritov K.M., Maslov V.P., Mironov A.K., Secundov A.N.* An experimental study of flow asymmetry in coaxial jets // 11-th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, USA. AIAA Paper 2005-2845. 2005. P. 1-10.
 16. *Groschel E., Renze P., Schroder W., Meinke M.* Towards noise reduction of coaxial jets. 13-th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, USA. Paper 2007-3646. 2007. P. 1-18.
 17. *Julliard J.* Noise research effort for advanced supersonic transport engine: a european perspective // International journal of AEROACOUSTICS. 2004. V. 3. № 3. P. 229-247.
 18. *Кузнецов В.М.* О снижении уровней шума сверхзвукового пассажирского самолета на территории вблизи аэропорта // Труды международного науч.-тех. семинара "Обеспечение защиты от вредных физических факторов среды обитания человека". М.: НИИСФ РААСН. 2004. С. 23-31.
 19. *Whurr J.* Propulsion system concepts and technology requirements for quiet supersonic transports. International journal of AEROACOUSTICS. 2004. V. 3. № 3. P. 259-270.
 20. *Supersonic civil aircraft impact on environment.* Annual Report ISTC/TsAGI. Project 2249. 2004. 160 p.
 21. *Власов Е.В., Лаврухин Г.Н., Меркин Д.В., Попович К.Ф., Самохин В.Ф., Школин В.П.* Газодинамические и акустические характеристики нетрадиционных схем реактивных сопел // Ученые записки ЦАГИ. Т. XXXIX, № 3-4. 2003. С. 24-33.
 22. *Krashennnikov S.Ju., Mironov A.K., Pavlyukov E.V., Shenkin A.V., Zhitenev V.K.* Mixer-ejector nozzles: acoustic and thrust characteristics. International journal of AEROACOUSTICS. 2005. V. 4. № 3-4. P. 267-288.
 23. *Chernyshev S.A., Kuznetsov V.M., Kopiev V.F., Zaitsev M.Y.* Experimental validation of instability wave theory for round supersonic jet // 12-th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, USA. Paper AIAA-2006-2595. 2006. P. 1-24.
 24. *Stone J.R., Clark B.J., Krejsa E.A.* Multiple-source semi-empirical model for 2D mixer ejector noise prediction // 9-th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, USA. Paper 2003-3168. 2003. P. 1-11.
 25. *Garrison L.A., Dalton W.N., Lyrantzis A.S., Blaisdell G.A.* Semi-empirical noise models for forced mixer jet noise // International journal of AEROACOUSTICS. 2006. V. 5. № 2. P. 139-171.
 26. *Secundov A.N., Birch S.F., Tucker P.G.* Propulsive jets and their acoustics // Phil. Trans. Roy. Soc. A. 2007. V. 365. P. 2443-2467.
 27. *Кузнецов В.М., Потокин А.А.* О применении движущегося газового слоя для снижения шума струи // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 2. С. 239-246.
 28. *Кузнецов В.М.* Снижение шума реактивных струй посредством аэроакустического экранирования. Труды межд. науч.-тех. семинара "Актуальные проблемы защиты от шума зданий и территорий застройки". Севастополь. 2007. С. 134-139.