

УДК 532.525.2:534.29

© 2002 г. В.Г. ПИМШТЕЙН

О РАСШИРЕНИИ СТРУИ ГЕЛИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЗВУКА ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Приведены результаты сравнительного исследования влияния звука высокой интенсивности (уровень звукового давления на кромке сопла $L = 165$ дБ) на расширение турбулентных струй гелия и воздуха. Струи и звуковые волны были визуализованы прямым теньевым способом с помощью искрового источника света со временем экспозиции $2 \cdot 10^{-7}$ с. Показано, что струя гелия расширяется гораздо быстрее, чем воздушная струя с тем же динамическим напором.

Исследования, предпринятые в последнее время с целью изучения влияния периодического воздействия на ламинарные и турбулентные струи, позволили установить основные особенности протекания процессов смешения и излучения звука такими струями. Среди различных способов периодического воздействия на струи особое место занимает акустическое воздействие, позволяющее в широких пределах менять интенсивность, частоту и место воздействия звука на струю, спектральные и фазовые соотношения в звуковой волне, угол падения звука на струю, форму звуковой волны и т.д. Такие широкие возможности акустического способа воздействия позволяют использовать его не только как средство для целенаправленного изменения газодинамических и акустических характеристик струйных течений, но и как инструмент для исследования механизмов процессов смешения и излучения звука такими течениями.

В основе всех существующих в настоящее время представлений о механизмах воздействия звука на струйные течения лежит представление о гидродинамической неустойчивости свободного сдвигового слоя струи и струи в целом и об упорядоченных структурах, возникающих в струях вследствие этой неустойчивости. Наличие таких упорядоченных структур как в ламинарных, так и в турбулентных струях, подтверждено многочисленными экспериментальными и теоретическими исследованиями. Предлагаемые различными исследователями механизмы воздействия звука на струйные течения охватывают все возможные способы воздействия на такие упорядоченные структуры. В частности, предполагают, что в турбулентных струях возможно прямое взаимодействие между звуком и турбулентной структурой потока, прямое воздействие звука на процесс передачи энергии от больших турбулентных вихрей к меньшим [1]. Другая точка зрения состоит в том, что звуковые колебания действуют на струю у среза сопла вблизи точки отрыва потока и приводят к образованию вихрей, которые по мере их распространения вдоль струи, вследствие неустойчивости струи и/или ее сдвигового слоя могут усиливаться или ослабляться в зависимости от частоты воздействия (см., например, [2]). Это наиболее распространенная точка зрения на процесс взаимодействия звука со струями. Высказывается также предположение, что возможна постоянная связь между звуковой волной, воздействующей на слой смешения, и возбужденной волной неустойчивости на протяжении нескольких длин волн неустойчивости [3] и, наконец, существует мнение, что взаимодействие звука со струей происходит через воздействие на поверхность раздела между струей и окружающим пространством [4].

В большинстве работ по исследованию акустического воздействия на струи, как правило, используется звуковое воздействие относительно небольшой интенсивности. До некоторой степени это связано с намерением исследователей не вмешиваться слишком грубо в естественные процессы возникновения когерентных структур, взаимодействия вихрей и излучения шума – малые акустические возмущения позволяют выявлять и исследовать эти явления более эффективно. С другой стороны, иногда утверждают, что, начиная с определенного значения интенсивности звукового воздействия, ее увеличение не вызывает изменений в структуре струи, наступает явление "насыщения" и дальнейшее увеличение интенсивности звука лишено смысла. Как правило, в большинстве проведенных исследований используют гармоническое акустическое воздействие. Известно также, что изменение спектрального состава акустического воздействия (практически, формы звуковой волны) может вызывать большие или меньшие изменения в струе. Однако воздействие звука высокой интенсивности и влияние формы звуковой волны на возникновение и развитие возмущений в турбулентных струях остаются сравнительно мало изученными. В настоящей работе исследуется воздействие пилообразных звуковых волн конечной амплитуды на расширение высокоскоростной струи гелия. При таком возбуждении турбулентных струй число Струхала акустического воздействия не играет такой заметной роли, как при гармоническом воздействии звука малой интенсивности; в этом случае начальная стадия образования и эволюция вихря не зависят от частоты воздействия, а расширение струи в значительной степени зависит от формы вихрей и расстояния между ними [5].

Исследования воздействия звука высокой интенсивности на турбулентные струи [6] подтверждают в целом точку зрения, что взаимодействие звука со струей локализовано вблизи выходного сечения сопла и что звук достигнутой в проведенных опытах интенсивности (до 174 дБ) не оказывает заметного влияния на уже образовавшиеся возмущения (т.е. нет взаимодействия между акустической и вихревой компонентами движения). Однако остается открытым вопрос о том, что является определяющим фактором в звуковых волнах в явлениях аэроакустических взаимодействий в струях, что заставляет сдвиговый слой сворачиваться в вихри. Обычно полагают [7], что для заметного воздействия на струю звуковое давление в падающей волне должно составлять определенную часть от полного давления в струе (или значение колебательной скорости в звуковой волне должно составлять определенную часть от скорости истечения струи). Роль этих величин в рассматриваемом явлении еще недостаточно изучена, и настоящая работа представляет попытку получить некоторые дополнительные данные о механизме воздействия звука высокой интенсивности на турбулентные струи.

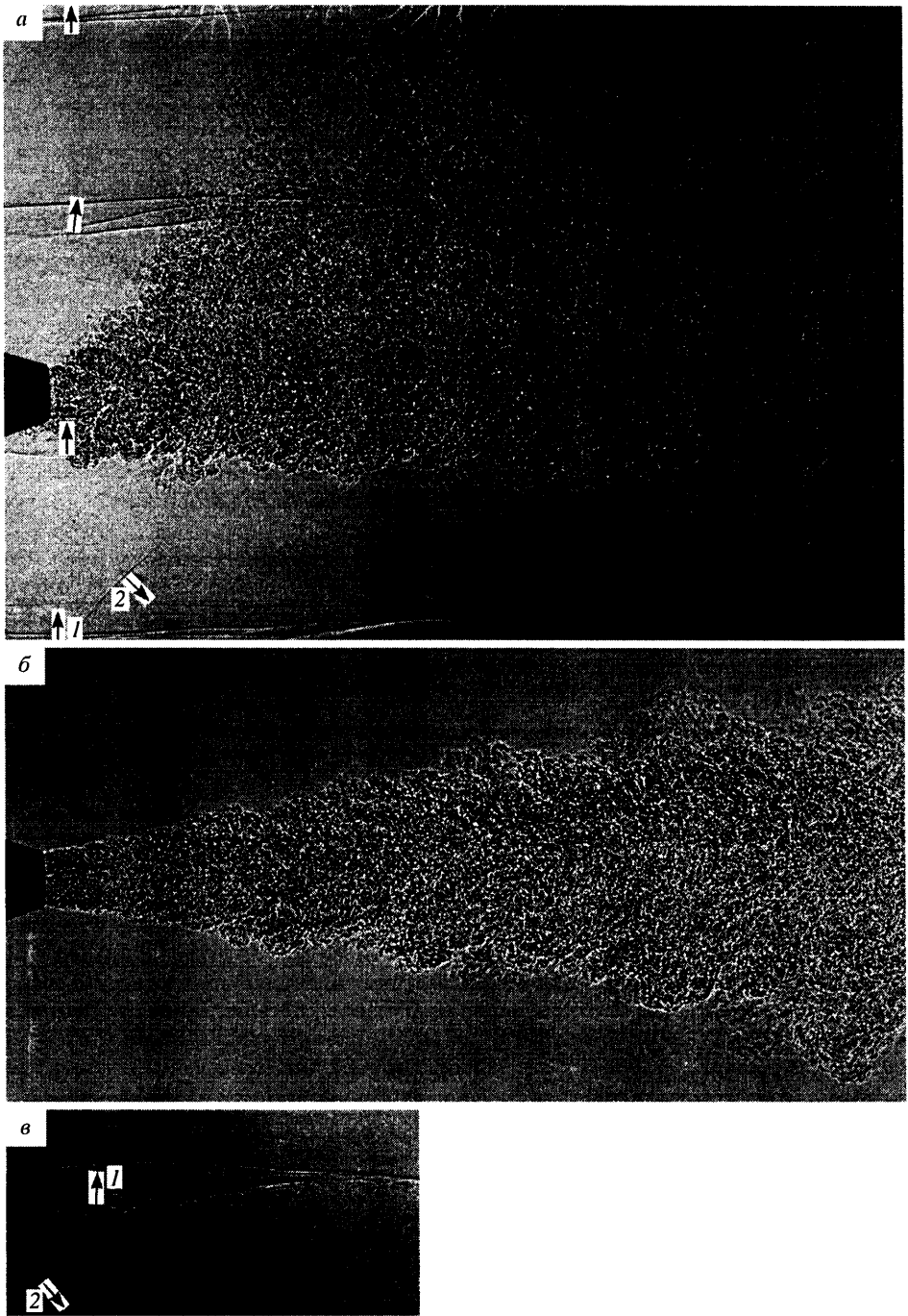
Цель настоящей работы – определить влияние звука высокой интенсивности на возникновение и развитие возмущений в дозвуковой турбулентной струе при изменении параметров потока на срезе сопла при неизменных уровне звукового давления на кромке сопла, угле падения звука на границу струи и динамическом напоре в струе. Это достигалось изменением рабочего тела струи – исследования были выполнены со струями гелия и воздуха.

1. Экспериментальная установка. Опыты проводились с изотермическими воздушными струями и струями гелия, истекавшими из сходящегося сопла с диаметром выходного сечения $d = 10$ мм при изменении полного давления в форкамере сопла p_0 в пределах 1.2–2 атм с шагом 0.2 атм. Дозвуковое сопло было установлено на успокоительной камере диаметром 290 мм, баллоны со сжатым гелием через систему редукторов соединялись с успокоительной камерой, чтобы не расходовать гелий для заполнения тракта подвода рабочего тела. Схема эксперимента включала продувку системы с более высоким давлением, чем это требовалось в эксперименте, с постепенным его уменьшением до заданного режима. Это обеспечивало определенную уверенность, что эксперименты выполнялись с чисто гелиевой струей. Акустическое воздействие на струи осуществлялось с помощью газоструйного излучателя Гартмана

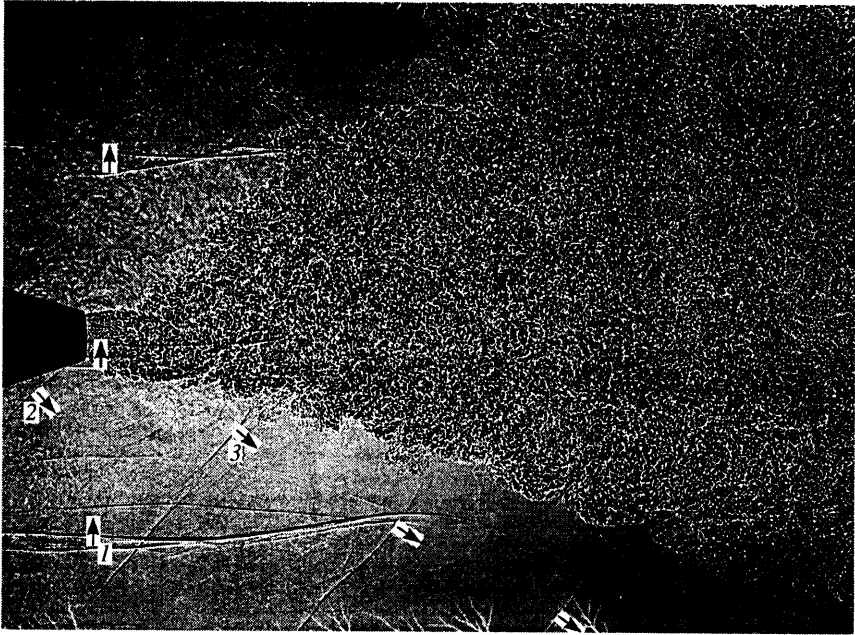
с частотой $f = 5.5$ кГц, помещенного в параболический отражатель и расположенного под струей, при нормальном падении звука на границу сопла. Уровень звукового давления на кромке сопла во всех опытах составлял ~ 165 дБ. Производилась теневая фотосъемка струй прямым теневым методом с помощью искрового источника света с размером светящегося тела 0.7 мм и длительностью экспозиции $2 \cdot 10^{-7}$ с. Направление распространения звука показано на теневых фотографиях стрелками. Расширение струи определялось как среднеквадратичное значение поперечного размера струи в определенном сечении по результатам пяти реализаций (на каждом режиме истечения производилось по пять снимков струи).

2. Результаты и обсуждение. На фиг. 1 приведены теневые фотографии струи гелия под действием звука (*a*), невозмущенной струи гелия (*b*) и воздушной струи под действием звука (*в*) при полном давлении в форкамере сопла $p_0 = 1.2$ атм. Хотя отношение интенсивности звука на кромке сопла к полному давлению в обеих струях в рассматриваемом случае постоянно и составляет $\sim 0.03\%$ (к динамическому напору – 0.18%), можно видеть, что под действием звука высокой интенсивности струя гелия расширяется гораздо быстрее, чем воздушная струя. Звуковое давление в волне, проходящей через струю гелия, по-видимому, даже меньше, чем в волне, проходящей через воздушную струю, из-за различия в акустическом сопротивлении гелия и воздуха и отражения звука при прохождении через границу воздух–гелий. Таким образом, представляется, что отношение интенсивности воздействующего на струю звука к полному давлению в струе (или к динамическому напору) в общем случае не может служить мерой воздействия звука на струю. Отношение колебательной скорости в падающей звуковой волне к скорости струи в выходном сечении сопла в случае истечения струи гелия существенно меньше, чем в случае воздушной струи, из-за значительно более высокой скорости истечения струи гелия при равных полных давлениях в форкамере сопла (при $p_0 = 1.2$ атм соответственно $u \sim 420$ и 160 м/с), а отражение звука от границы раздела воздух–гелий также уменьшает колебательную скорость в звуковой волне, проходящей через струю в случае истечения струи гелия. По-видимому, и эта величина также не может в общем случае служить мерой воздействия звука на струю. Числа Струхала акустического воздействия ($St = f d/u$) в рассмотренном случае различались и составляли 0.13 для струи гелия и 0.34 для воздушной струи. Но, как отмечалось выше, при воздействии на струю звука высокой интенсивности влияние числа Струхала менее существенно, чем в случае малой интенсивности звука, и, кроме того, в рамках настоящего эксперимента может быть проведено прямое сравнение воздушной и гелиевой струй при одном и том же значении St . В самом деле, близкие значения скорости истечения (и соответственно чисел Струхала) наблюдаются у струи гелия при давлении $p_0 = 1.2$ атм и у воздушной струи при $p_0 = 2$ атм ($V \approx 400$ м/с), но разница в поперечных размерах этих струй еще более возрастает. Это означает, что при постоянном значении St и неизменных других условиях струя гелия расширяется еще быстрее, чем воздушная струя, по сравнению со случаем постоянного полного давления.

Полученные в опытах теневые фотографии показывают, что процесс возникновения и развития возмущений в струе гелия под воздействием звука высокой интенсивности при внешнем поперечном воздействии происходит иначе, чем в воздушной струе с тем же динамическим напором. В воздушной струе при прохождении фронта звуковой волны (фазы максимального сжатия в пилообразной волне, генерируемой излучателем Гартмана) через кромку сопла образуется отчетливый вихрь сложной формы, изменяющийся при распространении вниз по потоку и взаимодействии с соседними вихрями. Расширение воздушной струи под действием звука высокой интенсивности связано с изменением поперечных размеров этого вихря. В струе гелия такое отчетливое вихреобразование под действием звука высокой интенсивности не наблюдается, а возникшее возмущение затрагивает, главным образом, в отличие от воздушной струи удаленную от излучателя границу струи. Сам факт возникновения довольно компактного возмущения при прохождении фазы максимального сжатия



Фиг. 1. Воздействие звука высокой интенсивности на струю гелия (а) и на воздушную струю (в); (б) – невозмущенная струя гелия ($p_0 = 1.2$ атм, $L = 165$ дБ, $f = 5.5$ кГц; $St_{He} = 0.13$, $St_{air} = 0.34$; 1 – падающая звуковая волна; 2 – звуковая волна, отраженная от сопла)

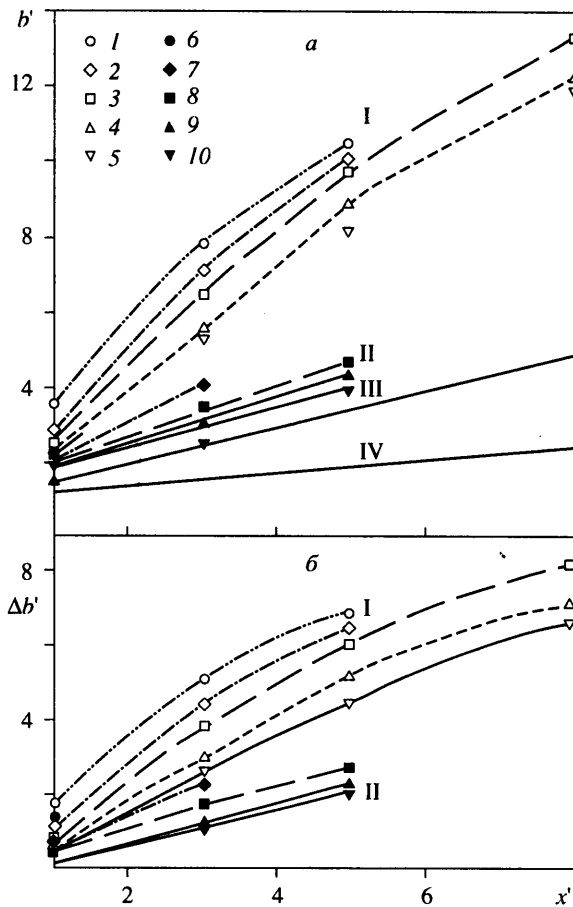


Фиг. 2. Излучение волн Маха струей гелия под действием звука высокой интенсивности ($p_0 = 2$ атм, $L = 165$ дБ, $f = 5.5$ кГц; 1 – падающая звуковая волна, 2 – звуковая волна, отраженная от сопла, 3 – волна Маха)

через кромку сопла при истечении струи гелия подтверждается излучением волны Маха таким возмущением при его перемещении вдоль облучаемой границы со сверхзвуковой конвективной скоростью (фиг. 2).

Это явление, наблюдаемое обычно при истечении воздушных струй под действием звука высокой интенсивности при достаточно больших сверхкритических перепадах давления на сопле, оказывается возможным при истечении дозвуковой струи гелия (коэффициент скорости $\lambda = 0.98$) из-за высокой скорости истечения (в рассматриваемом случае $u \sim 820$ м/с), существенно превышающей скорость звука в окружающем пространстве. Скорость конвекции возмущений, составляющая обычно 0.5–0.7 от скорости струи, при этом также превышает скорость звука в окружающем пространстве – это приводит к излучению волн Маха дозвуковой струей гелия с частотой акустического воздействия. Наблюдаемая в проведенных опытах разница в восприимчивости воздушной струи и струи гелия к воздействию звука высокой интенсивности может происходить, по-видимому, из-за различий чисел Рейнольдса рассматриваемых струй: для воздушных струй оно составляет $Re_{\text{air}} = 1.2 \cdot 10^5 - 2.6 \cdot 10^5$, а для струй гелия $Re_{\text{He}} = 4 \cdot 10^4 - 10^5$ при изменении полного давления в форкамере сопла от 1.2 до 2 атм.

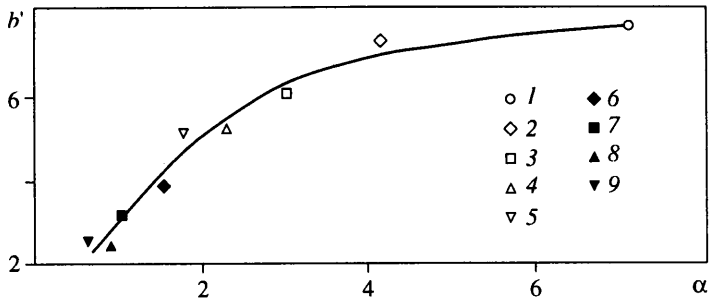
На фиг. 3,а показана зависимость среднеквадратичного значения ширины струи гелия и воздушной струи $b' = b/d$ в зависимости от расстояния от среза сопла $x' = x/d$ при изменении полного давления в форкамере сопла от 1.2 до 2 атм при акустическом воздействии на струи и в его отсутствие. Ширина струи в определенном сечении принята за меру воздействия звука, поскольку границы струй воздуха и гелия, подвергающихся акустическому воздействию, существенно криволинейны и, как уже отмечалось, их расширение происходит по-разному с облучаемой и необлучаемой стороны. Можно видеть, что отмеченное ранее на режиме истечения с полным давлением $p_0 = 1.2$ атм значительно более быстрое расширение струи гелия под действием звука высокой интенсивности по сравнению с воздушной струей происходит на всех



Фиг. 3. Влияние акустического воздействия на расширение струи: *a* – зависимость средне-квадратичного значения ширины струи от расстояния вдоль оси ($L = 165$ дБ, $f = 5.5$ кГц, I – струя гелия при акустическом воздействии, II – воздушная струя при акустическом воздействии, III – невозмущенная струя гелия, IV – невозмущенная струя воздуха); *б* – зависимость относительного изменения ширины струи гелия (I) и воздуха (II) при акустическом воздействии. Точки 1–5 соответствуют струе гелия, 6–10 – воздушной струе: 1 и 6 – $p_0 = 1.2$ атм, 2 и 7 – $p_0 = 1.4$ атм, 3 и 8 – $p_0 = 1.6$ атм, 4 и 9 – $p_0 = 1.8$ атм, 5 и 10 – $p_0 = 2$ атм)

исследованных режимах истечения: относительное изменение ширины струи гелия (Δb – разность между шириной струи, подвергающейся акустическому воздействию, и шириной невозмущенной струи в определенном сечении) в 1.5–2 раза превосходит аналогичную величину в воздушной струе (фиг. 3, б).

Проведенные опыты с воздействием звука высокой интенсивности на струи гелия и воздуха позволяют выдвинуть предположение, что величиной, характеризующей степень воздействия звука на струю, может служить величина $\alpha = (1/Re) (p_s/p_0)$ (p_s – звуковое давление на кромке сопла). Относительно введения числа Рейнольдса в величину, характеризующую степень воздействия звука высокой интенсивности на турбулентные струи, следует отметить следующее: факт образования вихрей при прохождении фазы максимального сжатия в пилообразных звуковых волнах конечной амплитуды через выходное сечение сопла можно считать достаточно хорошо установленным. Это означает, в частности, что момент образования вихря связан с прохождением фронта пилообразной звуковой волны через пограничный слой,



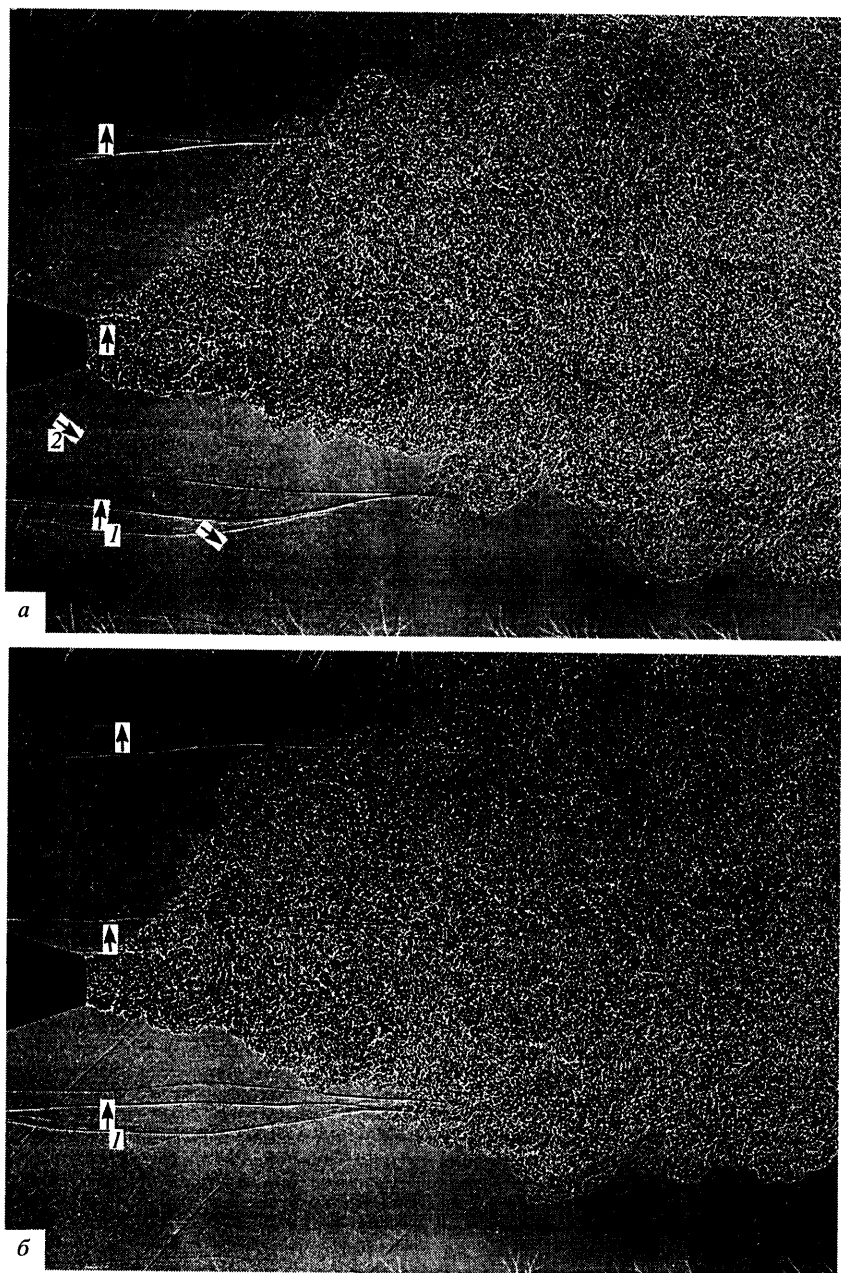
Фиг. 4. Относительное изменение ширины струи гелия и воздуха при акустическом воздействии с учетом числа Рейнольдса. Точки 1–5 соответствуют струе гелия, 6–9 – воздушной струе: 1 – $p_0 = 1.2$ атм, 2 и 6 – $p_0 = 1.4$ атм, 3 и 7 – $p_0 = 1.6$ атм, 4 и 8 – $p_0 = 1.8$ атм, 5 и 9 – $p_0 = 2$ атм)

образующийся в сопле, вблизи его выходного сечения и, что представляется особенно важным, через вязкий подслой пограничного слоя, где влияние молекулярной вязкости может оказаться существенным. Представляется, что именно в этом чрезвычайно малом пространственном и временном интервале происходит процесс передачи энергии звуковой волны вихревому движению при воздействии на турбулентные струи звуковых волн конечной амплитуды, именно поэтому число Рейнольдса не может быть исключено из рассмотрения при определении величин, характеризующих степень воздействия звуковых волн конечной амплитуды на турбулентные струи. Подобным образом в число параметров, определяющих степень воздействия звука на струи, может быть введено и акустическое сопротивление, хотя его влияние представляется менее вероятным. Тот факт, что с учетом числа Re результаты проведенных опытов ложатся на одну кривую (фиг. 4), показывает правдоподобность высказанного предположения, но необходимы дальнейшие исследования в этом направлении.

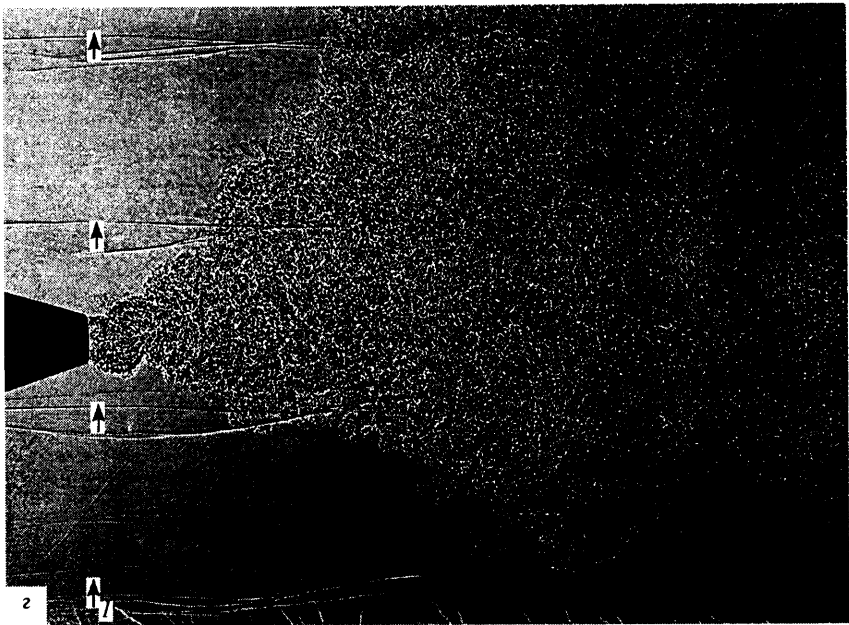
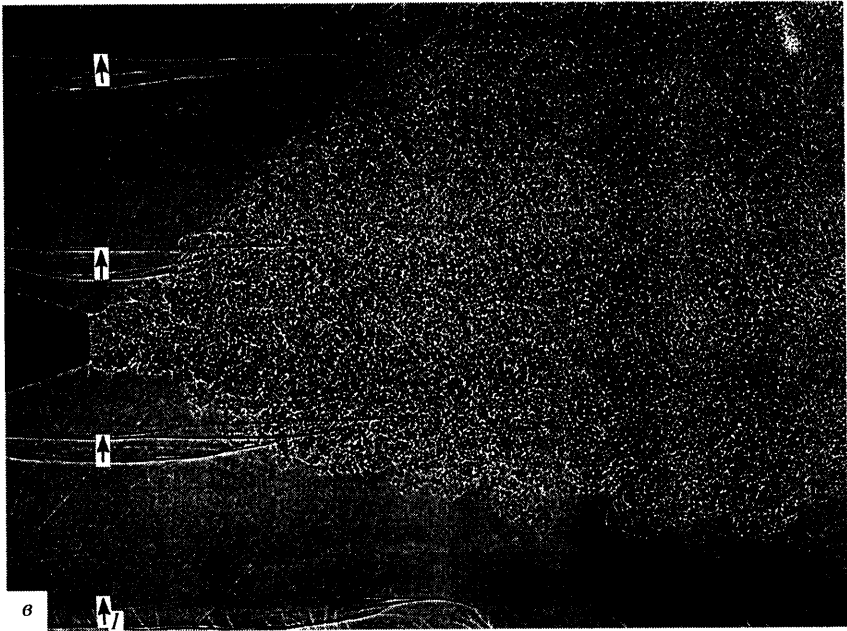
На фиг. 5 приведены теневые фотографии, показывающие процесс взаимодействия звука со струей гелия ($p_0 = 1.6$ атм) в развитии. Снимки производились в случайные моменты времени и затем располагались в последовательности, задаваемой положением фронта звуковой волны относительно кромки сопла. Усмотреть образование отчетливого вихря в струе гелия под действием звука высокой интенсивности и проследить за его развитием не удастся, струя гелия под действием звука не совершает поперечных колебаний, а расширение струи гелия происходит главным образом за счет развития возмущения на необлучаемой стороне струи. Оценки показывают, что последнее обстоятельство едва ли может быть отнесено к действию подъемной силы, действующей на струю гелия; на это же указывает и фотография невозмущенной струи гелия (фиг. 1).

Можно предположить, что при акустическом воздействии на струи состав газа не имеет существенного значения и что на горячие струи малой плотности звук будет оказывать действие, подобное тому, которое он производит на струю гелия.

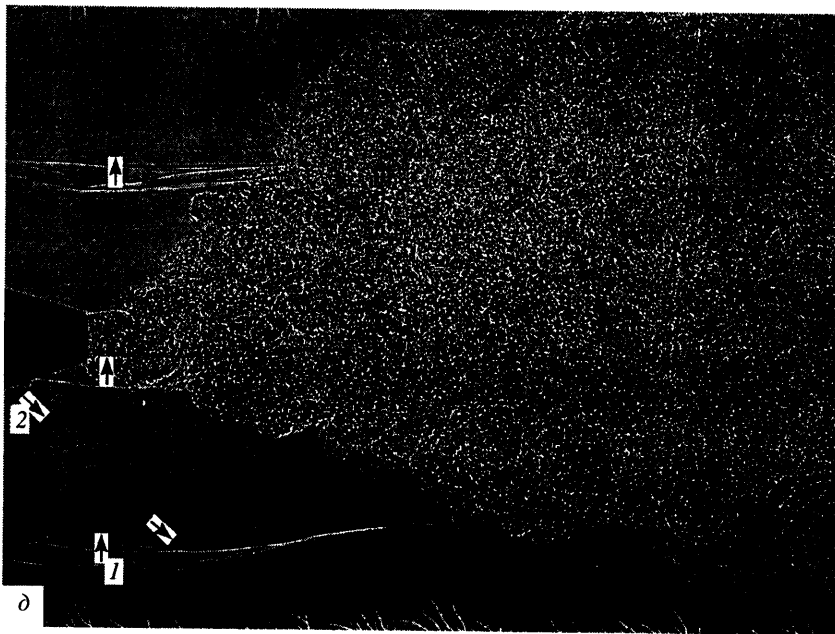
Заключение. Относительное изменение ширины струи гелия (разности между шириной струи, подвергающейся акустическому воздействию, и шириной невозмущенной струи в определенном сечении) под действием звука высокой интенсивности в 1.5–2 раза превосходит аналогичную величину для воздушной струи при одинаковых значениях полного давления в обеих струях, уровня звукового давления на кромке сопла и угла падения звука на границу струи. При внешнем поперечном акустическом воздействии возникновение и развитие возмущения в струе гелия происходит иначе, чем в воздушной струе, – без образования отчетливого косого вихря. В величину, характеризующую степень воздействия звука на струю, по-видимому, следует включить число Рейнольдса струи.



Фиг. 5. Процесс взаимодействия звука высокой интенсивности со струей гелия ($p_0 = 1.6$ атм; $L = 165$ дБ; $f = 5.5$ кГц)



Фиг. 5 (продолжение)



Фиг. 5 (окончание)

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 00-01-00152).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов Е.В., Гиневский А.С. Акустическое воздействие на аэродинамические характеристики турбулентной струи // Изв. АН СССР. МЖГ. 1967. № 4. С. 133–138.
2. Фурлетов В.И. Воздействие звуковых колебаний на турбулентную струю газа // Изв. АН СССР. МЖГ. 1969. № 5. С. 166–171.
3. Tam C.K.W. Excitation of instability waves in a two-dimensional shear layer by sound // J. Fluid Mech. 1978. V. 89. Pt. 2. P. 357–371.
4. Ajagu C.O. Foldover, intermittency and crossing frequency of a plane jet interface with and without acoustic disturbance // MSME Thesis, Perdue Univ. 1976.
5. Пимштейн В.Г. Возникновение возмущений в дозвуковой турбулентной струе под действием звука высокой интенсивности // Изв. РАН. МЖГ. 1994. № 2. С. 104–111.
6. Pimshtein V.G. Disturbance generation in supersonic jets under acoustic excitation // AIAA. Journal. 1994. V. 32. № 7. P. 1345–1349.
7. Власов Е.В., Гиневский А.С. Когерентные структуры в турбулентных струях и следах // Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа. М.: ВИНТИ. 1986. Т. 20. С. 3–84.

Москва

Поступила в редакцию
10.1.2001