

УДК 534.23

АМПЛИТУДНЫЕ И ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТИЧЕСКИХ СТРУЙ

© 2003 г. А. Е. Грушин, И. В. Лебедева

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

физический факультет

119992 Москва ГСП-2, Ленинские горы

E-mail: lebedeva@acs373a.phys.msu.su

Поступила в редакцию 27.03.2002 г.

Изучаются условия возникновения и характеристики струи, возникающей на открытом конце волновода при распространении в нем интенсивной звуковой волны. Поле скорости регистрируется проволочным датчиком термоанемометра. Разработанный ранее метод разделения скорости струи V_{jet} и амплитуды колебательной скорости V_{osc} , применимый только при условии $V_{jet} > V_{osc}$, дополнен методом непосредственной обработки осциллограмм, применимым при $V_{jet} \leq V_{osc}$. Таким образом, получено полное представление о развитии струи в пространстве, начиная от выходного отверстия волновода. Наблюдается хорошее согласие между экспериментально измеренным пространственным распределением скорости струи и расчетными зависимостями, полученными другими авторами методом численного моделирования. Обнаружено наличие порогового значения амплитуды колебательной скорости звука на открытом конце волновода, при превышении которого возникает акустическая струя, определена его частотная зависимость. Установлена близкая к прямой пропорциональности зависимость максимальной скорости струи от амплитуды колебательной скорости в отверстии.

Акустические струи привлекают в настоящее время повышенное внимание в связи с большими возможностями их использования в аэродинамических устройствах.

С середины 90-х годов в американском журнале и трудах AIAA появилась серия статей, посвященных конструированию и применению генераторов акустических струй [1–3]. Миниатюрные устройства, имеющие миллиметровые размеры, представляют собой подобие резонатора Гельмгольца, у которого задняя стенка колеблется по гармоническому закону, а на передней имеется небольшое отверстие. Возбуждение колебаний задней стенки может производиться электрическим, пьезоэлектрическим или механическим способом. Когда задняя стенка движется внутрь полости, то из отверстия наружу выходит поток, который отрывается на острых краях отверстия и закручивается в вихри. При достижении достаточной начальной скорости срывающиеся вихри образуют акустическую струю. Отклонение задней стенки в противоположную сторону приводит к засасыванию воздуха из окружающей среды в полость генератора. Во время каждого цикла колебаний средний поток массы через отверстие равен нулю, а количество движения вихрей отлично от нуля. Из-за малых размеров генератора обычно используемая частота колебаний составляет 1–1.5 кГц. Привлекательной чертой этих устройств являются малые энергетические

затраты на их функционирование, а также то, что струя формируется из окружающей среды, не требуя дополнительного подвода воздуха. Возможности генераторов, скорость акустической струи которых может составлять более 20 м/с, очень велики. Они находят применение, в частности, для перемешивания топлива в двигателях с целью интенсификации процесса горения, для охлаждения твердых поверхностей и для изменения направления и степени турбулизации стационарных потоков, что способствует уменьшению излучаемого ими шума.

Первые экспериментальные работы по изучению характеристик акустических струй были опубликованы в Акустическом журнале значительно раньше [4, 5]. В работе [4] струя создавалась низкочастотным излучателем виброрезонансного типа. Устройство появилось и было изучено при решении практической задачи по распылению порошков. В другой работе [5] образование струи изучалось при прохождении интенсивного звука через отверстие в экране, который размещался в поперечном сечении волновода. Исследование проводилось в связи с наблюдаемым так называемым нелинейным поглощением интенсивного звука резонансными системами [6].

Вскоре после того, как генераторы акустических струй начали широко применяться в технике, в трудах AIAA появилась первая экспериментальная работа [7], в которой исследовалось воздейст-

вие акустической струи на стационарный поток, создаваемый вентилятором. В этой работе было проведено измерение скорости струи на центральной оси генератора и получены профили струи на разных расстояниях от выходного отверстия. Все измерения проводились на довольно большом расстоянии от отверстия (начиная с десяти калибров).

Почти одновременно там же была опубликована первая работа по численному моделированию акустической струи [8], где рассматривалось развитие струи только во внешнем по отношению к генератору пространстве, при этом профиль скорости в отверстии задавался аналитически. Позже прямым численным моделированием было получено решение нестационарного уравнения Навье–Стокса с учетом сжимаемости среды. Результирующее поле было определено как внутри, так и снаружи полости генератора [9]. В этой работе подчеркивается, что рассматриваемая задача имеет не только большое практическое значение, но и интересна для понимания фундаментальных процессов физики газов и жидкостей.

Экспериментально полученные значения скорости струи и флуктуации скорости вдоль центральной оси генератора, представленные в работе [10], находятся в хорошем согласии с расчетом только начиная с расстояния, большего 5 калибров, и сильно расходятся на более близком к отверстию расстоянии. Ниже будет показано, чем может быть вызвано это расхождение.

В наших предыдущих работах [11, 12] изучалось пространственное развитие акустической струи, возникающей на открытом конце волновода при распространении в нем интенсивной звуковой волны. Целью настоящей работы является определение зависимости максимальной скорости, достигаемой струей, от амплитуды колебательной скорости в отверстии, определение порогового значения этой скорости, при превышении которого возникает струя, а также определение частотной зависимости порогового значения. В известных нам работах эти вопросы не рассматривались.

Экспериментальная установка подобна той, которая была описана ранее в работе [6]. Волноводом служит труба круглого сечения с внутренним диаметром $d_0 = 2.35$ см и длиной 74 см, один конец которой соединен через конический концентратор с громкоговорителем, а другой конец открыт. Поле скорости в волноводе и снаружи него регистрировалось проволочным датчиком термоанемометра постоянной температуры (фирма "DISA", Дания), поле давлений звуковой волны определялось полудюймовым конденсаторным микрофоном (фирма "Brüel & Kjaer", Дания). Измерения проводились на резонансных частотах системы, которые определялись по максимально-

му значению амплитуды колебательной скорости в выходном сечении волновода. Для данной конструкции резонансные частоты составили 175, 255 и 358 Гц.

Обработка термоанемометрических измерений и разделение скорости акустической струи V_{jet} и амплитуды колебательной скорости V_{osc} , обусловленной как звуковыми колебаниями, так и случайными флуктуациями, производились по методике, описанной в работе [13]. Скорость струи оценивалась по среднеквадратичной величине сигнала термоанемометра, а колебательная составляющая скорости определялась по величине стандартной дисперсии этого сигнала. Следует отметить, что такая методика применима только в том случае, когда $V_{jet} > V_{osc}$. В противном случае, когда $V_{jet} \leq V_{osc}$, использовался метод непосредственной обработки осциллограмм, представленный ниже.

Как уже отмечалось в работе [12], при уровне звука 160 дБ, что соответствует амплитуде колебательной скорости, равной 10 м/с, в волноводе и его выходном сечении регистрируется только гармоническая звуковая волна. Осциллограмма представлена на рис. 1а. Ни микрофон, ни датчик термоанемометра не обнаруживают каких-либо искажений. Трансформация звуковой энергии в гидродинамическую начинается сразу за выходным отверстием волновода, при этом $V_{jet} < V_{osc}$. Появление спутного потока приводит к возрастанию амплитуды колебаний в один полупериод и уменьшению в другой на величину скорости потока (рис. 1б). В этом случае скорость струи определяется как полуразность усредненных значений максимальных и минимальных амплитуд регистрируемого сигнала, а амплитуда колебательной скорости – как полусумма этих значений. Количественная оценка V_{jet} и V_{osc} выполняется с учетом градуировочной кривой датчика, полученной в звуковом поле на данной частоте (так как чувствительность датчика существенно зависит от частоты). Использование стандартной методики на малых расстояниях от отверстия приводит к ошибочным результатам и вызывает расхождение экспериментальных и расчетных данных, как это, по-видимому, получилось в работе [10].

Пространственное распределение скорости струи V_{jet} , нормированной к амплитуде колебательной скорости в выходном отверстии волновода V_0 , вдоль оси волновода x на выбранных резонансных частотах при уровне звука 160 дБ представлено на рис. 2. Расстояния выражены в калибрах, то есть нормированы на диаметр отверстия d_0 . Видно, что скорость струи уменьшается с расстоянием быстрее на более высокой частоте 358 Гц. Ход представленной экспериментальной зависимости очень хорошо согласуется с расчетной зависимостью, полученной в работе

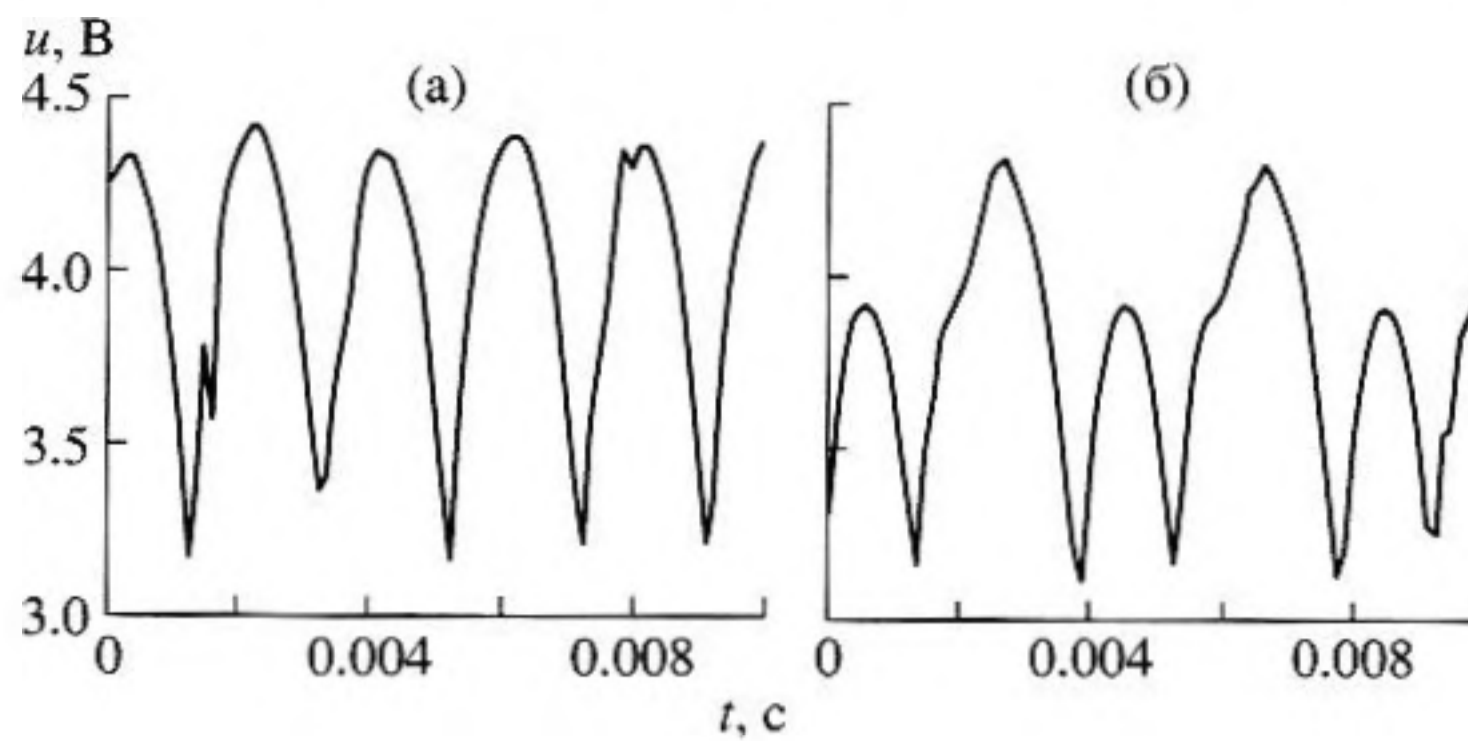


Рис. 1. Осциллограммы сигнала термоанемометра в выходном сечении волновода (а) и на расстоянии 4 мм от него (б) на частоте 255 Гц.

[10] при численном моделировании процесса образования струи.

Развитие акустической струи в пространстве можно условно подразделить на три области. В первой области, которая в условиях проведения эксперимента занимает расстояние от 1 до 2 калибров, происходит формирование струи за счет уменьшения энергии звуковой волны. Скорость образующейся струи достигает своего максимального значения, которое сравнимо с амплитудой колебательной скорости в выходном сечении волновода, что существенно отличает изучаемое явление от известных акустических течений Рэлея, Эккарта и Шлихтинга, скорость которых на порядок меньше амплитуды колебательной скорости звуковой волны. На рис. 3 представлен поперечный профиль струи на расстоянии, соответствующем максимуму ее скорости. Видно, что для более низкой частоты колебаний струя имеет большую ширину. Вторая область, которая находится на расстоянии от 2 до 4 калибров, соответ-

ствует стабилизации образовавшейся струи. Скорость струи в этой области меняется незначительно, при этом число Рейнольдса достигает 16000. Поэтому начинается активная турбулизация струи, вызванная ее взаимодействием с окружающей средой, и это четко отражается в спектре мощности. В третьей области происходит уменьшение скорости струи и расширение ее профиля. На рис. 4 представлены профили скорости струи для частоты 358 Гц на расстоянии 1.3, 2.1 и 6.0 калибров. Видно, что на расстоянии 6 калибров скорость струи уменьшается в 2 раза, а ширина ее профиля увеличивается также в 2 раза.

Погрешность определения величины скорости струи складывается в основном из неточности градуировки датчика и ошибки в его позиционировании при перемещении вдоль оси. В настоящих измерениях она не превышала 10%.

Датчик термоанемометра в связи с его недостаточной чувствительностью перестает регистрировать звуковую волну уже во второй области.

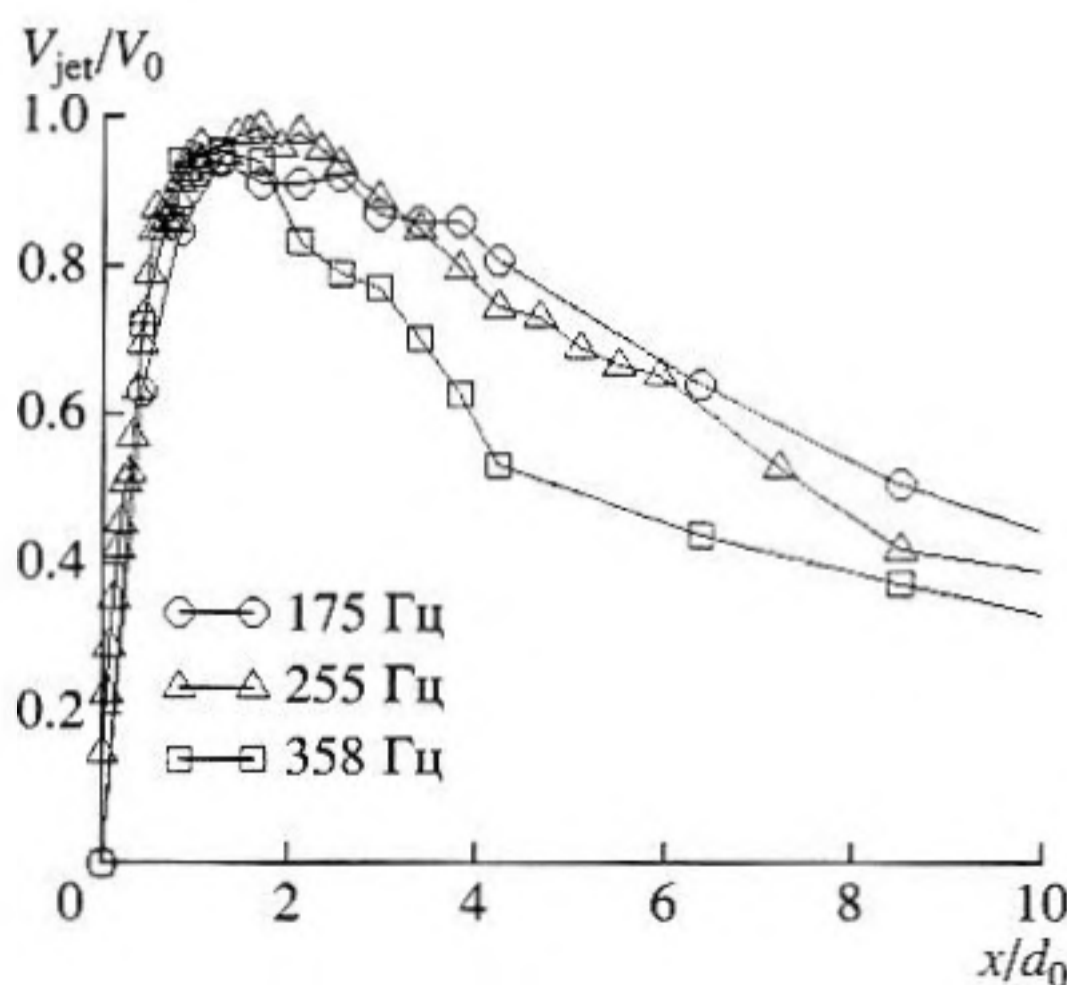


Рис. 2. Распределение безразмерной скорости струи вдоль оси волновода.

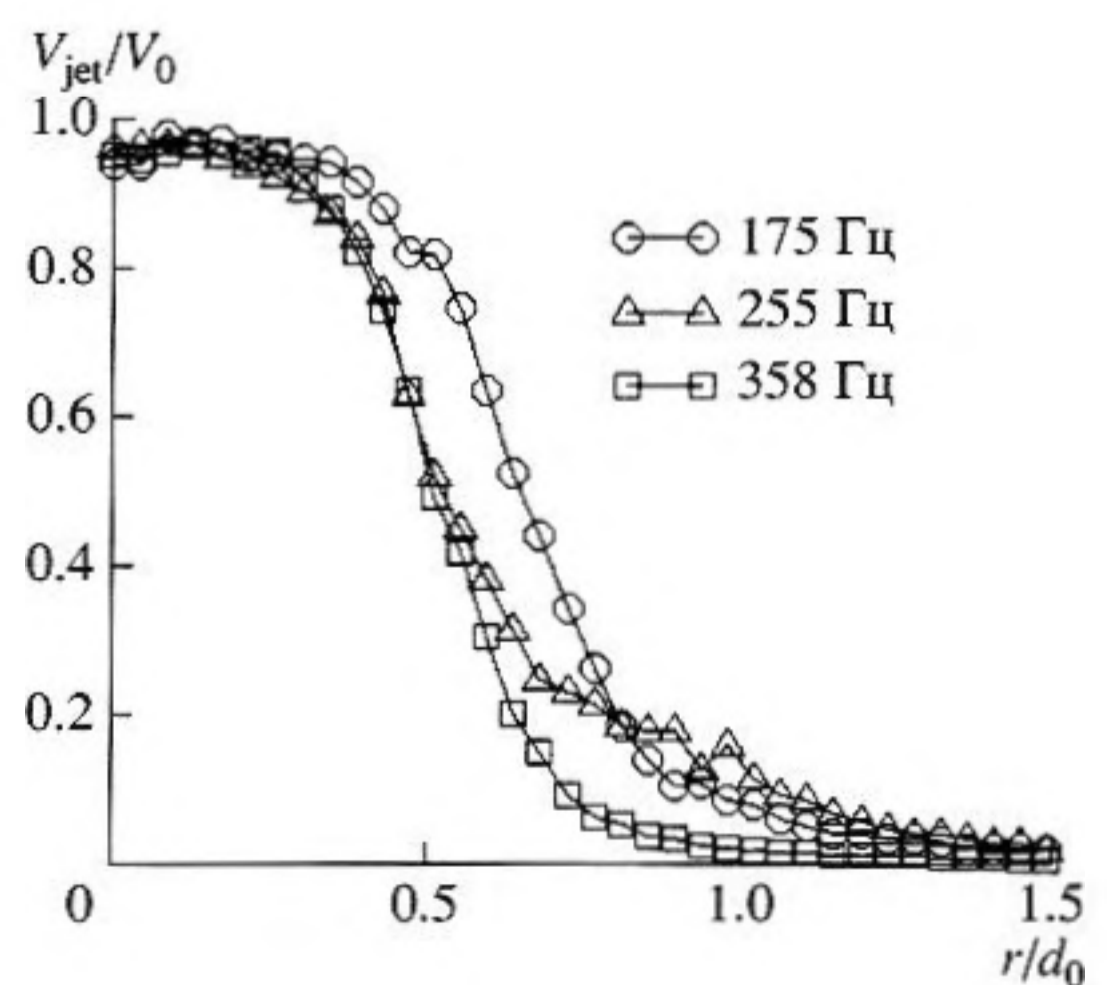


Рис. 3. Безразмерный профиль максимальной скорости струи на расстоянии 1.3 калибра.

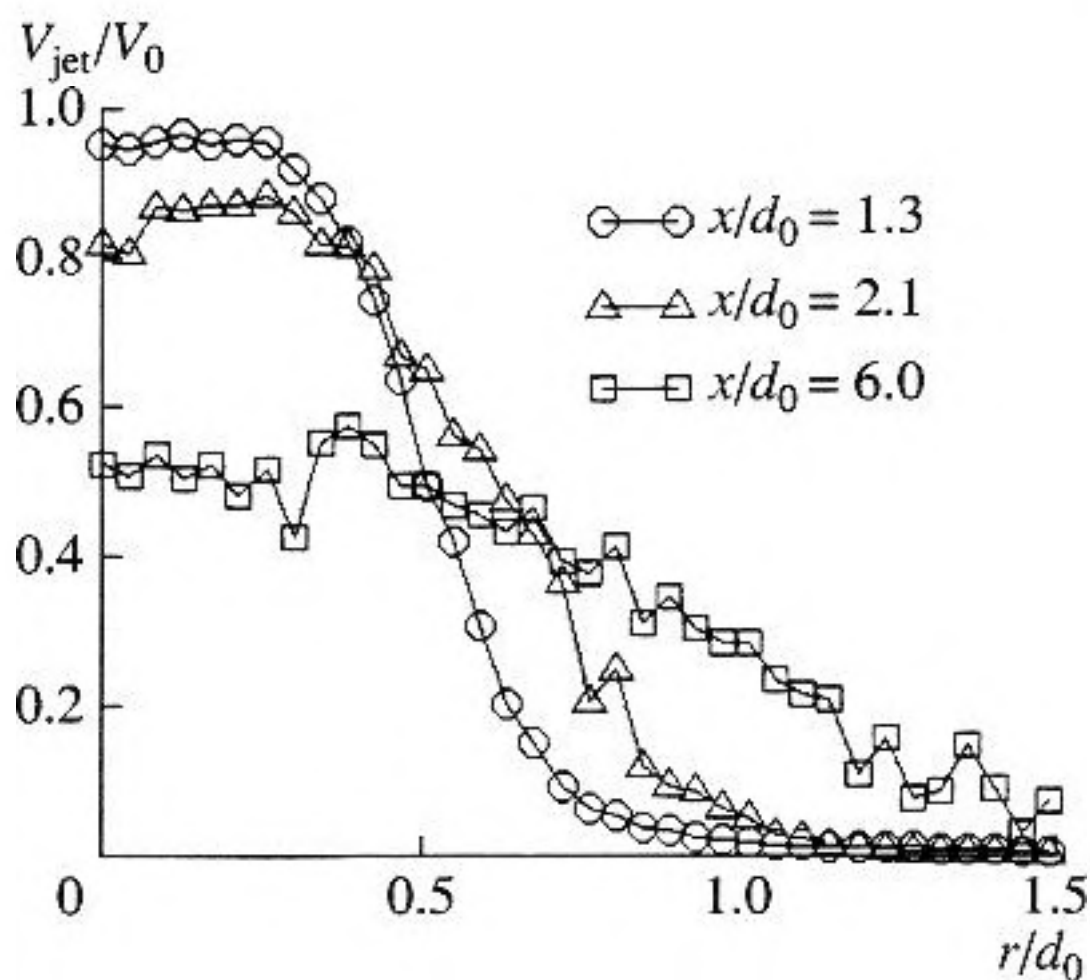


Рис. 4. Безразмерный профиль скорости струи на частоте 358 Гц на различных расстояниях от открытого конца волновода.

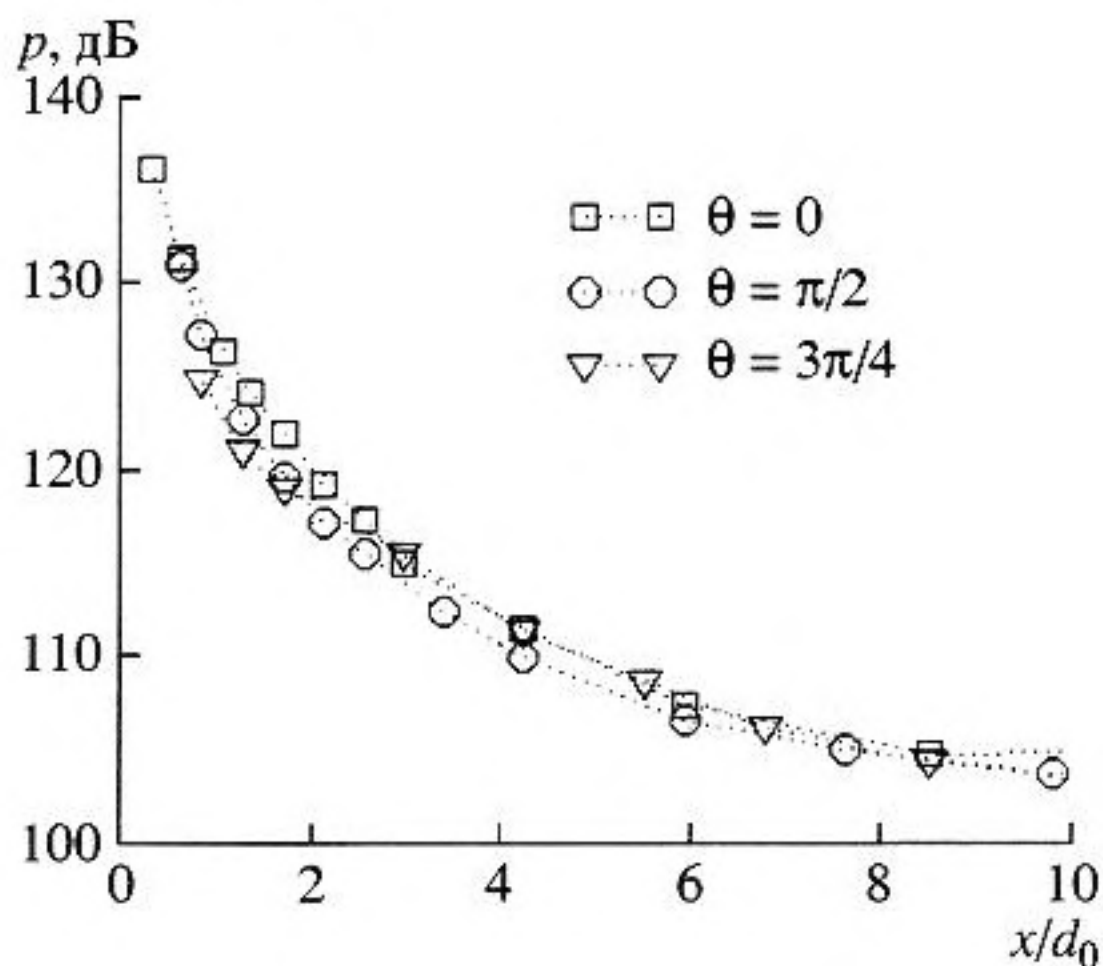


Рис. 5. Распределение уровня звукового давления на частоте 358 Гц вне волновода вдоль его оси и под углом θ к ней.

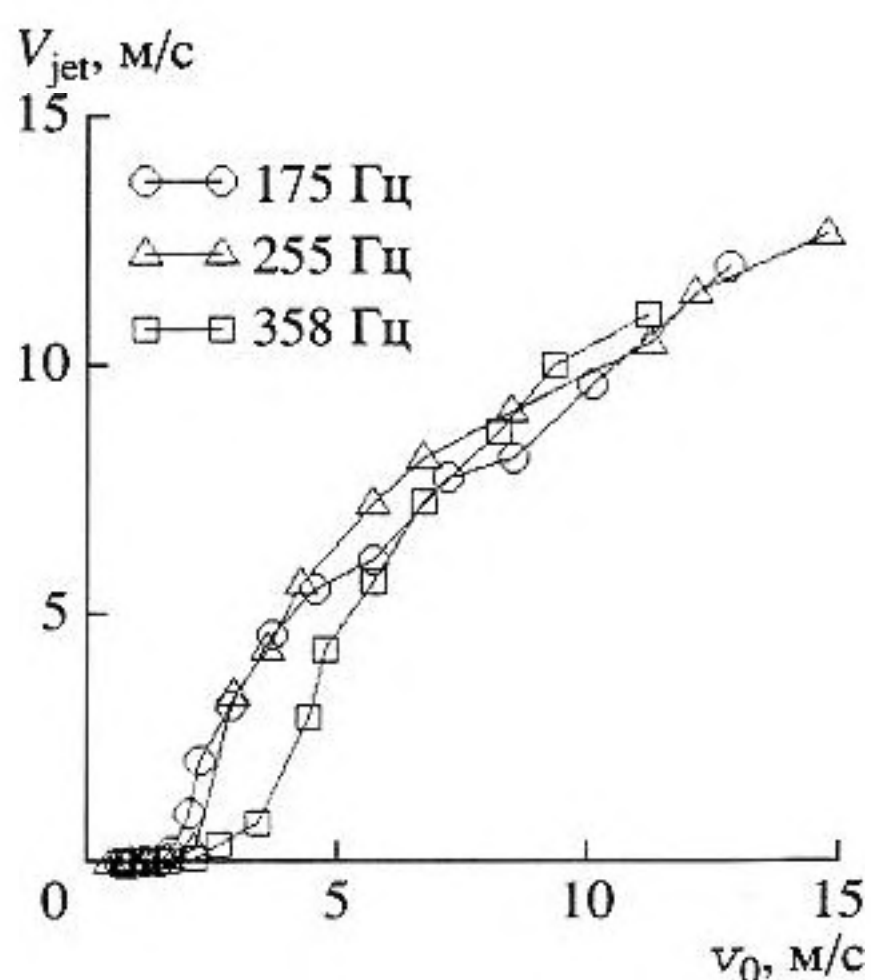


Рис. 6. Зависимость максимального значения скорости струи от амплитуды колебательной скорости в выходном сечении волновода.

Поэтому звуковое поле вне волновода измерялось с помощью полудюймового конденсаторного микрофона. Результаты измерения звукового давления вдоль оси волновода и вдоль прямых, лежащих под углом θ к ней, представлены на рис. 5. Образующееся звуковое поле подобно полю, создаваемому сферически расходящейся звуковой волной от точечного источника.

При изменении уровня звука в волноводе в широком динамическом диапазоне от 138 до 166 дБ (что соответствует изменению V_0 от 0.8 до 15 м/с) было обнаружено наличие порогового значения амплитуды колебательной скорости звука на открытом конце волновода, при превышении которого возникает акустическая струя. В этом отношении изучаемый струйный поток имеет сходство с течением Шлихтинга, для которого также характерно пороговое значение интенсивности звука, связанное с увеличением потерь за счет конвективного члена в уравнении Навье–Стокса.

Экспериментальные данные о зависимости максимального значения скорости струи V_{jet} от амплитуды колебательной скорости в выходном сечении волновода V_0 представлены на рис. 6. Видно, что при амплитуде колебательной скорости, меньшей некоторого критического значения V_p , струя не образуется.

Для того чтобы точнее определить пороговые значения V_p , по экспериментальным данным были построены графики в двойном логарифмическом масштабе, на которых экспериментальные точки группируются вдоль двух пересекающихся прямых¹. Уравнения, описывающие эти прямые, находятся по методу наименьших квадратов, а пороговое значение определяется точкой их пересечения. Пример такой обработки для частоты 175 Гц представлен на рис. 7, из которого следует, что на данной частоте $V_p = 2.4$ м/с.

Зависимость V_{jet} от V_0 можно представить в виде $V_{jet} \propto V_0^\epsilon$ и определить ее степень ϵ , снова обратившись к рис. 7. Степень ϵ есть ни что иное, как тангенс угла наклона прямой при $V_0 > V_p$, рассчитанный по методу наименьших квадратов. Для частоты 175 Гц получено $\epsilon = 0.8$.

Таким же образом были обработаны экспериментальные данные для двух других частот.

Известно, что важным параметром, определяющим условие образования струи, является отношение амплитуды смещения к характерному геометрическому размеру системы. Полученные пороговые значения амплитуды колебательной скорости V_p , соответствующие им амплитуды смещения ξ_p , нормированные к диаметру волновода

¹ Изменение угла наклона прямой отражает изменение механизма потерь звуковой энергии.

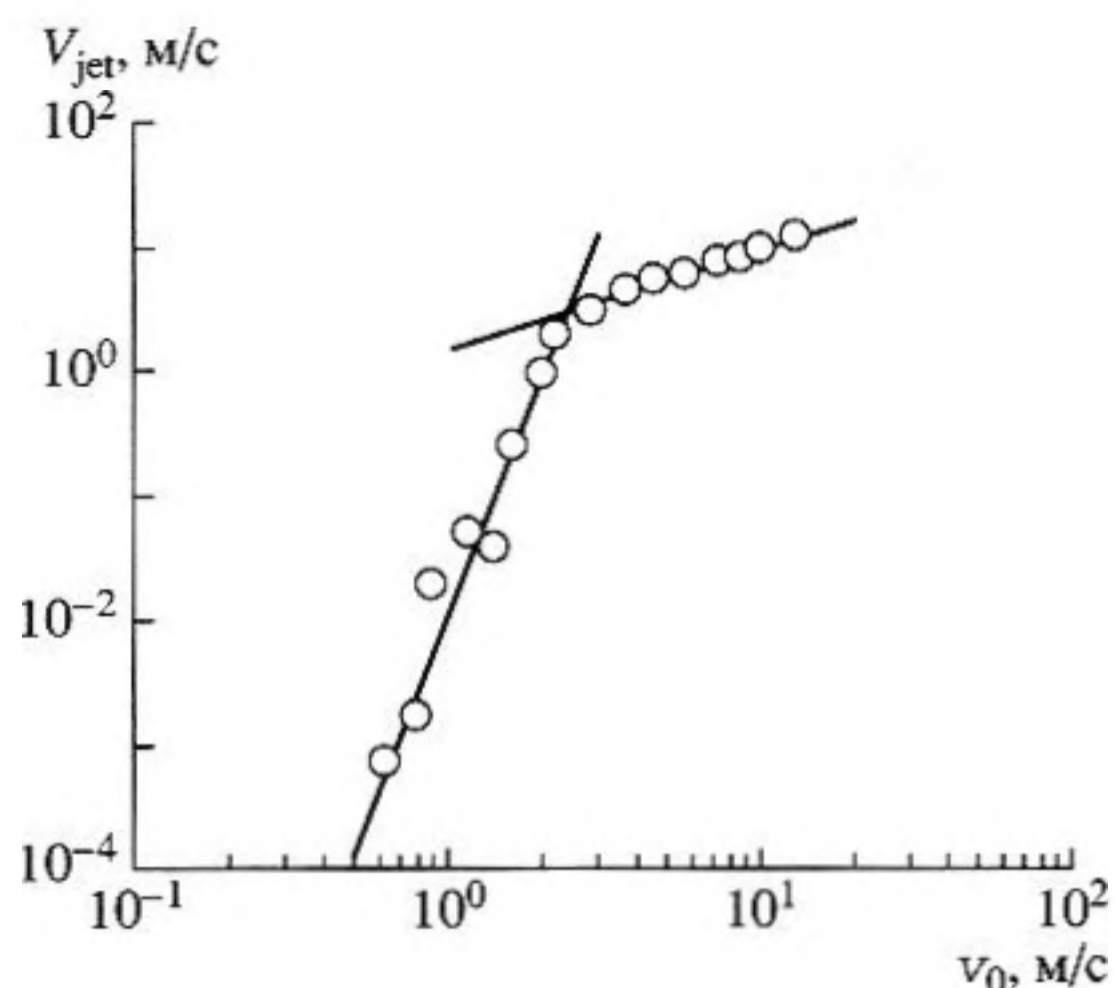


Рис. 7. Та же зависимость, как на рис. 6, на частоте 175 Гц, построенная в двойном логарифмическом масштабе.

d_0 , и степень ϵ зависимости V_{jet} от V_0 приведены в таблице для всех трех частот.

Пороговое значение амплитуды колебательной скорости V_t в пределах одной октавы увеличивается примерно в 2 раза. В то же время, нормированное смещение ξ_t/d_0 для использованного волновода оказывается приблизительно одинаковым и составляет в среднем 0.09. Следует отметить, что в работе [14] приводится величина аналогичного параметра, более чем на порядок превышающая это значение. Дело в том, что авторы определяли данный параметр руководствуясь только картиной визуализации поля. Это привело к тому, что они указали критерий не для порога образования струи, а для режима существования струи с развитой турбулентностью.

Среднее значение степени $\epsilon = 0.9$, то есть рассматриваемая зависимость близка к прямо пропорциональной, а небольшое отличие вызвано, очевидно, сферическим расхождением звуковой волны вне волновода.

Таким образом, стандартный метод обработки экспериментальных данных, справедливый только при $V_{jet} > V_{osc}$, дополнен методом обработки осциллограмм при $V_{jet} \leq V_{osc}$ и получено полное представление о развитии струи в пространстве, начиная от выходного отверстия волновода. Об-

Параметры акустической струи

| f , Гц | V_t , м/с | ξ_t/d_0 | ϵ |
|----------|-------------|-------------|------------|
| 175 | 2.4 | 0.093 | 0.8 |
| 255 | 3.1 | 0.082 | 0.7 |
| 358 | 4.9 | 0.093 | 1.1 |

наружено хорошее согласие между экспериментально измеренным пространственным распределением скорости струи и расчетными зависимостями, полученными методом численного моделирования в работе других авторов [10]. Установлено, что зависимость скорости струи от амплитуды колебательной скорости в выходном сечении волновода близка к прямой пропорциональности. По экспериментальным данным определены пороговые значения амплитуды колебательной скорости в отверстии волновода, при превышении которых образуется струя, а также зависимость этих значений от частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Amitay M., Honohan A., Trautman M., Glezer A. Modifications of the aerodynamic characteristics of bluff bodies using fluidic actuators // AIAA Paper-97-2004. 1997.
2. Ross F. Synthetic-jet microblowing for vortex asymmetry management on a hemisphere-cylinder forebody // AIAA Paper-97-1973. 1997.
3. Donovan J.F., Kral L.D., Cary A.W. Active flow control applied to an airfoil // AIAA Paper-98-0210. 1998.
4. Медников Е.П., Новицкий Б.Г. Экспериментальное исследование мощного звукового ветра // Акуст. журн. 1975. Т. 21. № 2. С. 245–249.
5. Лебедева И.В. Экспериментальное исследование акустического течения в окрестности отверстия // Акуст. журн. 1980. Т. 26. № 4. С. 599–602.
6. Драган С.П., Лебедева И.В. Поглощение интенсивного звука на отверстии в экране // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 2. С. 206–212.
7. Smith B.L., Glezer A. Vectoring and small-scale motions effected in free shear flows using synthetic jet actuators // AIAA Paper-97-0213. 1997.
8. Kral L.D., Donovan J.F., Cain A.B., Cary A.W. Numerical simulation of synthetic jet actuators // AIAA Paper-97-1824. 1997.
9. Rizetta D.P., Visbal M.R., Stanek M.J. Numerical investigation of synthetic-jet flowfields // J. AIAA. 1999. V. 37. № 8. P. 919–927.
10. Mallinson S.G., Hong G., Reizes J.A. Some characteristics of synthetic jets // AIAA Paper-99-3651. 1999.
11. Грушин А.Е., Лебедева И.В. Структура поля скорости интенсивной звуковой волны у открытого конца волновода // Труды X сессии РАО. 2000. Т. 1. С. 71–74.
12. Лебедева И.В., Грушин А.Е. Развитие акустической струи в пространстве у открытого конца волновода // Вестник Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2002. № 2. С. 49–52.
13. Грушин А.Е., Лебедева И.В. Определение амплитуды колебательной скорости звуковой волны с помощью термоанемометра в потоке // Измерит. техника. 2001. № 5. С. 63–65.
14. Smith B.L., Swift G.W. Synthetic jets at large Reynolds number and comparison to continuous jets // AIAA Paper-2001-3030. 2001.

Amplitude and Frequency Characteristics of Acoustic Jets

A. E. Grushin and I. V. Lebedeva

Physics Faculty, Moscow State University, Vorob'evy gory, Moscow, 119992 Russia

e-mail: lebedeva@acs373a.phys.msu.su

The prerequisites to formation and the characteristics of a jet that occurs at the open end of a waveguide guiding an intense sound wave are studied. The velocity field is measured by the wire probe of a hot-wire anemometer. The previously developed method of separating the jet velocity V_{jet} from the amplitude of the oscillating particle velocity V_{osc} , which is applicable only when $V_{jet} > V_{osc}$, is supplemented with the method of oscillogram processing applicable for $V_{jet} \leq V_{osc}$. Thus, a full picture of the jet evolution in space, starting from the waveguide outlet, is obtained. The experimentally determined spatial distribution of the jet velocity is found to agree well with the numerically simulated dependences reported by other authors. For the particle velocity amplitude at the open end of the waveguide, a threshold value, beyond which the formation of the acoustic jet takes place, is revealed. The frequency dependence of this threshold value is determined. The dependence of the maximal jet velocity on the particle velocity amplitude in the outlet waveguide cross section is found to be close to linear.