

УДК 532.525.2:534.2

© 2002 г. Л.Л. ЛЕБЕДЕВ, А.А. ПАВЕЛЬЕВ

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ КРОМКИ СОПЛА НА АКУСТИЧЕСКУЮ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СТРУЙ

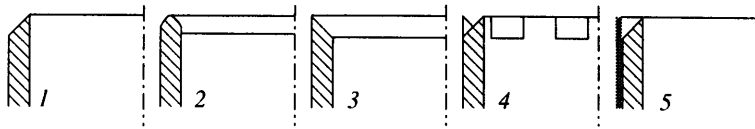
Проведено экспериментальное исследование влияния формы кромки сопла на акустическую чувствительность струи, т.е. на зависимость характеристик струи от амплитуды и частоты акустических колебаний от внешнего источника. Исследования проводили при таких конфигурациях кромки сопла, изменение которых без внешнего акустического воздействия не приводило к изменению характеристик струи. Это означает, что изменение формы кромки не изменяло структуру течения на срезе сопла и режим течения в пограничном слое на стенках сопла. Измерения зависимости средней скорости и интенсивности пульсаций скорости на оси струи от расстояния до среза сопла показали, что при внешнем акустическом воздействии изменение формы кромки сопла может приводить к изменению акустической чувствительности струи.

Влияние акустики на струйные течения и пламена было отмечено более ста лет назад. Результаты первых экспериментов в этом направлении были проанализированы Рэлеем [1], который отметил, что "чувствительным местом является основание пламени. Звук, подводимый по трубке, не эффективен, если он подается к пламени несколько выше, а также, если он подходит к горелке ниже места, откуда выходит пламя". В зависимости от частоты и амплитуды акустических колебаний, воздействующих на струю, наблюдалось как увеличение, так и уменьшение длины начального участка струи и интенсивности пульсаций скорости на оси струи [2–4]. Далее везде под интенсивностью пульсаций подразумевается отношение среднеквадратичного значения продольных пульсаций к средней скорости на оси потока.

Относительно механизма воздействия высказывались различные точки зрения. Однако наиболее экспериментально обоснованной является утверждение, что акустические колебания взаимодействуют с устройствами, формирующими поток, и в частности с кромкой сопла, что приводит к возбуждению в потоке периодических пульсаций скорости, частота следования которых совпадает с частотой акустических колебаний [5–7].

Уменьшение длины начального участка струи и увеличение интенсивности пульсаций скорости на этом участке наблюдалось при числах Струхала $St_D = fD/U_0$, близких к 0.3 [8], где D – диаметр струи, f – частота внешнего акустического возмущения, U_0 – скорость на входе. Увеличение длины начального участка струи и уменьшение интенсивности пульсаций скорости на этом участке наблюдалось при более высокочастотном акустическом возбуждении струй. Если пограничный слой на стенках сопла ламинарный, то максимальное воздействие наблюдалось при числе Струхала $St_\theta = f\theta/U_0 \approx 0.017$ [6, 9], где θ – толщина потери импульса. В случае турбулентного пограничного слоя воздействие высокочастотных акустических колебаний на уменьшение интенсивности пульсаций скорости на оси наблюдалось при больших значениях амплитуды акустических колебаний по сравнению со случаем ламинарного пограничного слоя [4].

Влиянию изменения формы сопла на акустическую чувствительность струй, т.е. на зависимость характеристик струи от амплитуды и частоты акустических колебаний,



Фиг. 1. Типы форм кромок: 1 – заточена под 45° с внешней стороны, 2 – округлая кромка, 3 – заточена под 45° с внутренней стороны, 4 – кромка разбита на N частей, которые заточены в разные стороны, 5 – острая кромка с экраном

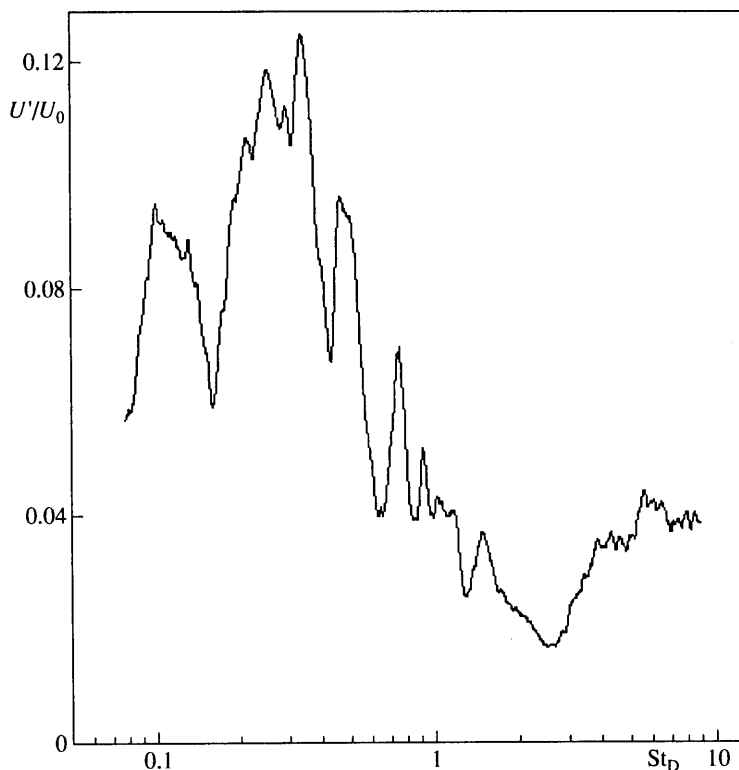
посвящено много работ, обзор которых можно найти в [10]. Но в этих работах изменение формы сопла приводило к изменению структуры течения на срезе сопла и, следовательно, характеристик струи.

В [11] было предложено воздействовать на акустическую чувствительность струй, изменяя только форму кромки сопла, с которой взаимодействуют акустические колебания. При этом предполагалось воздействовать только на структуру и амплитуду начальных возмущений, из которых развиваются кольцевые вихри в слое смешения, что может быть сделано без изменения структуры потока в выходном сечении сопла. Однако систематических экспериментальных исследований влияния формы кромки сопла на структуру течения на начальном участке струи выполнено не было.

1. Экспериментальная установка представляла собой аэродинамическую трубу с открытой рабочей частью. Схема успокоительной камеры установки приведена в работе [12]. В выходном сечении получается течение с плоским профилем средней скорости по всему сечению, за исключением пограничных слоев на стенках сопла. Интенсивность продольных пульсаций скорости на оси не превышала 0.5% от средней скорости. Измерения проводили при скорости на оси трубы 17 м/с. Воздух в успокоительную камеру подавался от вентилятора DISA 55D41/42. После конфузора устанавливался сменный отрезок трубы длиной 100 мм, внутренним диаметром 49 мм и толщиной стенки 2 мм. Исследования воздействия акустики на струю проводили при пяти конфигурациях торца трубы, схемы которых приведены на фиг. 1. В дальнейшем различные формы кромок обозначаются 1–5. Были исследованы следующие формы кромок: острая кромка, заточенная с внешней стороны под 45° (1); округлая кромка (2); острая кромка, заточенная с внутренней стороны (3); пилообразная кромка, образованная разбиением торца трубы на N частей и последующей их заточкой под углом 45° попеременно с внешней и внутренней стороны (4(N)); острая кромка / с надетым на внешнюю стенку трубы металлическим цилиндром (5). Пилообразная кромка исследовалась в двух видах 4(8) и 4(36) с 8-ю и 36-ю зубцами, соответственно.

Измерения проводились с помощью термоанемометра с постоянной температурой нити DISA 55D/55M. Датчик термоанемометра закреплялся на микрокоординатнике и перемещался вдоль оси потока. Сигнал поступал на вольтметр с интегратором и среднеквадратичный вольтметр и далее с помощью аналогоцифрового преобразователя Lcard(L-154) записывался на компьютер.

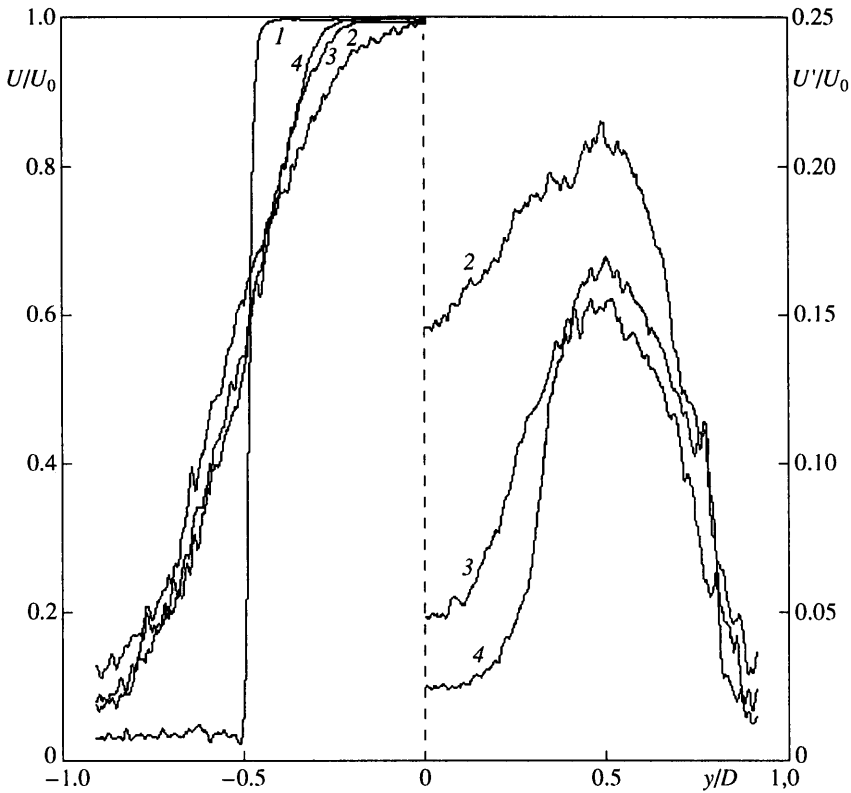
Для создания акустического поля с контролируемой амплитудой выходного сигнала использовался низкочастотный генератор ГЗ-104 с входом автоматической регулировки уровня сигнала, с помощью которого он соединялся с шумомером Brüel&Kjær 2209 и образовывал систему с обратной связью. Для измерения звукового давления использовался микрофон конденсаторного типа шумомера Brüel&Kjær 2209 с линейной амплитудно-частотной характеристикой в рабочем диапазоне частот, который находился на расстоянии порядка D от испытываемой кромки. Сигнал от генератора усиливался на выходе усилителем мощности низкой частоты и поступал на излучатель звуковой частоты 50ГРД–Ш–8, установленный перпендикулярно к оси потока на расстоянии ~ 15 см от оси потока. Для подавления шумов и резонансов рабочая часть установки помещена в беззвучную камеру шириной и высотой 45 и длиной 160 см. Уровень шума в лабораторном помещении не превышал 60Дб (относительно $2 \cdot 10^{-5}$ Па).



Фиг. 2. Зависимость интенсивности пульсаций скорости на оси струи на расстоянии $2.5D$ от среза от числа Струхалия, построенного по диаметру струи $St_D = fD/U_0$

2. Зависимость интенсивности пульсаций скорости на оси от частоты $U'(f)$, полученная для острой кромки l на расстоянии $2.5D$ от среза, приведена на фиг. 2. В этом эксперименте при помощи автоматической развертки генератора была получена непрерывная зависимость $U'(f)$ по всему спектру в диапазоне частот от 30 Гц до 3.5 кГц. Амплитуда звукового возмущения была постоянна и равна 120 Дб. Из графика видно, что максимум эффекта увеличения интенсивности пульсаций достигается при $St_D \approx 0.29$ (100 Hz), максимум эффекта понижения интенсивности пульсаций скорости достигается при $St_D \approx 2.6$ (900Hz). Так как при ламинарном пограничном слое максимальный эффект высокочастотного воздействия наблюдался при числе Струхалия, построенного по толщине потери импульса, равном 0.017 [6, 9], то можно оценить толщину потери импульса $\theta = St_0 D / St_D = 0.3$ мм. Если оценить толщину потери импульса в ламинарном пограничном слое, развивающемся на длине трубы после конфузора, равной 100 мм, то $\theta = 0.664 \sqrt{\nu L / U_0} = 0.2$ мм, где ν – кинематическая вязкость, а L – длина трубы. Наблюдающееся различие вполне объяснимо, так как пограничный слой развивается и в конфузоре, и поэтому на входе в трубу толщина потери импульса отлична от нуля.

На фиг. 3 представлены безразмерные профили скорости и пульсаций скорости для острой кромки l на расстоянии $2.5D$ от среза при внешнем акустическом возбуждении с частотами 100 и 900 Hz. Кроме того, на этом же графике приведен профиль скорости на срезе для той же кромки. Интенсивность пульсаций скорости при внешнем акустическом возбуждении отличается от интенсивности пульсаций скорости без акустического возбуждения как на оси струи, так и в слое смешения. Но на оси струи

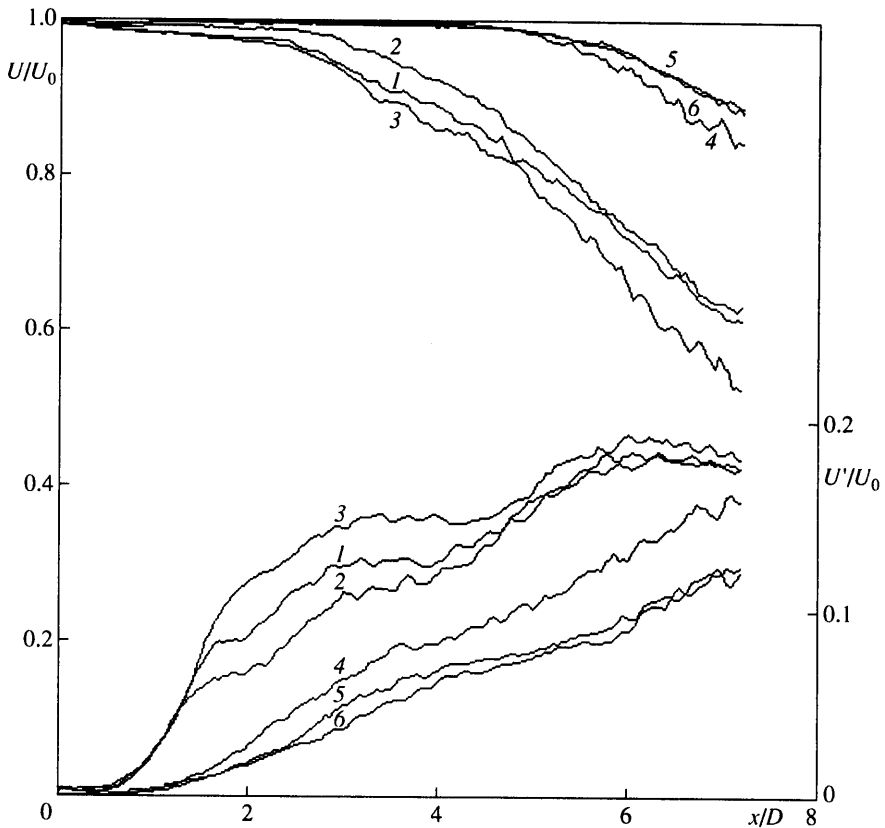


Фиг. 3. Профили скорости и интенсивности пульсаций скорости на срезе (1) и на расстоянии $2.5D$ от среза (2–4) при внешнем акустическом возбуждении: 2 – $St_D = 0.29$, 3 – $St_D = 0$, 4 – $St_D = 2.6$

эта разница более заметна. Это объясняется тем, что основной вклад в пульсационное движение на оси вносится крупномасштабными низкочастотными вихрями, которые наиболее сильно изменяются при внешнем акустическом возбуждении.

Исследование влияния конфигурации кромки сопла на интенсивность пульсаций скорости на оси струи проводилось следующим образом. Устанавливался отрезок трубы с одним из испытываемых типов кромки. При заданной амплитуде (120 Дб) и частоте внешнего акустического возмущения проводились измерения скорости $U(x)$ и пульсаций скорости $U'(x)$ в зависимости от расстояния до среза сопла. Частоты акустического возбуждения соответствуют зонам максимального эффекта $St_D \approx 0.29$ (100 Hz), $St_D \approx 2.6$ (900 Hz), как видно из фиг. 2. Далее устанавливался другой тип кромки, для которой проводились аналогичные измерения при тех же параметрах акустического поля.

Проведенные эксперименты показали, что изменение формы кромки без воздействия акустики от внешнего источника не приводило к изменению зависимости $U(x)$ и $U'(x)$. На фиг. 4 приведена зависимость $U(x)$ и $U'(x)$ при внешнем акустическом возбуждении и различных формах кромки. Различия в акустической чувствительности для кромок 1, 2 и 4(8) не наблюдалось. Акустическая чувствительность струи при кромке 4(36) отличалась от акустической чувствительности при форме кромки 1 как при низкочастотном, так и при высокочастотном акустическом возбуждении. При кромке 4(36) пульсации скорости на оси были больше, а длина начального участка меньше как при низкочастотном, так и при высокочастотном акустическом возбуж-



Фиг. 4. Зависимость скорости $u = U/U_0$ и интенсивности пульсаций скорости $u' = U'/U_0$ на оси струи от расстояния от среза x при внешнем акустическом возмущении для различных форм кромок. Кривые 1–3 – $St_D = 0.29$: кромки трубы 1, 5, 4 (36); 4 – $St_D = 0$; кривые 5, 6 – $St_D = 2.6$: кромки 4 (36), 1

дении по сравнению с соответствующими величинами при кромке 1. При кромке 5 наблюдались снижение пульсаций скорости при низкочастотном возбуждении и их рост при высокочастотном возбуждении по сравнению с результатами при кромке 1. Пульсации скорости при высокочастотном возбуждении при кромках 4(36) и 5 были близки, а при низкочастотном возбуждении заметно различались. Пульсации скорости при кромках 3 и 4(36) и низкочастотном возбуждении были близки между собой.

Данные результаты наблюдались на длине от $x = D$ до $x = 7D$, но при $x > 5D$ изменение формы кромки значительно слабее влияет на уровень пульсаций скорости, чем на длине от $x = D$ до $x = 5D$.

Выполненные в работе эксперименты показывают, что форма кромки влияет на акустическую чувствительность струи при отсутствии влияния на струю без акустического воздействия. Неоднородность кромки по азимуту приводит к увеличению пульсаций скорости на оси как при высокочастотном, так и при низкочастотном акустическом возбуждении.

Согласно [6], эффект ослабления интенсивности пульсаций при высокочастотном облучении связан с тем, что в слое смешения вблизи сопла генерируются последовательно расположенные двумерные кольцевые вихри, взаимодействие которых с более крупномасштабными движениями в слое смешения приводит к ослаблению последних

и, следовательно, к уменьшению пульсаций скорости на оси. При пилообразной кромке начальные возмущения, возникающие при взаимодействии акустических колебаний с кромкой, могут иметь азимутальную неоднородность, что может приводить к трехмерности и меньшей интенсивности развивающихся из них вихрей, образовавшихся при высокочастотном возбуждении. Следствием этого может быть меньшее ослабление крупномасштабных пульсаций и, следовательно, рост пульсаций скорости на оси, наблюдавшийся в эксперименте при замене кромки l на кромку 4(36).

Влияние экрана, по-видимому, сводится к ослаблению вводимых в поток пульсаций скорости, что и приводит к ослаблению эффекта воздействия акустики как в случае высокочастотного, так и низкочастотного облучения.

Заключение. Исследования проводили при таких конфигурациях кромки сопла, что без внешнего акустического воздействия ее замена на любую другую из описанных выше не приводила к изменению характеристик струи, т.е. структура течения на срезе сопла и режим течения в пограничном слое на стенках сопла оставались неизменными.

Зависимость средней скорости и интенсивности пульсаций скорости на оси струи от расстояния до среза сопла показала, что при внешнем акустическом воздействии изменение формы кромки сопла может приводить к изменению акустической чувствительности струи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 00-01-00152).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рэлей (Дж. Стретт). Теория звука. Т. 2. М.: Гостехиздат. 1944. 476 с.
2. Власов Е.В., Гиневский А.С. Акустическое воздействие на аэродинамические характеристики турбулентной струи // Изв. АН СССР. МЖГ. 1967. № 4. С. 133–138.
3. Власов Е.В., Гиневский А.С. Генерация и подавление турбулентности в осесимметричной турбулентной струе при акустическом воздействии // Изв. АН СССР. МЖГ. 1973. № 6. С. 37–43.
4. Власов Е.В., Гиневский А.С., Каравосов Р.К., Макаренко Т.М. О подавлении турбулентности в дозвуковых струях при их высокочастотном акустическом возбуждении // Изв. АН СССР. МЖГ. 1999. № 1. С. 28–34.
5. Навознов О.И., Павельев А.А. Влияние начальных условий на течение осесимметричных струй // Изв. АН СССР. МЖГ. 1980. № 4. С. 18–24.
6. Павельев А.А., Цыганок В.И. Влияние акустики и режима течения в пограничном слое на стенках сопла на слой смещения затопленной струи // Изв. АН СССР. МЖГ. 1982. № 6. С. 36–42.
7. Павельев А.А., Цыганок В.И. Влияние акустической регуляризации начальных возмущений на развитие упорядоченных структур // Изв. АН СССР. МЖГ. 1986. № 1. С. 171–174.
8. Crow S.C., Champagne F.H. Orderly structure in jet turbulence // J. Fluid Mech. 1971. V. 48. Pt 3. P. 547–591.
9. Zaman K.V.M.Q., Hussain A.K.M.F. Turbulence suppression in free shear flows by controlled excitation // AIAA Paper. 1980. № 1338. P. 16.
10. Гиневский А.С., Власов Е.В., Каравосов Р.К. Акустическое управление турбулентными струями // М.: Физматлит. 2001. 240 с.
11. Луцик В.Г., Павельев А.А., Якубенко А.Е. Управление турбулентными пограничными слоями: результаты экспериментов и расчетные модели // Механика и научно-технический прогресс. Т. 2. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. С. 67–89.
12. Коляда В.В., Павельев А.А. О переходе к турбулентности на начальном участке круглой трубы // Изв. АН СССР. МЖГ. 1985. № 4. С. 52–56.