

УДК 532.517.4+534.2

## ВЛИЯНИЕ АКУСТИКИ И РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА СТЕНКАХ СОПЛА НА СЛОЙ СМЕШЕНИЯ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ

ПАВЕЛЬЕВ А. А., ЦЫГАНОВ В. И.

Экспериментально определялись ширина слоя смешения и уровень турбулентных пульсаций на начальном участке дозвуковой круглой затопленной струи при различных параметрах пограничного слоя на стенках сопла и при акустическом возбуждении. Установлено, что скорость расширения турбулентного слоя смешения зависит от режима течения в пограничном слое. При ламинарном начальном пограничном слое внешнее акустическое возбуждение может приводить к уменьшению скорости расширения слоя смешения и интенсивности пульсаций скорости на оси струи в пределах начального участка. Если частота и амплитуда акустического возбуждения, при котором наблюдалось уменьшение скорости расширения слоя смешения и интенсивности пульсаций, оставались неизменными, то турбулизация пограничного слоя приводила к исчезновению влияния акустики. Механизм воздействия акустических колебаний на дозвуковые струи сводится к порождению вихревых возмущений при взаимодействии акустических колебаний с кромкой сопла.

1. Объектом исследования в настоящей работе является турбулентный слой смешения на начальном участке круглой затопленной воздушной струи. Скорость на срезе сопла постоянна по сечению, за исключением тонкого пограничного слоя на стенке, уровень возмущений в ядре мал: интенсивность продольных пульсаций меньше 0,7% от средней скорости. Одной из основных характеристик такого слоя является его ширина. Ширина определяется по профилю средней скорости. Обычно используется несколько способов определения ширины, однако в предположении, что профиль средней скорости описывается функцией ошибок

$$\frac{U}{U_0} = \frac{1}{2}(1 + \operatorname{erf} \xi), \quad \xi = \sigma \frac{y}{x - x_0} \quad (1.1)$$

где  $\sigma$  — параметр подобия, ширины слоя, определяемые различными способами, различаются постоянными множителями. В данной работе всюду будет использоваться величина  $b$ , которая определяется как расстояние между точками профиля скорости, в которых безразмерная средняя скорость равна 0,1 и 0,95.

В плоском слое смешения, если пренебречь влиянием начальных условий и вязкости, из соображений размерности зависимость ширины слоя смешения от расстояния должна описываться формулой

$$b = k(x - x_0) \quad (1.2)$$

Величины  $k$  и  $x_0$  — экспериментальные константы. Эта зависимость справедлива и для осесимметричного слоя смешения на начальном участке круглой струи.

Использование формулы (1.2) предполагает, что величина  $k$  не зависит от начальных условий и должна быть одинаковой в различных экспериментах. Однако в опубликованных данных по измерению ширины слоя смешения отмечался большой разброс величины  $k$ . В ряде работ ана-

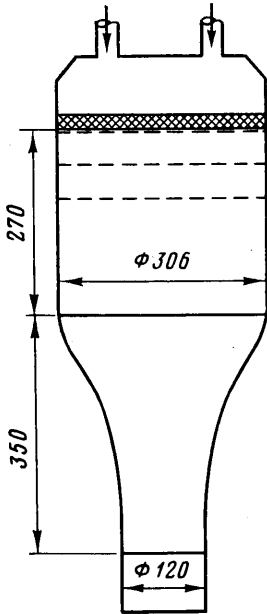
лизировались данные о величинах  $k$  и условия, при которых эти значения были получены [1, 2]. В работе [3] отмечалось, что «во многих работах по струйным течениям не учитываются изменения начальных условий, что приводит к различным полуэмпирическим зависимостям». Результаты исследования влияния начальных условий на осесимметричный слой смешения были опубликованы в [2]. Начальные условия в этой работе характеризовались режимом течения в пограничном слое у среза сопла (турбулентный или ламинарный), числом Рейнольдса, построенным по толщине потери импульса, и интенсивностью продольных пульсаций. Отмечается, что при одинаковой интенсивности пульсаций скорость расширения слоя смешения существенно не зависит от  $Re_0$ , но зависит от режима течения в начальном пограничном слое. При ламинарном начальном пограничном слое величина  $k$  находилась в пределах 0,158–0,17, при турбулентном пограничном слое получены значения  $k=0,186–0,202$ , однако авторы отмечают, что использованных ими характеристик начального пограничного слоя недостаточно для объяснения разброса в экспериментальных данных.

Значительное внимание в последние годы уделялось воздействию звука на струйные течения и, в частности, на упорядоченные структуры, обнаруженные в свободных турбулентных сдвиговых слоях. Результаты первых экспериментальных исследований воздействия звука на струи и пламена были проанализированы в работе Рэлея [4]. В этой работе были сформулированы основные качественные особенности явления чувствительности изолированных дозвуковых струй и пламен к внешнему акустическому воздействию. Можно выделить следующие положения, сформулированные Рэлеем: 1. «Происхождение чувствительности следует, несомненно, искать в неустойчивости, сопровождающей вихревое движение». 2. «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 работе [5] впервые описан эффект уменьшения интенсивности пульсаций скорости на оси затопленной струи под воздействием акустического возбуждения от внешнего источника. Подробное экспериментальное изучение эффекта подавления турбулентности проведено в [6]. Показано, что частота звука, при которой эффект имеет место, определяется параметрами начального пограничного слоя и не связана с диаметром струи. Эффект максимален (на оси струи уровень пульсаций уменьшается на 80% на расстоянии  $x=2,5D$  от среза для струи диаметром  $D=2,54$  см), когда число Струхала, построенное по частоте звука, скорости в ядре струи  $U_0$  и толщине потери импульса  $\theta_0$  в пограничном слое на стенке сопла в выходном сечении,  $St=f\theta_0/U_0=0,017$ . Эта частота соответствует частоте наиболее быстрорастущих возмущений в неустойчивом ламинарном слое сдвига, который образуется непосредственно за срезом сопла. Подавление пульсаций наблюдалось на расстояниях  $x/D=1–8$  ( $x/\theta_0=200–1100$ ) при уровнях возбуждения  $u_c'/U_0$  от 0,3 до 1,8% ( $u_c'$  – среднеквадратичное значение продольных пульсаций скорости в звуковой волне на срезе сопла). При турбулентном начальном пограничном слое эффект подавления турбулентности на оси струи не наблюдался. Подавление пульсаций под действием звука наблюдалось и в плоском слое смешения. Для выяснения механизма воздействия звука авторы [6] вносили в течение возмущения с помощью колеблющихся струн и получили при этом качественно те же результаты, что и со звуком. Таким образом, роль звука в этом случае сводится к введению в поток периодических возмущений у кромки сопла. Авторы [6] считают, что подавление pulsa-

ций на оси струи под действием звука происходит вследствие более быстрого перехода к турбулентности в сдвиговом слое, при этом тормозится формирование крупномасштабных вихрей. Это приводит к тому, что пульсации, вызванные прохождением и взаимодействием этих вихрей, всюду уменьшаются по сравнению с невозбужденным течением.

2. Эксперименты проводились на рабочей части, схема которой приведена на фиг. 1. Воздух из магистрали высокого давления подводился ко входному коллектору установки. Далее, через слой с большим гидравлическим сопротивлением (фетр), воздух проходил в цилиндрическую камеру диаметром 306 мм, в которой



Фиг. 1

устанавливалась мелкопористая сетка. За цилиндрической частью устанавливался конфузор с диаметром на выходе 120 мм. Форма конфузора рассчитывалась по методу Витошинского. В выходном сечении получается течение с плоским профилем средней скорости по всему сечению, за исключением тонкого пограничного слоя на стенках. Уровень пульсаций в ядре потока 0,7% от средней скорости. Воздух выходит в объем лабораторного помещения. Параметры пограничного слоя изменялись посредством присоединения к соплу цилиндрических секций диаметром 120 мм различной длины. Турбулентный пограничный слой получался при установке на стенке кольца прямоугольного сечения в 85 мм от среза. Толщина кольца (1,5 мм) была порядка толщины пограничного слоя в месте установки.

Характеристики течения измерялись термоанемометром постоянной температуры 55 М и аналоговой аппаратурой фирмы DISA. Чувствительным элементом служила нагретая вольфрамовая нить диаметром 5 мкм длиной 1,2 мм. Нить датчика устанавливалась перпендикулярно к направлению течения, при этом среднеквадратичное значение переменной составляющей линеаризованного сигнала пропорционально среднеквадратичному значению продольной компоненты пульсационной скорости. Погрешности, возникающие за счет влияния других компонент пульсационной скорости, имеют порядок  $(u'/U)^2$ . При интенсивности турбулентности меньше 0,1–0,12 этими поправками можно пренебречь. Далее везде под интенсивностью или уровнем пульсаций подразумевается отношение среднеквадратичного значения продольных пульсаций к средней скорости в ядре течения.

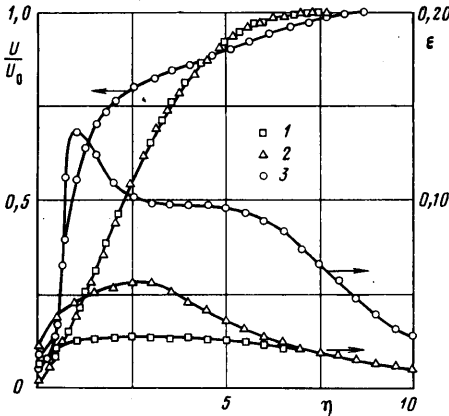
При этих измерениях сигнал проходил через фильтр нижних частот с частотой среза 10 кГц.

Акустическое поле создавалось рупорным динамическим громкоговорителем 50-ГРД-Ш-8. Сигнал на него подавался от генератора звуковой частоты через усилитель мощности. Динамик устанавливался на расстоянии 1,2 м от оси струи так, что его ось была перпендикулярна оси струи и направлена на начальный участок течения. Никаких специальных мер по заглушиванию помещения не принималось. Измерения звукового давления производились конденсаторным микрофоном типа 4133 фирмы «Brüel and Kjaer» с линейной амплитудночастотной характеристикой в рабочем диапазоне частот. Акустические характеристики рабочей части определялись с помощью генератора белого шума и узкополосного спектроанализатора. Первый акустический резонанс имел место на частоте около 250 Гц. Добротность резонатора, оцененная по ширине резонансного пика, составляла 15–17.

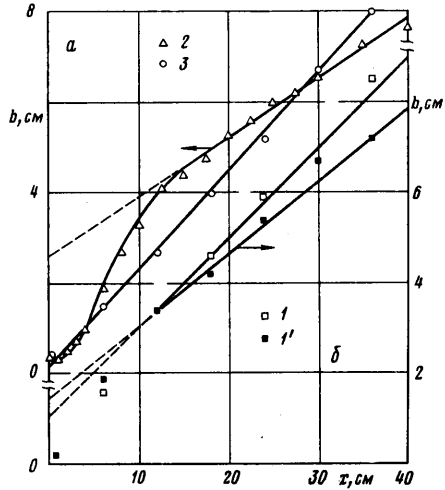
На фиг. 2 представлены безразмерные профили средней скорости и среднеквадратичного значения пульсаций скорости ( $\epsilon = u'/U_0$ ) на срезе сопла для трех рассматриваемых вариантов начального пограничного слоя ( $\eta = y/\theta_0$ ). Средняя скорость в ядре струи во всех случаях была  $U_0 = 8$  м/с. Измерения проводились за кромкой сопла на расстоянии 0,5 мм от нее. Рассматривались следующие варианты начальных условий: 1 – ламинарный пограничный слой с  $\theta_0 = 0,58$  мм, 2 – турбулентный пограничный слой с  $\theta_0 = 0,69$  мм. В первом случае к конфузору пристыковывалась цилиндрическая секция длиной 85 мм, во втором – две секции длиной 200 и 85 мм. Турбулентный пограничный слой получался при установке одной секции длиной 85 мм и турбулизующего кольца. В первых двух случаях безразмерные профили средней скорости близки друг к другу и к профилю Блазуса. Величина пульсаций во втором случае ( $\theta_0 = 0,58$  мм) несколько больше, чем в первом, что связано с развитием возмущений в пограничном слое на большей длине. При постановке турбу-

лизирующего кольца (третий вариант) профили средней скорости и пульсаций существенно отличаются от соответствующих профилей в предыдущих двух вариантах.

На фиг. 3 приведены зависимости ширины зоны смешения от расстояния до среза сопла при различных начальных условиях. При установке турбулизатора (3, фиг. 3, а) экспериментальные точки при  $x > 5$  см хорошо аппроксимируются прямой (1.2) с  $k=0,218$ ,  $x_0=-7$  мм. Зависимость 2 на фиг. 3, а получена при ламинарном начальном пограничном слое с параметрами  $U_0=8,3$  м/с,  $\theta_0=0,571$  мм без внешнего акустического воздействия. Число Струхала, построенное по частоте первого акустического резонанса установки,  $\theta_0$ ,  $U_0$  в этом случае равнялось  $St_0=0,0172$ .



Фиг. 2



Фиг. 3

На фиг. 3, б приведены результаты измерений толщины зоны смешения для первого варианта начальных условий без внешнего акустического возбуждения (1) и при воздействии на струю звука от громкоговорителя (1'). Частота звука 280 Гц, уровень звукового давления на срезе сопла 114 дБ (относительно  $2 \cdot 10^{-5}$  Па). Среднеквадратичное значение скорости в звуковой волне при таком звуковом давлении составляет 2,4 см/с или 0,3% от скорости в ядре струи. Под влиянием звука ширина слоя увеличивается вблизи сопла и заметно уменьшается при  $x > 12$  см.

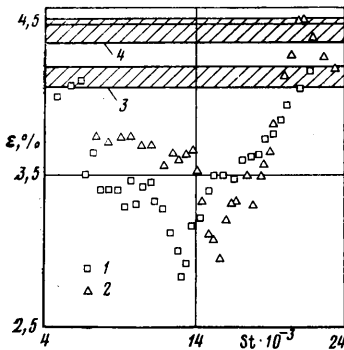
При ламинарном начальном пограничном слое (1, 2 на фиг. 3, а, б) удовлетворительно аппроксимировать прямой можно лишь точки при  $x > 12$  см. Этому участку течения предшествует участок с большей скоростью нарастания ширины слоя смешения. Смена скоростей нарастания происходит при  $x=200-250 \theta_0$ . На участках линейного роста зависимости аппроксимируются прямой (1.2) с параметрами: вариант 2 фиг. 3, а —  $k=0,132$ ,  $x_0=-190$  мм; вариант 1 без звука (фиг. 3, б) —  $k=0,198$ ,  $x_0=-50$  мм; со звуком (1') —  $k=0,16$ ,  $x_0=-90$  мм. Скорости нарастания слоя смешения различаются во всех рассмотренных случаях. Несмотря на различия в скоростях расширения, ширина слоя смешения к концу начального участка струи при смене начальных условий изменяется незначительно.

Исследования акустического воздействия на струю с турбулизированным начальным пограничным слоем в диапазоне чисел Струхала  $0,009 < St_0 < 0,036$  ( $1,5 < St_D < 6,0$ ) и уровне звукового давления на срезе до 115 дБ показали, что ширина слоя смешения в этом случае нечувствительна к акустическому воздействию. В варианте 2 звук также практически не оказывает влияния на ширину слоя смешения.

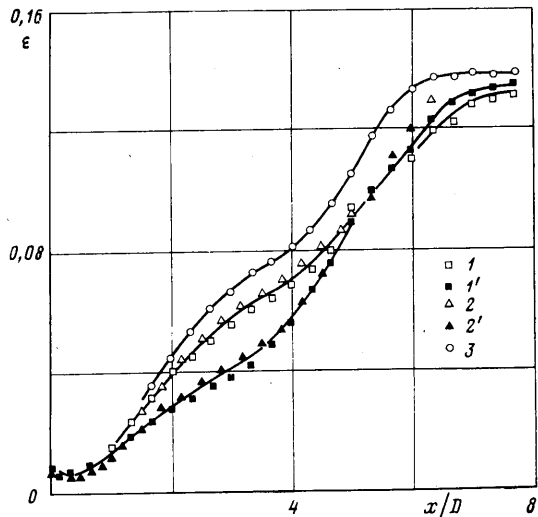
3. Экспериментально исследовалось также влияние режима течения в начальном пограничном слое и акустического воздействия от внешнего источника на интенсивность пульсаций скорости  $\epsilon$  на оси струи. На фиг. 4 приведена зависимость уровня пульсаций на оси струи при  $x=240$  мм от частоты звука ( $St_0$ ) при постоянном напряжении на выходе генератора звуковых сигналов. При установке турбулизированного кольца интенсивность пульсаций равнялась  $4,5 \pm 0,05\%$  (полоса 4 на фиг. 4). В этом случае при воздействии звука в диапазоне чисел Струхала  $0,009 < St_0 < 0,036$  с уровнем звукового давления на срезе до 115 дБ экспериментальные точки не выходили за пределы указанной полосы. Когда пограничный слой на срезе сопла был ламинарным, интенсивность пульсаций составляла  $4,2 \pm 0,08\%$  (полоса 3). Однако

в этом случае при воздействии звука в диапазоне чисел Струхала от 0,0065 до 0,02 наблюдалось уменьшение интенсивности пульсаций. Вне этого диапазона подавление пульсаций на оси не наблюдалось. Минимальное значение уровня пульсаций достигалось при  $St_0=0,0132$  для  $\theta_0=0,382$  мм (1 на фиг. 4) и при  $St_0=0,0156$  для пограничного слоя с  $\theta_0=0,58$  мм (2 на фиг. 4).

В работе [7] экспериментально измерялись инкременты роста возмущений в слое смешения в зависимости от частоты и было установлено, что максимальный инкремент нарастания наблюдался при числе Струхала, построенном по толщине потери импульса пограничного слоя  $St_0=0,017$ . Максимальное подавление пульсаций на оси в работе [6] наблюдалось при  $St_0=0,017$ . Толщина потери импульса  $\theta_0$ , использованная в этой работе для построения  $St_0$ , измерялась на расстоянии  $x=3$  мм от



Фиг. 4



Фиг. 5

кромки сопла, в работе [7] — на расстоянии  $x=1,95$  мм, а в настоящей работе — на расстоянии  $x=0,5$  мм от кромки. По данным из работы [7], различие между  $\theta_0$ , измеренными в этих сечениях, составляет около 10%. Таким образом, можно отметить, что максимальное воздействие акустических колебаний на интенсивность пульсаций наблюдается в диапазоне частот, соответствующих максимальным инкрементам роста возмущений в неустойчивом слое сдвига за кромкой сопла. Измерения распределения интенсивности пульсаций поперек слоя смешения показывают, что заметное влияние звука наблюдается только на краях слоя смешения, где интенсивность пульсаций невелика.

На фиг. 5 приведена зависимость интенсивности пульсаций скорости на оси от расстояния до среза сопла при ламинарном и турбулентном начальных пограничных слоях при воздействии звука и без него. Обозначения на фиг. 5 соответствуют обозначениям на фиг. 2 для трех рассматриваемых вариантов начальных условий. Сплошными значками обозначены уровни пульсаций, полученные при акустическом возбуждении. При совпадении значений, полученных со звуком и без звука, также используется сплошной символ. При ламинарном пограничном слое с  $\theta_0=0,358$  мм (1, 1' на фиг. 5) частота звука была  $f=280$  Гц, во втором варианте ламинарного пограничного слоя ( $\theta_0=0,58$  мм — 2, 2' на фиг. 5)  $f=215$  Гц. Уровень звукового давления на срезе сопла составлял в обоих случаях 114 дБ. Измерения проводились до расстояния, равного восьми диаметрам струи. При  $x>1,5D$  интенсивность пульсаций при турбулентном пограничном слое выше, чем при ламинарном пограничном слое. Уменьшение интенсивности пульсаций при воздействии звука не наблюдается, если пограничный слой турбулентный. При ламинарном пограничном слое воздействие звука приводит к уменьшению интенсивности пульсаций на длине от  $x=D$  до  $x=5D$ . При  $x>5D$  наложение акустических колебаний слабо влияет на уровень пульсаций.

Зависимости ширины зоны смешения от расстояния различаются для ламинарного и турбулентного пограничного слоя на срезе сопла. При турбулентном пограничном слое зависимость ширины зоны смешения

ния от расстояния удовлетворительно аппроксимируется линейной зависимостью, начиная с расстояний  $x=50-100 \theta_0$ , и  $k$  изменяется в диапазоне 0,186—0,23. При ламинарном пограничном слое в зависимости от  $x$  можно выделить три участка. На первом участке ширина слоя с градиентом скорости определяется толщиной пограничного слоя на стенках сопла, смещение на этом участке определяется молекулярной диффузией и расширение слоя невелико. На втором участке скорость расширения слоя смещения резко возрастает и превышает скорости нарастания слоя смещения при турбулентном пограничном слое. На третьем участке, который начинается при  $x/\theta_0=200-250$ , скорость расширения падает и становится меньше, чем при турбулентном пограничном слое. В зависимости от толщины пограничного слоя и спектра возмущений на срезе сопла  $k$  на третьем участке изменяется от 0,13 до 0,2. Следует отметить, что чем меньше скорость расширения на третьем участке, тем более продолжителен второй участок и тем больше ширина слоя смещения в начале третьего участка.

Таким образом, на различных расстояниях ширина зоны смещения при ламинарном пограничном слое на срезе сопла может быть как больше, так и меньше ширины зоны смещения при турбулентном пограничном слое. Вследствие наличия различных участков по скорости расширения слоя смещения при ламинарном пограничном слое, отличие в ширине слоя смещения на начальном участке струи между течениями с ламинарным и турбулентным пограничными слоями меньше, чем между скоростями расширения слоя. При ламинарном начальном пограничном слое внешнее акустическое воздействие с частотами  $St_0 \approx 1,5 \cdot 10^{-2}$  приводит к уменьшению скорости расширения на третьем участке и соответственно — к некоторому увеличению ширины зоны смещения на втором участке. В работе [8] авторы обнаружили увеличение скорости расширения слоя смещения при возбуждении струи звуком в диапазоне чисел Струхала  $St_D$  (по диаметру струи) от 0,3 до 0,6, при этом начальный пограничный слой был турбулентным. Иначе говоря, в зависимости от параметров начального пограничного слоя звук в определенных диапазонах частот может приводить как к увеличению, так и к уменьшению скорости расширения слоя смещения. Роль источника акустических колебаний может играть устройство, формирующее поток, если резонансные частоты этого устройства лежат в диапазоне усиливающихся на начальном участке струи возмущений.

Акустическое возбуждение волн неустойчивости в ламинарном слое сдвига за кромкой сопла приводит к уменьшению как скорости нарастания слоя смещения на последующих этапах, так и интенсивности пульсаций скорости на оси струи. Расстояния, на которых наблюдается уменьшение интенсивности пульсаций под действием звука ( $x/\theta_0=300-400$ ), совпадают с участком, где зависимость линейна и который начинается с  $x/\theta_0=200-300$ . Наибольший эффект наблюдается при возбуждении волн неустойчивости с частотами, для которых инкремент нарастания близок к максимальному по линейной теории. Как показывают спектральные измерения, основной вклад в пульсации скорости на оси струи в пределах начального участка вносят крупномасштабные вихри, развивающиеся в турбулентном слое смещения. Поэтому уменьшение интенсивности пульсаций в потенциальном ядре струи происходит вследствие уменьшения интенсивности или масштаба этих вихрей.

Из результатов своих экспериментов авторы [6] делают вывод, что к подавлению крупномасштабных вихрей приводит ускорение перехода к турбулентности в сдвиговом слое за кромкой сопла, и, вследствие этого, более интенсивное «размывание» мелкомасштабными пульсациями за-

рождающихся крупных вихрей. В этом случае при увеличении амплитуды звуковых колебаний сечение, где течение уже турбулентно, приближалось бы к кромке и в пределе ситуация была бы эквивалентна турбулентному начальному пограничному слою. Следовательно, и уровень пульсаций на оси при акустическом возбуждении должен иметь некоторое промежуточное значение между крайними значениями, соответствующими ламинарному пограничному слою без возбуждения и турбулентному пограничному слою. Авторы [6] не приводят результатов измерений уровня пульсаций на оси при турбулентном пограничном слое. Эксперименты же, проведенные в настоящей работе, показывают (фиг. 5), что уровень пульсаций в этом случае выше, чем в случае невозбужденного ламинарного пограничного слоя, на всей длине, где сказывается влияние звука. А при акустическом возбуждении уровень пульсаций становится еще меньше. Следовательно, укорочение участка перехода к турбулентности под действием звука не является единственной причиной уменьшения пульсаций на оси струи.

Можно предположить, что акустическое возбуждение в данном случае приводит к уменьшению трехмерности и большей регулярности начальных возмущений и, тем самым, к сохранению вихрей, образующихся на участке перехода, на больших расстояниях от сопла. Как отмечалось в [9], введение в поток трехмерных возмущений приводит к более раннему разрушению вихрей, возникающих в процессе перехода. Эти вихри могут взаимодействовать с длинноволновыми возмущениями в турбулентном слое смешения, приводя к их ослаблению. Подобное предположение было высказано в работе [10].

Таким образом, развитие волн неустойчивости в слое смешения на начальном участке струи и скорость расширения слоя смешения зависят от характеристик пограничного слоя на срезе сопла и спектра начальных возмущений, на который могут сильно влиять акустические колебания, создаваемые самим слоем смешения, установкой, формирующей поток, или внешними источниками.

Авторы благодарят Артамонова К. И. за поддержку работы и обсуждение результатов, Навознова О. И. и Агафонова С. Ф. за помощь в организации и проведении экспериментов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Champagne F. H., Pao Y. H., Wygnanski I. J. On the two-dimensional mixing region. — J. Fluid Mech., 1976, v. 74, № 2, p. 209–250.
2. Hussain A. K. M. F., Zedan M. F. Effects of the initial condition on the axisymmetric free shear layer: Effects of the initial momentum thickness. — Phys. Fluids, 1978, v. 21, № 7, p. 1100–1112.
3. Навознов О. И., Павельев А. А. О смешении спутных газовых струй. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1968, № 2, с. 52–57.
4. Рэлей Дж. В. Стрэтт. Теория звука. Т. 2. М., 1956.
5. Власов Е. В., Гиневский А. С. Акустическое воздействие на аэродинамические характеристики турбулентной струи. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1967, № 4, с. 133–138.
6. Zaman K. B. M. Q., Hussain A. K. M. F. Turbulence suppression in free shear flows by controlled excitation. — AIAA Pap., 1980, № 1338, 16 p.
7. Freymuth P. On transition in a separated laminar boundary layer. — J. Fluid Mech., 1966, v. 25, № 4, p. 683–704.
8. Crow S. C., Champagne F. H. Orderly structure in jet turbulence. — J. Fluid Mech., 1971, v. 48, № 3, p. 547–591.
9. Chandrsuda C., Mehta R. D., Weir A. D., Bradshaw P. Effect of free-stream turbulence on large structure in turbulent mixing layers. — J. Fluid Mech., 1978, v. 85, № 4, p. 693–704.
10. Навознов О. И., Павельев А. А. Влияние начальных условий на течение осесимметричных спутных струй. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1980, № 4, с. 18–24.