

УДК 532.525.2:534.2

© 1999 г. Е.В. ВЛАСОВ, А.С. ГИНЕВСКИЙ, Р.К. КАРАВОСОВ, Т.М. МАКАРЕНКО

О ПОДАВЛЕНИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ДОЗВУКОВЫХ СТРУЯХ ПРИ ИХ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ АКУСТИЧЕСКОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

Экспериментально исследовано влияние высокочастотного акустического возбуждения затопленной круглой турбулентной струи при ламинарном и турбулентном пограничных слоях в выходном сечении сопла на уменьшение турбулентных пульсаций скорости в начальном и переходном участках струи. Установлено, что для реализации этого эффекта при наличии турбулентного пограничного слоя требуется более высокий уровень возбуждения по сравнению со случаем ламинарного пограничного слоя.

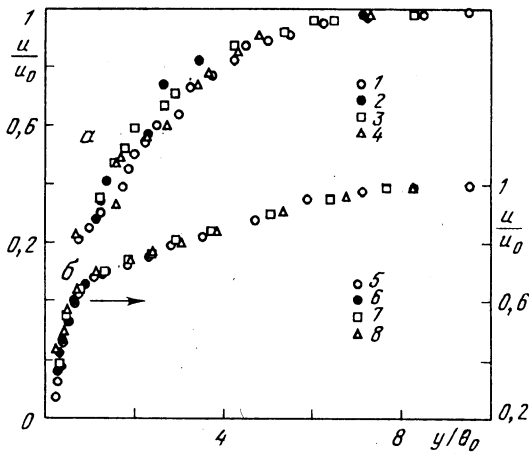
1. Исследования акустического возбуждения турбулентных струй показали, что в зависимости от частоты характеристики струи изменяются по-разному: при низкочастотном облучении происходит интенсификация смешения, а при высокочастотном наблюдается его ослабление [1, 2]. Низкочастотное возбуждение наиболее эффективно при частоте f , соответствующей частоте следования крупномасштабных периодических структур в конце начального участка необлученной струи с числом Струхала $St_d = fd/u_0$ из интервала 0,2–0,5, где d и u_0 – диаметр выходного сечения сопла и скорость истечения. Высокочастотное возбуждение воздействует на частоте f , характерной для мелкомасштабных периодических структур в слое смешения вблизи выходного сечения сопла, при этом $St_d = 2 - 5$. Иногда число Струхала определяют по толщине потери импульса θ_0 в пограничном слое при выходе из сопла: $St_\theta = f\theta_0/u_0$.

Реализация обоих эффектов зависит от начальных условий истечения – режима течения в пограничном слое и степени турбулентности вне пограничного слоя в выходном сечении сопла. К сожалению, в первых работах по исследованию акустического возбуждения струй режим течения в пограничном слое не контролировался. Однако в дальнейшем, когда этот недостаток был устранен, картина оказалась неоднозначной.

Так, было показано, что при низкочастотном акустическом возбуждении интенсификация смешения в струе происходила независимо от режима течения в пограничном слое на срезе сопла и даже при повышенной степени начальной турбулентности $\epsilon_0 = 5$ и 11% [1, 3]. При высокочастотном возбуждении струи получены противоречивые результаты в зависимости от состояния пограничного слоя: в [4] эффект ослабления перемешивания исследован только при ламинарном режиме, в [5] он был реализован при ламинарном режиме течения и не имел места при турбулизации пограничного слоя внутри сопла, в [3, 6] эффект получен как при ламинарном, так и при турбулентном режимах.

В настоящей работе выясняются условия реализации эффекта ослабления перемешивания (уменьшения пульсаций скорости на оси струи в пределах начального участка) при ламинарном и турбулентном пограничных слоях в выходном сечении сопла и различных уровнях акустического возбуждения.

2. Экспериментальная установка представляла собой аэродинамическую трубу замкнутого типа с открытой рабочей частью; для получения затопленной струи достаточной протяженности ($x' = 6,5d$) был снят диффузор и в месте его крепления



Фиг. 1. Профили средней скорости на срезе сопла в ламинарном (а) и турбулентном (б) пограничных слоях (обозначения точек см. в табл. 1)

установлен коллектор (координата x' отсчитывалась вдоль оси струи от среза сопла). Диаметр выходного сечения сопла $d = 0,15$ м, скорость истечения $u_0 = 18$ м/с. Измерения статического давления вдоль оси струи с помощью трубки Пито – Прандтля показали, что на первых шести калибрах струя была изобарической. Число Рейнольдса $Re = u_0 d / \nu = 1,9 \cdot 10^5$, уровень турбулентности в центре выходного сечения сопла $\epsilon_0 \approx 1\%$.

Профили скорости в пограничном слое на срезе сопла (точнее, при $x' = -2$ мм) измерялись микронасадком, представляющим собой трубку полного давления со сплюснутым приемным отверстием. Высота и ширина головной части микронасадка равны 0,36 и 1,2 мм, а размеры приемного отверстия – соответственно 0,2 и 1 мм. Трубка крепилась в управляемом дистанционно микрокоординатнике с шагом перемещения 0,02 мм. Для турбулизации пограничного слоя на стенке сопла на расстоянии $x'' = -82$ мм от выходной кромки на внутренней поверхности сопла устанавливался турбулизатор в виде кольца из проволоки диаметром 1 мм. Полученные данные¹ представлены на фиг. 1. В табл. 1 приведены рассчитанные по этим профилям значения толщины потери импульса θ_0 и формпараметра пограничного слоя $H = \delta^*/\theta_0$ для ламинарного (столбцы 1–4) и турбулентного (столбцы 5–8) пограничных слоев. Отсюда интерполяцией определены значения этих параметров при $u_0 = 18$ м/с: для ламинарного пограничного слоя $\theta_0 = 0,22$ мм и $H = 2,44$, а для турбулентного $\theta_0 = 0,76$ и $H = 1,54$.

В качестве источника звука использовался генератор чистого тона ГЗ-33. Поперечное акустическое возбуждение струи осуществлялось с помощью электродинамического излучателя звука с прямоугольным диффузором 400×200 мм. С помощью этого излучателя удалось получить в выходном сечении сопла уровни звукового давления в диапазоне $L = 95-130$ дБ, причем указанный уровень изменялся незначительно вдоль периметра кромки сопла ($\Delta L \approx \pm 1$ дБ). Величина L измерялась с помощью комплекта электроакустической аппаратуры фирмы Брюль и Кьер.

Для измерений средней продольной скорости в струе u и среднеквадратичных значений продольных пульсаций скорости u' использовался термоанемометр 55MO1 с вольтметрами 55D31 и 55D35 фирмы DISA. Сигнал с термоанемометра записывался

¹ Эксперименты по определению профилей скорости в ламинарном пограничном слое выполнены А.В. Зосимовым, в турбулентном пограничном слое – А.Г. Прозоровым.

N	1	2	3	4	5	6	7	8
u_0 , м/с	16,4	22	30	40	10,5	15,2	20,8	24,2
θ_0 , мм	0,22	0,20	0,17	0,14	0,83	0,77	0,75	0,70
H	2,5	2,34	2,21	2,31	1,57	1,56	1,52	1,51

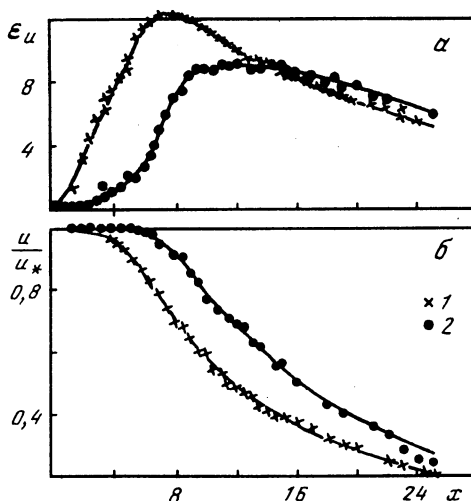
Таблица 2

x	1	2	3	4	5
u/u_*	1,02	1,04	1,16	1,37	1,43
u'/u'_*	0,14	0,18	0,23	0,56	0,68

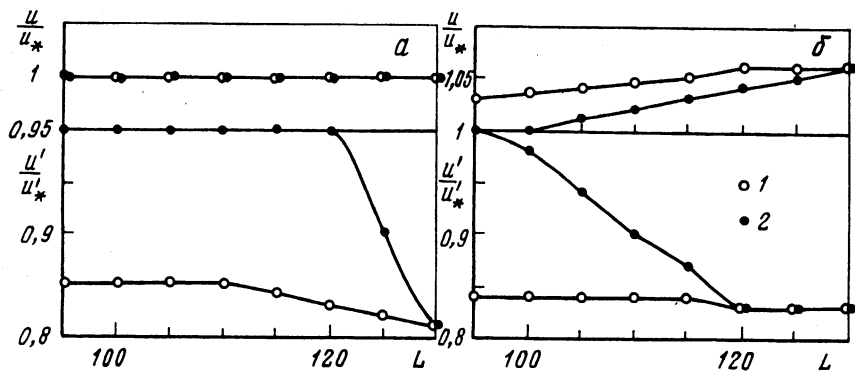
на магнитную ленту, а затем проводился спектральный анализ в узких ($\Delta f = 7$ Гц) или третьоктавных полосах частот.

При измерении параметров потока вдоль оси струи и в ее поперечных сечениях одноточечный насадок термоанемометра с диаметром нити 5 мкм закреплялся в координатном устройстве, обеспечивавшем перемещение насадка в продольном (x) и поперечном (y) направлениях ($y = 0$ на оси струи).

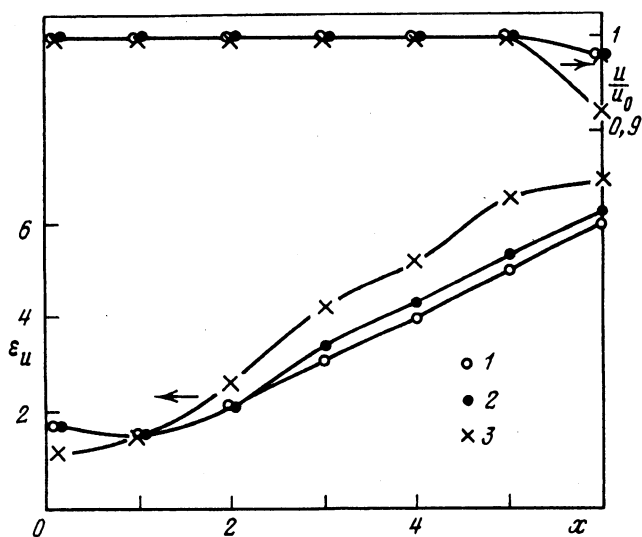
О влиянии акустического возбуждения струи при фиксированной скорости истечения проще всего судить по характеру изменения вдоль оси ($x = x'/d$) струи средней скорости $u(x)$ и продольных пульсаций скорости $u'(x)$ при наличии и отсутствии возбуждения. В качестве примера на фиг. 2 представлены заимствованные из [2] кривые $u/u_0 = \varphi_1(x)$ и $\varepsilon(x) = u'(x)/u_0 = \varphi_2(x)$ для невозбужденной струи (1) и той же струи при ее высокочастотном продольном облучении при $St_d = 2,75$ и $\varepsilon_{ac} = u'_{ac}/u_0 = 0,07\%$, где u'_{ac} – пульсационная скорость в звуковой волне ($u_0 = 20$ м/с, $\varepsilon_0 = 0,5\%$, $d = 10$ мм, $Re_d = 1,4 \cdot 10^4$, $L = 110$ дБ). Начальный пограничный слой был, по-видимому, турбулентным, так как внутри сопла имелась кольцевая выемка, служившая своего рода турбулизатором. Обращает на себя внимание разное проявление эффекта акустического воздействия при различных значениях x . Если в качестве меры проявления эффекта принять отношения u/u_* и u'/u'_* для ряда x , то из фиг. 2 получим следующие значения (табл. 2).



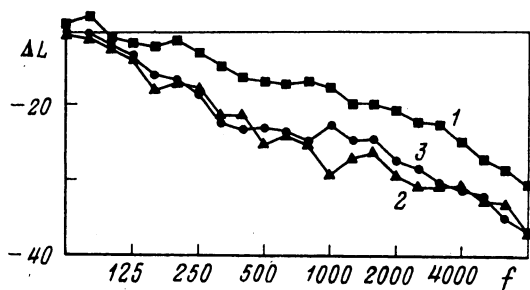
Фиг. 2. Распределение продольных пульсаций скорости (а) и средней скорости (б) вдоль оси струи: 1 – невозбужденной и 2 – возбужденной при $St_d = 2,75$



Фиг. 3. Влияние уровня возбуждения на значение средних и пульсационных скоростей на оси струи в ламинарном (1) и турбулентном (2) пограничных слоях: а - $x = 2$, б - $x = 6$



Фиг. 4. Изменение вдоль оси струи средней скорости и продольных пульсаций скорости: 1, 2 - ламинарный и турбулентный режимы течения в пограничном слое при акустическом возбуждении, 3 - без возбуждения



Фиг. 5. Спектры продольных пульсаций скорости на оси струи в сечении $x = 5$: 1 - без возбуждения, 2 и 3 - ламинарный и турбулентный режимы течения в пограничном слое при акустическом возбуждении

№	d , мм	u_0 , м/с	ϵ_0 , %	$Re_d \cdot 10^{-5}$	St_d	L , дБ	ϵ_{ac} , %	x	H^l
1	25	30	—	0,52	5	120	0,16	8	2,59
2	88	51	0,15	3,14	2,8	130	0,29	9	2,1
3а	120	8	0,8	0,67	6	115	0,33	2	2,6
3б	120	8	0,8	0,67	6	115	0,33	4	2,6
3в	120	8	0,8	0,67	6	115	0,33	8	2,6
4а	150	18	1	1,89	4,17	130	0,83	2	2,44
4б	150	18	1	1,89	4,17	130	0,83	4	2,44
4в	150	18	1	1,89	4,17	130	0,83	6	2,44

Здесь индекс звездочка соответствует параметрам потока при отсутствии акустических возмущений. Естественно, что при других условиях эксперимента (начальные условия истечения, продольное или поперечное возбуждение) отношения u/u_* и u'/u'_* изменятся, однако общая тенденция остается неизменной: с увеличением x в диапазоне 0–9 проявление эффекта становится более заметным.

3. Эксперименты выполнены для двух сечений: а) $x = 2$ и б) $x = 6$ при начальных ламинарном (1) и турбулентном (2) пограничных слоях. На фиг. 3 представлены зависимости u/u_* и u'/u'_* от уровня звукового давления L . Видно, что при начальном ламинарном пограничном слое в обоих сечениях акустическое облучение при $u_0 = 18$ м/с, $f = 500$ Гц, $St_d = 4,17$ и $L > 115$ дБ приводит к заметному снижению среднеквадратичных пульсаций скорости на оси струи (на 15–18%); при начальном турбулентном режиме течения аналогичное снижение достигается только для $L = 120$ –130 дБ. При $L = 130$ дБ эффект оказывается примерно одинаковым для обоих режимов течения в начальном пограничном слое ($u'/u'_* = 0,82$ –0,83).

Сходная картина наблюдается в отношении влияния высокочастотного облучения на изменение средней скорости вдоль оси струи. При $x = 2$ этот эффект выражен слабо, однако для $x = 6$ зафиксировано заметное увеличение средней скорости, большее для начального ламинарного пограничного слоя, причем по достижении уровня звукового давления $L = 130$ дБ независимо от режима течения в пограничном слое достигается одинаковое значение $u/u_* = 1,06$. Изменение вдоль оси струи средней скорости u/u_0 и интенсивности продольных пульсаций скорости $\epsilon_u = u'/u_0$ для начального ламинарного (1) и турбулентного (2) пограничных слоев при наличии акустического возбуждения ($u_0 = 18$ м/с, $f = 500$ Гц, $L = 130$ дБ), а также при отсутствии возбуждения (3) приведено на фиг. 4. В этом последнем случае режим течения в начальном пограничном слое практически не повлиял на изменение u/u_0 и ϵ_u вдоль оси струи x . В заключение приведем третьоктавные спектры продольных пульсаций скорости на оси струи в сечении $x = 5$ (фиг. 5). Вдоль оси ординат отложены значения $\Delta L = L'' - L_*''$, где L'' – уровень пульсаций скорости на частоте f и L_*'' соответствует суммарному уровню пульсаций скорости при отсутствии акустического возбуждения. Здесь L – в дБ и f – в Гц.

Представляет интерес проверить, в какой мере полученные результаты согласуются с прежними экспериментами [6], а также [3–5], в которых эффект подавления турбулентности исследовался при контролируемых начальных условиях с ламинарным и турбулентным пограничными слоями. Данные четырех экспериментальных исследований приведены в табл. 3 соответственно при ламинарном и турбулентном режимах течения в пограничном слое на выходе из сопла (верхние индексы l и t). Первые две работы (строки 1 и 2) выполнены при продольном, а вторые две (строки 3а–3в и 4а–4в) – при поперечном акустическом возбуждении. Здесь строки 1–4 – данные [6, 3, 5] и настоящего исследования.

$St_\theta \cdot 10^{-3}$	Re_θ^l	u^l / u_*	u'^l / u_*'	H^l	$St_\theta \cdot 10^{-3}$	Re_θ^l	u^l / u_*	u'^l / u_*'
10	218	1,13	–	1,52	83	877	1,20	–
7	942	1,12	–	1,6	16	2060	1,12	–
15	220	–	0,72	1,65	36	401	–	1
15	220	–	0,80	1,65	36	401	–	1
15	220	–	1,0	1,65	36	401	–	1
6	271	1	0,82	1,54	21	958	1	0,82
6	271	1	0,76	1,54	21	958	1	0,82
6	271	1,06	0,83	1,54	21	958	1,06	0,83

Проведенные исследования также показали, что введение возмущений в пограничный слой сопла (наличие поперечной канавки на внутренней поверхности сопла, невысокой перегородки или же проволочной сетки на участке поверхности сопла, через которую по волноводу вводятся акустические возмущения [7]) мало сказывается на эффекте низкочастотного возбуждения, но существенно ослабляет или даже устраняет эффект замедления перемешивания при высокочастотном возбуждении. Последний эффект ослабляется также с ростом уровня начальной турбулентности потока и при $\epsilon_0 = 5\%$ практически пропадает [3].

4. Что касается механизма этого эффекта, то здесь, по-видимому, не существует однозначных представлений. Применительно к начальному ламинарному пограничному слою известно, что максимальное воздействие периодических возмущений на неустойчивый слой смешения наблюдается в диапазоне частот, соответствующем максимальным инкрементам роста возмущенной вблизи кромки сопла [4]. Согласно линейной теории устойчивости [8], максимум инкремента достигается при $St_\theta = 0,017$. Механизм подавления пульсаций на оси струи при воздействии высокочастотных возмущений обусловлен ускорением перехода к турбулентности в сдвиговом слое, что тормозит формирование больших вихрей. Это утверждение подвергается сомнению в [5] на том основании, что тогда уровни пульсаций на оси струи при акустическом возбуждении должны принимать некоторое промежуточное значение между крайними значениями, соответствующими начальным ламинарному и турбулентному пограничным слоям без возбуждения, что, как следует и из настоящей работы (см. фиг. 4), не имеет места.

Несколько иное объяснение рассмотренного эффекта, одинаково пригодное для начальных ламинарного и турбулентного пограничных слоев, дано в [5, 9]. Это объяснение сводится к тому, что при высокочастотном возбуждении в слое смешения вблизи сопла ($x < 1,5$) генерируются последовательно расположенные кольцевые вихри, расстояние между которыми определяется частотой возбуждения и скоростью истечения. Это приводит к тому, что в указанной области слоя смешения под действием высокочастотного звука происходит подавление роста низкочастотных возмущений, дающих основной вклад в энергию турбулентности. Эксперименты при низком начальном уровне турбулентности подтверждают этот вывод: инкременты низкочастотных возмущений, соответствующие числам Струхалея $St_d = 1,3 - 2,5$, уменьшаются при $x < 1$. Следовательно, генерируемая звуком мелкомасштабная модуляция завихренности вдоль слоя сдвига приводит к подавлению роста низкочастотных возмущений и стабилизации сдвигового течения.

Описанные в [10] специально поставленные опыты показали, что механизм подавления турбулентности при высокочастотном возбуждении сдвиговых течений не может быть объяснен ни взаимодействием волн Толмина – Шлихтинга в пограничном слое сопла и волн Кельвина – Гельмгольца в слое смешения, ни турбулизацией начального пограничного слоя при акустическом возбуждении.

Заключение. Ослабление перемешивания в струе при ее высокочастотном возбу-

ждении, т.е. частичное подавление турбулентности, реализуется независимо от режима течения в пограничном слое в выходном сечении сопла. Однако при турбулизации начального пограничного слоя для реализации эффекта требуется повышенный уровень акустического возбуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 96-02-19577).

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. 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.
3. Raman G., Zaman K.B.M.Q., Rice E.J. Initial turbulence effect on jet evolution with and without tonal excitation // Phys. Fluids A. 1989. V. 1. № 7. P. 1240–1248.
4. Zaman K.B.M.Q., Hussain A.K.M.F. Turbulence suppression in free shear flows by controlled excitation // J. Fluid Mech. 1981. V. 103. P. 133–159.
5. Павельев А.А., Цыганок В.И. Влияние акустики и режима течения в пограничном слое на стенках сопла на слой смешения затопленной струи // Изв. АН СССР. МЖГ. 1982. № 6. С. 36–42.
6. Власов Е.В., Гиневский А.С., Каравосов Р.К. Аэроакустические характеристики акустически возбужденных струй // Акустика турбулентных потоков. М.: Наука, 1983. С. 14–21.
7. Власов Е.В., Гиневский А.С., Каравосов Р.К. Влияние модового состава акустических возмущений на аэроакустические характеристики турбулентной струи // Акуст. журн. 1986. Т. 32. № 4. С. 526–527.
8. Michalke A. Instabilität eines kompressiblen runden Freistrahls unter Berücksichtigung des Einflusses der Strahlgrenzschichtdicke // Z. Flugwissensch. 1971. B. 19. № 8–9. S. 319–328.
9. Кудряшов А.В., Мансфельд А.Д., Рабинович М.И., Суцник М.М. Модуляционный механизм подавления турбулентности в сдвиговых течениях // Докл. АН СССР. 1984. Т. 277. № 1. С. 61–64.
10. Zaman K.B.M.Q., Rice E.J. On the mechanism of turbulence suppression in free shear flows under acoustic excitation // AIAA Paper. 1992. № 65. 11 p.

Москва

Поступила в редакцию
15.IX.1997