

3. Глаголев А. И., Зубков А. И., Панов Ю. А. Обтекание струйного газообразного препятствия на пластине сверхзвуковым потоком. Изв. АН СССР, МЖГ, 1967, № 3.
4. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М., Гостехиздат, 1957.
5. Hawk N. E., Amick J. L. Two-dimensional secondary jet interaction with a supersonic stream. AIAA Journal, 1967, vol. 5, No. 4.
6. Spraid F. W., Zukoski E. E. Further Experiments concerning secondary injection of gases into a supersonic flow. AIAA Journal, 1966, vol. 4, No. 12.

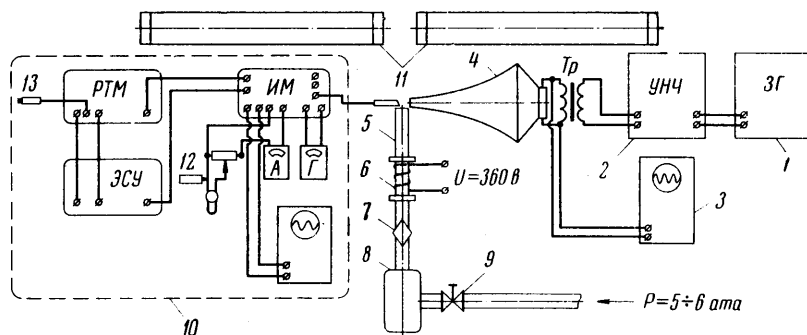
## АКУСТИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА КОРНЕВУЮ ЧАСТЬ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ

Н. Н. ИВАНОВ

(Москва)

Приведены результаты экспериментальных исследований воздействия низкочастотных акустических возмущений различной частоты и постоянной интенсивности на корневую часть неизотермической дозвуковой турбулентной струи, истекающей из прямоструйной форсунки с коническим диффузором, в диапазоне чисел Струхала 0.031—0.054.

Приведены экспериментальные зависимости средней скорости и продольной интенсивности турбулентности как для невозмущенного течения, так и для течения в акустическом поле в функции от различных параметров.



Фиг. 1

В последнее время в работах [1-4] были показаны результаты исследований, посвященных изучению турбулентных струй и пламен при воздействии акустических возмущений.

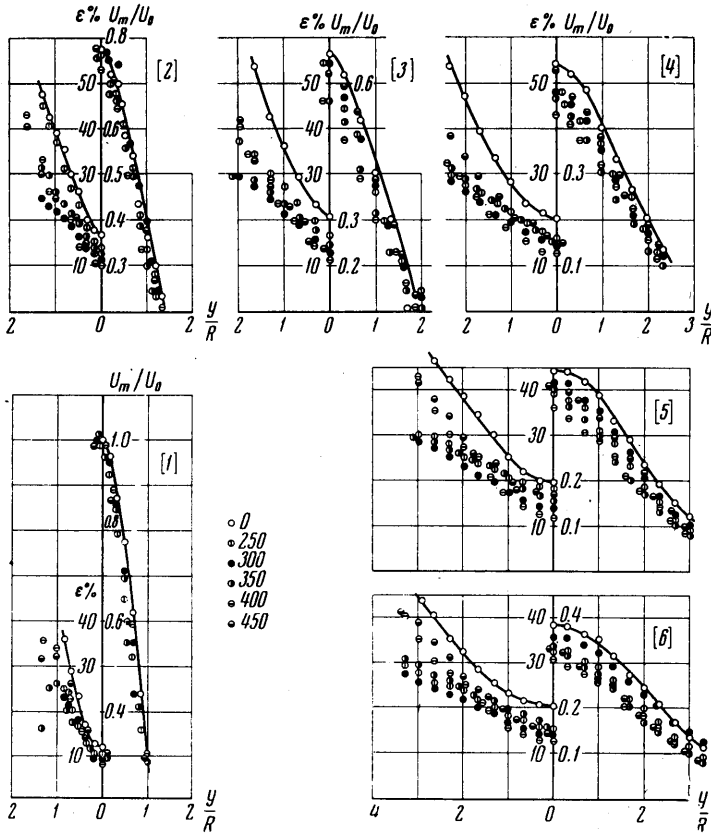
Так, например, в работе [1] показано, что такое воздействие на дозвуковую турбулентную струю наряду с другими эффектами приводит при определенных условиях как к увеличению, так и к уменьшению средней скорости и пульсаций потока. Можно предполагать, что такое изменение аэродинамических характеристик потока в камере сгорания, в свою очередь, приведет либо к более интенсивному перемешиванию компонентов и выгоранию топлива вблизи от среза топливоподающих форсунок, либо, наоборот, к ослаблению интенсификации турбулентного перемешивания.

*Опытная установка и аппаратура.* Схема установки, на которой проводились исследования, показана на фиг. 1. Здесь 1 — звуковой генератор ЗГ-14, 2 — усилитель низкой частоты, 3 — катодный осциллограф, 4 — акустическое устройство, 5 — форсунка, 6 — электроподогреватель, 7 — ротаметр, 8 — ресивер, 9 — вентиль, 10 — электротермоанемометр ЭТА-5А, 11 — теневой прибор ИАВ-451 (условно приподнят над форсункой и повернут на 90°), 12 — шлейф, 13 — подводка к электросети.

В качестве рабочего тела, подаваемого в струйную форсунку, использовался подогретый воздух, отбираемый из заводской сети низкого давления. Струйная форсунка конструктивно представляла собой трубку, скрепленную с коническим раструбом. Диаметр трубки форсунки  $d = 8$  мм, выходной диаметр конического раструба  $D = 2R = 12$  мм, угол раскрытия конического раструба  $2\alpha = 5^\circ$ , а длина этого раструба 50 мм, или 6.25 калибра. Воздух подогревался электроподогревателем, при

помощи которого температура газовой струи поднималась примерно до  $T \approx 400^\circ \text{K}$ . Температура регистрировалась хромель-копелевой термопарой (на схеме не показана), показания последней записывались электронным потенциометром типа ЭПП-09.

Акустические возмущения, подводимые к корневой части турбулентной струи, формировались в устье специально разработанного акустического устройства. Это



Фиг. 2

устройство включало в себя экспоненциальный рупор и два динамических громкоговорителя типа 25ГРД-2 мощностью 25 вт каждый. Громкоговорители через согласующий трансформатор и усилитель низкой частоты типа УМ-50А подсоединялись к генератору чистого тона (в экспериментах использовался генератор ЗГ-14), с помощью которого изменялись частота акустических возмущений и уровни звукового давления. Контроль за характеристиками входного и выходного сигналов акустического устройства производился катодными осциллографами.

На данной установке была также предусмотрена возможность регистрации картины истечения турбулентной струи с помощью теневого прибора ИАБ-451 на фотокиноплёнку. Фотография струи, представленная в данной работе, была получена при помощи фотокамеры «Зоркий-6».

Аэродинамические характеристики возмущенной и невозмущенной турбулентной струи регистрировались с помощью мерного зонда электротермоанемометром типа ЭТА-5А.

Расчет продольной интенсивности турбулентности производился по обычной формуле

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{u'^2}}{u_m} 100\%$$

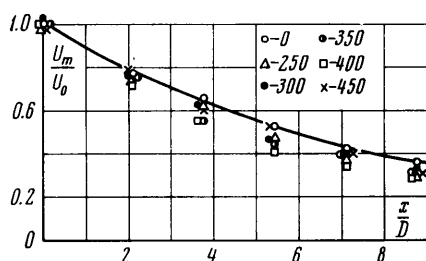
Здесь  $\sqrt{u'^2}$  — среднееквадратичное значение продольной составляющей пульсационной скорости в данной точке потока,  $u_m$  — средняя скорость в данной точке потока.

Экспериментальное определение аэродинамических характеристик дозвуковой турбулентной струи проводилось в различных сечениях струи на протяжении первых примерно 9 кал. вверх по потоку (за калибр принят выходной диаметр конического диффузора  $D = 12$  мм). Замеры производились в шести сечениях, которые располагались на следующем расстоянии от среза конического диффузора:

1	2	3	4	5	6
$l = 5$	25	45	65	85	105 (мм)
$l = 0.415$	2.08	3.75	5.4	7.1	8.75 (кал.)

Критерий Рейнольдса во время проведения экспериментов сохранялся постоянным  $R = 5.2 \cdot 10^4 = \text{const}$ . Интенсивность звуковых колебаний во всех опытах поддерживалась постоянной  $I = 100 \text{ дб} = \text{const}$ , а безразмерный критерий Струхала изменялся в диапазоне  $S = 0.031 \div 0.054$ . Скорость на выходе из струйной форсунки  $u_0 = 100$  м/сек; частота акустических колебаний варьировалась в диапазоне  $f = 250 \div 450$  гц.

*Результаты исследований.* На фиг. 2 представлены результаты экспериментальных измерений средней скорости  $u_m / u_0$  и продольной интенсивности турбулентности  $\epsilon$  в функции безразмерных координат как вдоль оси струи, так и в различных поперечных сечениях (по горизонтальному диаметру). Здесь показаны результаты измерений



Фиг. 3

$$u_m / u_0 = \varphi_1(y/R), \quad \epsilon = \varphi_2(y/R),$$

полученные как при воздействии на корневую часть турбулентной струи низкочастотных акустических возмущений, так и без наложения на корневую часть струи акустических возмущений.

Из представленных экспериментальных зависимостей

$$u_m / u_0 = \varphi_1(y/R)$$

можно видеть, что в диапазоне чисел Струхала  $S = 0.031 \div 0.054$  наложение низкочастотных акустических возмущений на корневую часть турбулентной струи приводит, начиная с расстояния примерно 3.75 кал. от выходного сечения конического диффузора, к заметному уменьшению средней скорости как по оси струи, так и в поперечных сечениях.

Зависимость средней скорости истечения от частоты подаваемого акустического сигнала является сложной и носит нелинейный характер.

Обработка полученных экспериментальных данных показала, что уменьшение величины средней скорости на оси струи при наличии низкочастотных акустических возмущений на расстоянии, например 8.75 кал. от среза форсунки, по сравнению с величиной средней скорости невозмущенной струи может колебаться от  $\sim 7\%$  при частоте  $f = 300$  гц до  $\sim 20\%$  при частоте  $f = 400$  гц.

На расстояниях, меньших 2.08 кал. от выходного сечения конического диффузора, каких-либо заметных изменений в профиле эпюры средних скоростей при наличии сигнала и без него зарегистрировать не удалось.

Интересно отметить, что вблизи среза диффузора имеет место ярко выраженный максимум скорости, который практически не изменяется при наложении акустических возмущений на корневую часть турбулентной струи. Такой вид скоростной эпюры характерен для течения в коническом дозвуковом диффузоре, распределение скоростей в котором в поперечных сечениях, как известно, сильно отличается от равномерного.

Наряду с измерениями средней скорости в данной работе, как видно из фиг. 2, проводились также измерения среднеквадратичных значений продольной составляющей пульсационной скорости и рассчитывались соответствующие величины продольной интенсивности турбулентности  $\epsilon$ .

В невозмущенной турбулентной струе, истекающей из форсунки с коническим диффузором, начальная продольная интенсивность турбулентности вблизи форсунки  $\epsilon_0 = 12\%$ . Из представленных экспериментальных зависимостей следует, что в диапазоне чисел Струхала  $S = 0.031 \div 0.054$  воздействие низкочастотных акустических сигналов на корневую часть турбулентной струи приводит к ослаблению интенсификации турбулентного перемешивания по оси струи.

Зависимость продольной интенсивности турбулентности от частоты подаваемого низкочастотного акустического сигнала является нелинейной.

На этой же фиг. 2 видно, что наложение акустических возмущений на корневую часть турбулентной струи приводит к уменьшению величины изменения продольной

интенсивности турбулентности  $\partial \epsilon / \partial \eta$  в поперечных сечениях струи по сравнению с величиной  $\partial \epsilon / \partial \eta$  в соответствующих сечениях невозмущенной струи ( $\eta = y/R$ ).

В исследованном диапазоне чисел Струхала уменьшение величины продольной интенсивности турбулентности на оси струи по сравнению с величиной  $\epsilon$  невозмущенного течения на расстоянии 8.75 кал. от среза форсунки составляло  $\Delta \epsilon \approx 5\%$ , причем на частоте  $f_1 = 400$  гц эта величина несколько больше и доходила до  $\Delta \epsilon \approx 8\%$ .

Следует отметить, что мерная нить электротермоанемометра зафиксировала уменьшение величины продольной интенсивности турбулентности уже на расстоянии 5 мм от среза конического диффузора, причем эта величина  $\Delta \epsilon$  составляла примерно 1%.

На фиг. 3 представлены опытные данные, показывающие изменение средней скорости турбулентной струи в функции безразмерных координат

$$u_m / u_0 = \varphi_3(x/D)$$

на протяжении первых 9 кал. по оси струи как для невозмущенного потока, так и для турбулентного течения в низкочастотном акустическом поле.

Эти экспериментальные кривые находятся в хорошем соответствии с приведенными выше результатами.

Из фиг. 3 можно видеть, что во время истечения турбулентной струи в низкочастотном акустическом поле характер кривой

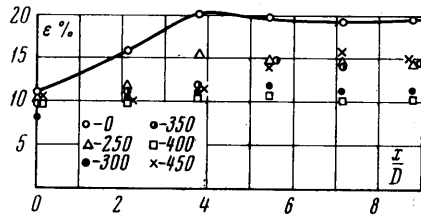
$$u_m / u_0 = \varphi_3(x/D)$$

меняется незначительно; акустические возмущения приводят лишь к некоторому смещению данной кривой вниз по оси ординат.

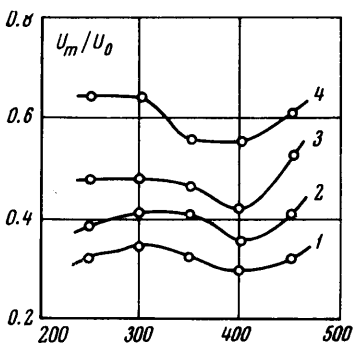
На фиг. 4 приведены экспериментальные результаты, показывающие изменение величины продольной интенсивности турбулентности по оси струи в функции безразмерных координат  $\epsilon = \varphi_4(x/D)$  на протяжении первых 9 кал. как при истечении турбулентной струи в акустическом поле, так и для невозмущенного течения.

Из рассмотрения этих зависимостей следует, что на протяжении первых 9 кал. вверх по потоку в диапазоне чисел Струхала  $S = 0.031 \div 0.054$  наложение акустических колебаний приводит к заметному уменьшению величины продольной интенсивности турбулентности, причем изменение величины  $\epsilon$  от частоты подаваемого сигнала здесь носит нелинейный характер. Начиная с расстояния в 3.75 кал. и далее

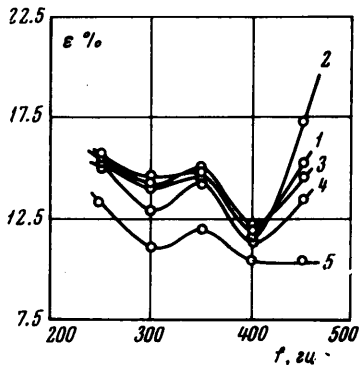
вверх по потоку, средний уровень продольной интенсивности турбулентности для невозмущенной струи, истекающей из конического диффузора, оставался примерно постоянным и равным  $\epsilon \approx 20 \div 22\%$ .



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6

Для возмущенной турбулентной струи средний уровень продольной интенсивности турбулентности уменьшился по сравнению с предыдущим режимом, причем самый низкий уровень  $\epsilon \approx 12.5\%$  был зарегистрирован на режиме с частотой  $f = 400$  гц.

Экспериментальные зависимости, показывающие изменение средней скорости и продольной интенсивности турбулентности на оси струи в функции от частоты  $u_m / u_0 = \varphi_5(f)$  и  $\varepsilon = \varphi_6(f)$  при различных фиксированных значениях  $x/D = \text{const}$ , представлены соответственно на фиг. 5 и 6, где кривые 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют значениям 8,75, 7,1, 5,4, 3,75, 2,08.

Функции  $\varphi_5$  и  $\varphi_6$  во всех исследованных сечениях имеют нелинейный характер.

Интересно, что с увеличением расстояния от среза форсунки экспериментальные кривые  $u_m / u_0 = \varphi_5(f)$  несколько сглаживаются. Эти экспериментальные данные находятся в хорошем качественном соответствии с результатами, приведенными в [1].

Следует, однако, отметить, что в [1] увеличение параметра  $u_m / u_0$  начинается не при  $f > 400$  гц, как в описанных выше экспериментах, а при несколько большей частоте, порядка  $f = 600$  гц. Возможно, что такое смещение минимального значения средней скорости по оси абсцисс происходит вследствие различных исследуемых турбулентных течений (в данной работе исследовалась турбулентная струя, истекающая из форсунки с коническим диффузором, а в [1] — турбулентная струя, истекающая из форсунки с конфузором).

При сопоставлении экспериментальных зависимостей, приведенных на фиг. 6, с опытными данными, показанными на фиг. 5, можно видеть, что в диапазоне чисел Струхала  $S = 0.031 \div 0.041$  акустическое воздействие приводит к увеличению (уменьшению) средней скорости и соответствующему уменьшению (увеличению) продольной интенсивности турбулентности. На частотах  $f = 400 \div 450$  гц эта закономерность нарушается: на частоте  $f = 400$  гц зарегистрированы минимальные значения как средней скорости  $u_m / u_0$ , так и величины  $\varepsilon$ ; изменение же частоты акустического сигнала до  $f = 450$  гц вызвало увеличение и величины средней скорости и величины  $\varepsilon$ . Этот эффект оказался несколько неожиданным и в будущем, вероятно, заслуживает более подробного экспериментального исследования.

На фиг. 7 в качестве примера показана мгновенная теневая фотография процесса истечения неизоэнтальной турбулентной струи в акустическом поле.

Таким образом, проведенные исследования показали, что в диапазоне чисел Струхала  $S = 0.031 \div 0.054$  воздействие низкочастотных акустических возмущений приводит

как к уменьшению дальности турбулентной струи, истекающей из конического диффузора, так и к уменьшению продольной интенсивности турбулентности, причем это уменьшение в функции от акустической частоты носит нелинейный характер. Эти обстоятельства следует иметь в виду при доводке газовых котлов и некоторых других агрегатов, в камерах сгорания которых могут иметь место неустойчивые режимы горения.

Автор благодарен А. С. Гиневскому, И. М. Копелеву и А. С. Моднову за обсуждение результатов данной работы.

Поступило 15 IX 1969

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Власов Е. В., Гиневский А. С. Акустическое воздействие на аэродинамические характеристики турбулентной струи. Изв. АН СССР, МЖГ, 1967, № 4.
2. Гиневский А. С. Теория турбулентных струй и следов. М., «Машиностроение», 1969.
3. Дорошенко В. Е., Фурлетов В. И. О воздействии звука на турбулентное пламя. Физика горения и взрыва, 1969, т. 5, № 1.
4. Грегуш П. Воздействие звука на процессы горения. Акуст. ж., 1962, т. 8, вып. 4.



Фиг. 7