

ИСТЕЧЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ
АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Н. Н. Иванов

(Москва)

Представлены результаты экспериментальных исследований локального воздействия акустических колебаний различной частоты и постоянной интенсивности на корневую часть неизотермической осесимметричной дозвуковой турбулентной струи, истекающей с различной скоростью из газоструйной форсунки в диапазоне чисел Струхала $S = 0.053 \div 3.84$. Получены данные, показывающие наличие неустойчивых режимов истечения дозвуковой турбулентной струи в акустическом поле; приведены экспериментальные зависимости относительного угла раскрытия турбулентной струи при течении в акустическом поле в функции от различных параметров.

В ряде работ, например [1-7], было обнаружено, что воздействие звуковых колебаний на пламена, ламинарные и турбулентные струи наряду с другими эффектами может приводить к потере устойчивости и к образованию вихрей, а также к некоторому изменению аэродинамических характеристик струйных течений. Экспериментально установлено [4], что между изменением интенсивности вихрей и величиной акустического возмущения существует нелинейная зависимость, определяемая скоростью истечения газа и отношением натуральных частот вихреобразования к частоте акустического возмущения.

Опытная установка и аппаратура. Исследования проводились на установке, схема которой и описание даны в работе [8].

На этой установке наряду с измерениями средней скорости и продольной интенсивности турбулентности проводилось исследование истечения неизотермической осесимметричной дозвуковой турбулентной струи в акустическом поле, а также определялась величина относительного угла раскрытия турбулентной струи в функции от различных параметров.

В данной работе в качестве рабочего тела, подаваемого в газоструйную форсунку с выходным диаметром $d_0 = 16$ мм, использовался подогретый воздух, отбираемый из сети низкого давления. Воздух подогревался электроподогревателем, температура газовой струи поднималась примерно до $T \approx 373^\circ$ К. Температура регистрировалась хромель-копелевой термопарой, ее показания записывались электронным потенциометром типа ЭПП-09.

Акустические возмущения различной частоты и постоянной интенсивности, подводимые к корневой части турбулентной струи, формировались в устье акустического устройства, описанного в работе [8].

Исследования, проведенные с помощью мерного зонда электротермоаэмометра типа ЭТА-5А, показали, что в выходном сечении устья акустического устройства распространяется плоская бегущая синусоидальная волна. Громкоговорители акустического устройства через согласующий трансформатор и усилитель низкой частоты типа УМ-50А подсоединялись к генератору чистого тона ЗГ-14, с помощью которого можно было плавно варьировать частоту и интенсивность акустических сигналов. Контроль за характеристиками входного и выходного сигналов акустического устройства производился катодными осциллографами. Визуализация картин истечения как невозмущенной турбулентной струи, так и струи при воздействии на ее корневую часть акустических возмущений осуществлялась оптическим методом с помощью серийного теневого прибора типа ИАБ-451, импульсного источника света, ртутной лампы ДРШ-250.

Время экспозиции при получении осредненных теневых фотографий, изображающих истечение турбулентной струи, было равно $\tau = 0.0125$ сек.

Импульсный источник света позволял получать картины теневых турбулентных течений с экспозицией $\tau \approx 10^{-6}$ сек. Число Рейнольдса по выходному диаметру форсунки и скорости истечения струи изменялось от $3.47 \cdot 10^3$ до $4.17 \cdot 10^4$.

Интенсивность звуковых колебаний во всех опытах $I = 100$ дБ = const. Безразмерный критерий Струхала S изменялся от 0.053 до 3.84, скорость на выходе из газоструйной форсунки u_0 , варьировалась от 5 до 60 м/сек, частота акустических сигналов f изменялась в диапазоне от 200 до 1200 сек⁻¹, длина волны акустических колебаний

соответственно

$$\lambda = a/f = 1.74 - 0.28 \text{ м}$$

Для построения опытных зависимостей использовалась величина относительного угла раскрытия струи α_m/α_0 , определяемая из обработки негативов на микрофотометре типа 5ПО—I. Здесь $2\alpha_m$ — угол раскрытия турбулентной струи при воздействии на ее корневую часть акустических возмущений, $2\alpha_0$ — угол раскрытия невозмущенной турбулентной струи.

Каждый режим истечения турбулентной струи, на корневую часть которой были наложены акустические возмущения регистрировался на фотоленке дважды: с экспозицией $\tau \approx 1 \cdot 10^{-6}$ сек и $\tau = 0.0125$ сек. По мгновенному теплеровскому негативу, спроецированному на экран микрофотометра, определялась длина участка перехода к турбулентности. Ввиду того что этот переход никогда не происходит в точке, то в данной работе, по предложению А. А. Павельева, за «точку перехода» условно принималась точка, соответствующая поджатию струи после первого крупного вихря и предшествующая существенному увеличению зоны смещения струи.

После этого мгновенный теплеровский негатив заменялся осредненным теплеровским негативом, на котором были четко зарегистрированы боковые границы истекающей турбулентной струи. На экранном изображении осредненного негатива откладывалась определенная ранее длина участка перехода к турбулентности. Таким образом получали начальное граничное сечение участка струи, угол раскрытия которого надо было определить. За конечное граничное сечение участка струи в данной работе принималась вершина потенциального ядра, расположенная от среза форсунки, как показали измерения с помощью термопары, на расстоянии $x/d_0 \approx 4.0$. В пределах этих границ определялся угол раскрытия турбулентной струи, после чего рассчитывался относительный угол раскрытия α_m/α_0 .

Результаты исследований. Обработка большого числа негативов с зарегистрированными режимами истечения турбулентной струи в акустическом поле показала, что зависимость между величиной относительного угла раскрытия струи α_m/α_0 и параметрами S , u_0 и f при фиксированной интенсивности акустических сигналов $I = 100 \text{ дб} = \text{const}$ является сложной и носит немонотонный характер.

Известно [9,10], что внешние границы свободно расширяющейся турбулентной струи имеют постоянный и весьма ограниченный угол раскрытия, равный $2\alpha_0 = 15^\circ - 25^\circ$ при обычной начальной турбулентности потока.

На фиг. 1, а представлена типичная теневая фотография истечения невозмущенной турбулентной струи из газоструйной форсунки с выходным диаметром $d_0 = 16 \text{ мм}$ при $u_0 = 25 \text{ м/сек}$, распространяющейся в покоящейся среде с температурой $T_0 = 293^\circ \text{ К}$. На основании экспериментальных данных начальный угол раскрытия невозмущенной турбулентной струи был выбран равным $2\alpha_0 = 15^\circ$. Обнаружено, что наложение акустических возмущений на корневую часть турбулентной струи при определенных сочетаниях параметров u_0 и f при $I = 100 \text{ дб} = \text{const}$ приводит к увеличению угла раскрытия $2\alpha_m$ по сравнению с величиной начального угла $2\alpha_0$ (эффект веерообразного расширения).

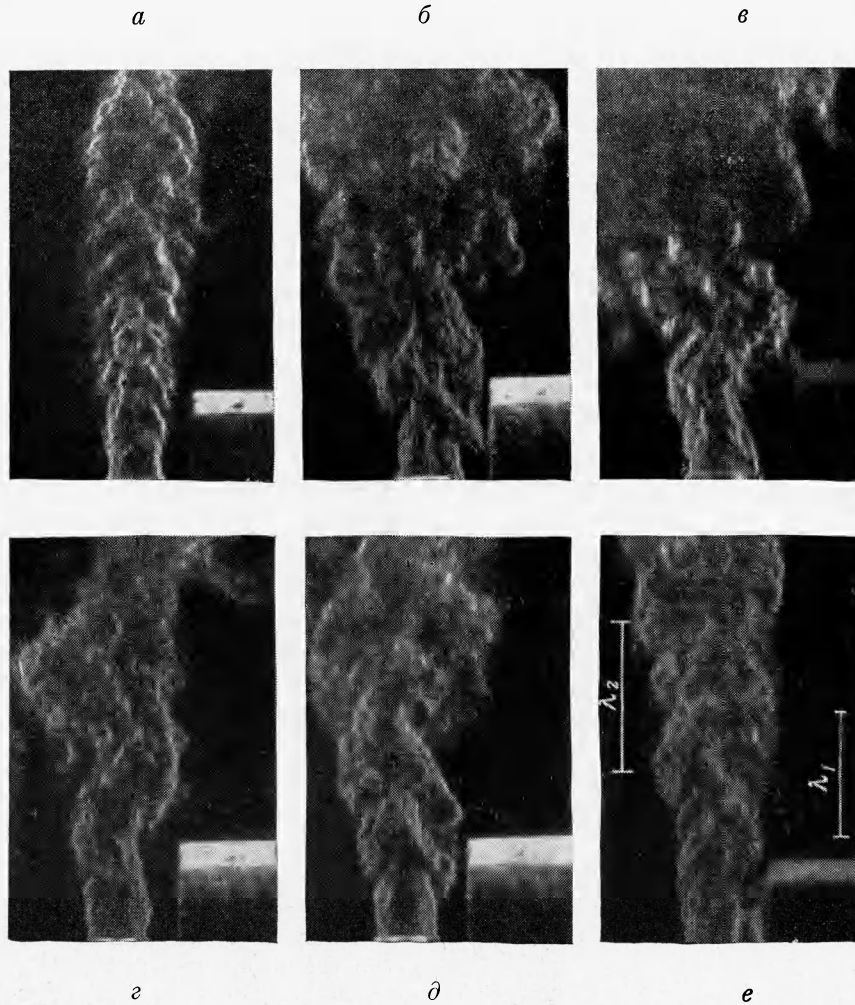
Реакцию неизотермической осесимметричной дозвуковой турбулентной струи на акустические возмущения можно объяснить, вероятно, следующим образом. Известно [1,2], что основание струи у насадка имеет большую склонность к разрывному течению и высокую степень неустойчивости. Если на эту часть струи воздействовать возмущениями соответствующей интенсивности и в соответствующий период времени, то первоначальное истечение нарушается и вниз по потоку уже не восстанавливается.

На фиг. 1, б — е приведены некоторые характерные теневые фотографии, иллюстрирующие истечение дозвуковой турбулентной струи в акустическом поле на различных режимах при $I = 100 \text{ дб} = \text{const}$.

Полученные экспериментальные данные показали, что при наличии акустического сигнала увеличение отношения угла раскрытия турбулентной струи к величине начального угла раскрытия невозмущенной струи может

колебаться, например, от значения $\alpha_m / \alpha_0 = 1.0$ на режиме $u_0 = 50 \text{ м/сек}$, $f = 850 \text{ сек}^{-1}$ до $\alpha_m / \alpha_0 = 2.75$ на режиме $u_0 = 40 \text{ м/сек}$, $f = 500 \text{ сек}^{-1}$ (фиг. 1, б) и более.

Из фиг. 1, в можно видеть, как на расстоянии примерно 3 калибров от среза газоструйной форсунки при скорости истечения $u_0 = 10 \text{ м/сек}$ и частоте акустического сигнала $f = 258 \text{ сек}^{-1}$ произошел полный развал турбулентной струи.

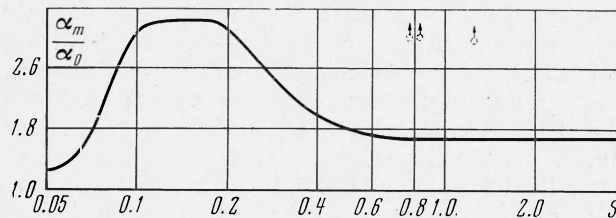


Фиг. 1

При съемках процесса истечения турбулентной струи удалось выявить режимы, когда наложение акустических возмущений на корневую часть турбулентной струи приводило к искривлению оси струи, причем это искривление происходило в плоскости, расположенной перпендикулярно оптической оси теневого прибора ИАБ-451. Иллюстрацией здесь может служить теневая фотография, представленная на фиг. 1, г, где показан процесс истечения турбулентной струи при $u_0 = 40 \text{ м/сек}$ и $f = 250 \text{ сек}$. Видно, как ось струи искривляется на расстоянии порядка $2.5 \div 3$ калибров от среза газоструйной форсунки, затем в пограничном слое формируется крупномасштабное возмущение, по внешнему виду напоминающее кольцевой вихрь, после чего струя распадается.

На фиг. 1, *d* показана теневая фотография, на которой удалось зафиксировать начальное зарождение крупномасштабных возмущений в пограничном слое. Полученные довольно четкие теневые фотографии с $\tau \approx 1 \cdot 10^{-6}$ сек позволяют считать, что акустическая частота образующихся в пограничном слое возмущений не превышала 10^6 сек $^{-1}$.

Наблюдались случаи, например, при $u_0 = 30$ м/сек, $f = 400$ сек $^{-1}$ (фиг. 1, *e*), когда вдоль наружных контуров пограничного слоя турбулентной струи распространялись возмущения, близкие к периодическим, причем гребни распространяющихся возмущений вдоль правого и левого контуров расположены приблизительно синфазно.



Фиг. 2

Измерения показали, что длина волны λ между гребнями возмущений, близких к периодическим, в поле фотокадра является переменной и изменяется вниз по потоку примерно от 1.5 до 2.5 калибров (за калибр принят выходной диаметр форсунки $d_0 = 16$ мм).

Исследование детального процесса зарождения и развития возмущений в пограничном слое вследствие воздействия пучностей (узлов) давления (скорости) плоской бегущей волны на корневую часть турбулентной струи представляет самостоятельный интерес и в данной работе не проводилось.

Результаты обработки относительного угла раскрытия дозвуковой турбулентной струи α_m / α_0 в функции безразмерного критерия Струхала $S = fd_0 / u_0$ при фиксированных значениях параметра u_0 показаны на фиг. 2. В ходе проведения экспериментальных исследований были обнаружены такие комбинации u_0 , f , I , при которых происходило частичное или полное разрушение турбулентной струи. Об угле раскрытия таких струй говорить нельзя. На фиг. 2 такие режимы истечения струй условно отмечены пунктирными кружочками со стрелками, направленными вверх.

Из представленных данных следует, что в диапазоне чисел Струхала $S = 0.053 \div 3.84$ наложение акустических возмущений на корневую часть турбулентной струи приводит в большинстве случаев к увеличению угла раскрытия турбулентной струи, причем зависимость $\alpha_m / \alpha_0 = \varphi_1(S)$ при $u_0 = \text{const}$ и $I = 100 = \text{const}$ является сложной и носит нелинейный характер.¹

Из фиг. 2, где сплошной линией показана верхняя граница экспериментальных данных, можно видеть, что наибольшие значения параметра α_m / α_0 группируются примерно в диапазоне чисел Струхала $S = 0.1 \div 0.2$, хотя общий разброс величин α_m / α_0 занимает несколько большую полосу значений $S = 0.075 \div 0.6$.

Полученные экспериментальные данные позволяют полагать, что в диапазоне чисел Струхала $S = 0.1 \div 0.2$ корневая часть неизотермической осесимметричной дозвуковой турбулентной струи наиболее чувствительна к воздействию акустических возмущений чистого тона.

Интересно, что обнаруженная область чисел Струхала $S = 0.1 \div 0.2$ довольно хорошо «вписывается» в диапазон, определяемый извест-

ным в теории вихревого звука соотношением

$$0.14 \leq fD/V_\infty \leq 0.27$$

где D — диаметр цилиндра, f — частота колебаний, V_∞ — скорость набегающего потока.

Это соотношение определяет область чисел Струхалия, характеризующуюся тем, что при свободном обтекании цилиндрических тел стационарным воздушным потоком с подветренной стороны цилиндра в широком диапазоне изменения чисел Рейнольдса наблюдается периодический срыв вихрей Бенара — Кармана. Эта же область чисел Струхалия охватывает и режим ветрового резонанса, при котором частота f срыва вихрей Бенара — Кармана, удовлетворяющая в случае цилиндра соотношению $S = 0.2$, совпадает с частотой свободных колебаний [11,12].

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показали, что неизотермическая осесимметричная дозвуковая турбулентная струя по отношению к локальным акустическим колебаниям обладает четко выраженным избирательным свойством, проявляющимся внешне в увеличении величины угла раскрытия струи (эффект веерообразного расширения). Экспериментально обнаружено, что истечение дозвуковой турбулентной струи, на корневую часть которой наложены акустические возмущения с интенсивностью $I = 100 \text{ дб} = \text{const}$, наиболее неустойчиво в диапазоне чисел Струхалия $S = 0.1 \div 0.2$. Изменение величины угла раскрытия α_m / α_0 в функции от числа Струхалия S при фиксированных значениях параметра u_0 является сложным и носит нелинейный характер.

Автор благодарен А. С. Гиневскому и В. С. Бурикову за обсуждение результатов данной работы, а также А. С. Моднову и Р. А. Архиповой за помощь в проведении и обработке экспериментов.

Поступила 16 VII 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Стретт Дж. В. Теория звука, т. 2. М., Гостехиздат, 1955.
2. Brown G. V. On vortex motion in gaseous jets and the origin of their sensitivity to sound. Proc. Soc., Phys., 1937, vol. 47, No. 261.
3. Batchelor G. K., Gill A. E. Analysis of the stability of axisymmetric jets. J. Fluid. Mech., 1962, vol. 14, pt 4.
4. Sato H. The stability and transition of a two — dimensional jet. J. Fluid Mech., 1960, vol. 7, pt 1.
5. Власов Е. В., Гиневский А. С. Акустическое воздействие на аэродинамические характеристики турбулентной струи. Изв. АН СССР, МЖГ, 1967, № 4.
6. Дорошенко В. Е., Фурлетов В. И. О воздействии звука на турбулентное пламя. Физика горения и взрыва, 1969, т. 5, № 1.
7. Фурлетов В. И. Воздействие звуковых колебаний на турбулентную струю газа. Изв. АН СССР, МЖГ, 1969, № 5.
8. Иванов Н. Н. Акустическое воздействие на корневую часть турбулентной струи. Изв. АН СССР, МЖГ, 1970, № 4.
9. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М., Физматгиз, 1960.
10. Кнорре Г. Ф., Арефьев К. М., Блох А. Г., Нахапетян Е. А., Палеев И. И., Штейнберг В. Б. Теория топочных процессов. М.—Л., «Энергия», 1966.
11. Блохинцев Д. И. Акустика неоднородной движущейся среды. М.—Л., Гостехиздат, 1946.
12. Блюмина Л. Х., Захаров Ю. Г. Колебания цилиндрических тел в воздушном потоке. В сб.: «Исследования по динамике сооружений», М., Госстройиздат, 1957.