

УДК 532.525.2:534.2

© 2002 г. Е.В. ВЛАСОВ, А.С. ГИНЕВСКИЙ, Р.К. КАРАВОСОВ,
Т.М. МАКАРЕНКО**ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХЧАСТОТНОГО
АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ
НА ОСНОВНОЙ ЧАСТОТЕ И ЕЕ СУБГАРМОНИКЕ**

Экспериментально исследована возможность усиления или ослабления смешения в турбулентной струе при ее возбуждении двухчастотным акустическим сигналом на основной частоте и субгармонике. Показано, что двухчастотное акустическое возбуждение струи оказывается эффективным только при низких частотах; при высоких частотах эффективность двухчастотного и одночастотного воздействия практически одинакова.

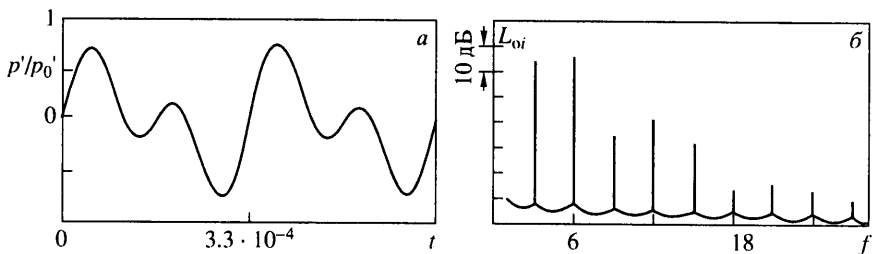
Как известно, акустическое возбуждение турбулентных струй позволяет в достаточно широких пределах управлять их аэродинамическими характеристиками [1]. При этом низкочастотное акустическое возбуждение, когда число Струхала $St_s = f_s d / u_0 = 0.2-0.6$, обеспечивает интенсификацию перемешивания, а высокочастотное возбуждение при $St_s = 2-6$ – ослабление перемешивания. Здесь u_0 – скорость на срезе сопла, d – диаметр сопла, f_s – частота возбуждения.

Стремление повысить эффективность акустического возбуждения турбулентных струй привело к попыткам воздействовать на струю несколькими акустическими сигналами разных частот. При этом изменяется спектральный состав акустических возмущений, воздействующих на слой смешения в выходном сечении сопла, что эквивалентно нарушению гармоничности акустического сигнала. Попытка двухчастотного возбуждения струи показала, что при этом удается несколько интенсифицировать смешение на низких частотах, при $St_s < 1.5$.

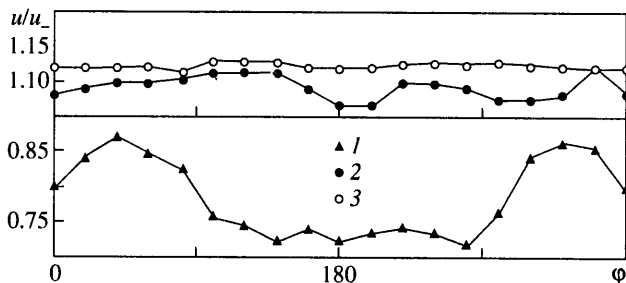
Наиболее перспективным представляется многочастотное (в простейшем случае – двухчастотное) возбуждение струи или слоя смешения на кратных частотах (на основной частоте и ее субгармонике) при фиксированных сдвигах фаз. Известно, что процесс спаривания вихрей в слое смешения является следствием так называемого субгармонического резонанса – нелинейного взаимодействия между волнами с частотой f и субгармонической частотой $f/2$. Следовательно, регулирование эффекта субгармонического резонанса может быть использовано для управления спариванием вихрей и, как следствие, турбулентным смешением [2–5] за счет выбора параметров управления: числа Струхала, отношения частот ($1/2$, $1/4$, $1/8$), амплитуд сигналов и сдвига их фаз.

Упомянутые исследования показали, что при двухчастотном возбуждении струи на низких частотах удается заметно интенсифицировать турбулентное смешение в струе по сравнению с одночастотным возбуждением при подборе подходящего сдвига фаз. Вопрос об эффективности двухчастотного акустического возбуждения при больших числах Струхала подробно не был изучен: было рассмотрено лишь двухчастотное акустическое возбуждение на участках струи протяженностью $x' = x/d = 0-0.8$ и $1-1.5$.

Для выяснения возможности усиления интенсификации смешения и ослабления перемешивания нами было проведено исследование двухчастотного акустического



Фиг. 1. Осциллограмма (а) и спектр (б) пульсаций давления p'/p'_0 при двухчастотном возбуждении $f_1 = 3$ кГц и $f_2 = 6$ кГц без фазового сдвига, L_{0i} – уровень звукового давления гармоник

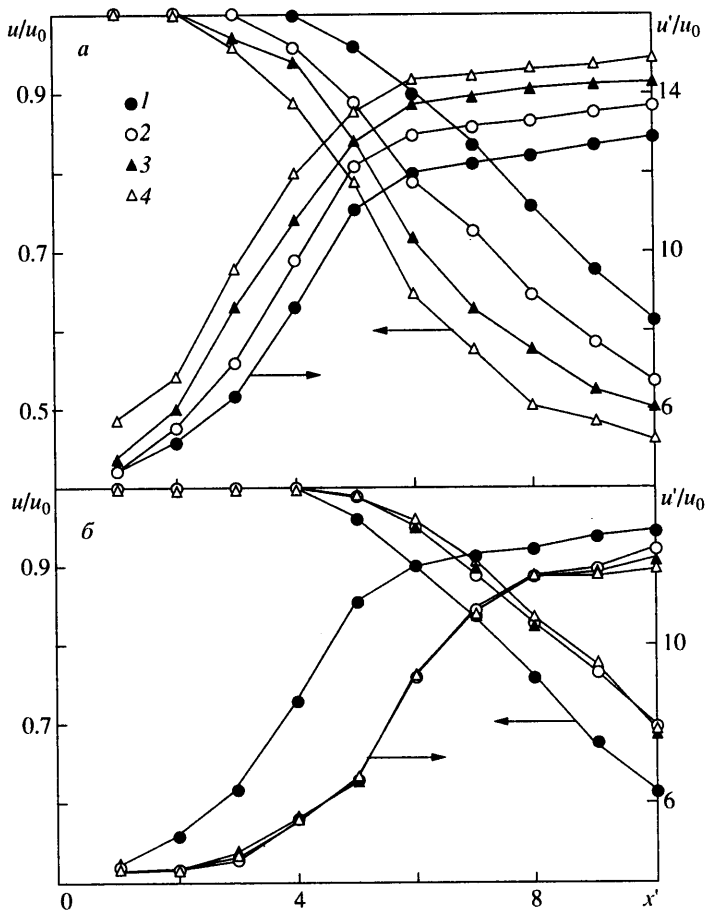


Фиг. 2. Зависимость отношения скоростей $u/u_∞$ в точке $x' = 8$ на оси струи от сдвига фаз при двухчастотном акустическом возбуждении для $L = 125$ дБ: 1 – $St_s = 0.4$ и 0.8 ; 2 – 3 и 6; 3 – 3.9 и 7.8

возбуждения струи на основной частоте и ее субгармонике при различном сдвиге фаз между ними. Некоторые результаты этого исследования приводятся ниже.

Эксперименты выполнены на установке с диаметром выходного сечения сопла $d = 0.02$ м при скорости истечения $u_0 = 20$ м/с, что соответствует числу Рейнольдса $Re = u_0 d / \nu = 2.8 \cdot 10^4$. Начальная турбулентность в ядре потока на срезе сопла составляла $\epsilon_0 = 0.25\%$. Параметры пограничного слоя в выходном сечении сопла: $\delta_0^* = 0.23$ мм, $\theta_0 = 0.11$ мм; формпараметр $H = \delta_0^* / \theta_0 = 2.09$, так что пограничный слой был близок к ламинарному. При проведении исследований сигнал с генератора чистого тона подавался на два канала. В первом канале имелся удвоитель частоты, во втором – фазовращатель, позволяющий плавно изменять фазу сигнала в диапазоне $\phi = 0-360^\circ$. После этого сигнал с обоих каналов поступал на сумматор, а затем на динамический громкоговоритель, с помощью которого осуществлялось поперечное акустическое возбуждение струи. Уровни звукового давления вблизи выходной кромки сопла при одночастотном и двухчастотном возбуждении были одинаковыми и равнялись $L = 125$ дБ; при этом уровни звукового давления на основной частоте и ее субгармонике составляли 122 дБ. Для измерения средних и пульсационных скоростей использовался комплект термоанемометрической аппаратуры фирмы Disa. Кроме того, измерения средней скорости проводились пневмометрическим методом при помощи трубки Пито.

На фиг. 1 представлены измеренные в отсутствие струи осциллограмма (а) и спектр (б) пульсаций давления вблизи кромки сопла при $f_1 = 3$ кГц и $f_2 = 6$ кГц при нулевом сдвиге фаз. Из приведенного спектра видно, что интенсивность звукового



Фиг. 3. Изменения средней скорости u/u_0 и среднеквадратичных значений пульсаций скорости u'/u_0 вдоль оси струи для невозбужденной струи (1), одночастотном возбуждении на частоте субгармоники (2) и двухчастотном возбуждении при сдвиге фаз $\varphi = 0$ (3) и 145° (4): а - $St_s = 0.4$ и 0.8 ; б - 3.9 и 7.8

давления на двух частотах примерно на 25 дБ превышает интенсивность их гармоник, поэтому возбуждение можно полагать двухчастотным. Аналогичные осциллограммы были получены и для других частот и сдвигов фаз. Как показали измерения, сдвиг фаз не влияет на вид спектра.

О влиянии сдвига фаз при акустическом возбуждении струи можно судить по фиг. 2, где представлены отношения средних скоростей при наличии и отсутствии акустического возбуждения в точке на оси струи $x' = 8$. Отсюда следует, что сдвиг фаз является существенным параметром только при низких частотах возбуждения ($St_s = 0.4$ и 0.8). При двухчастотном высокочастотном акустическом воздействии на струю ($St_s = 3$ и 6 ; $St_s = 3.9$ и 7.8) изменение сдвига фаз не оказывает заметного влияния на эффект возбуждения.

На фиг. 3 представлены изменения вдоль оси струи средней скорости u/u_0 и продольных пульсаций скорости u'/u_0 без акустического воздействия, при одночастотном возбуждении на частоте субгармоники, а также при двухчастотном возбуждении со сдвигом фаз $\varphi = 0$ и 145° для низкочастотного ($St_s = 0.4$ и 0.8) и высокочастотного ($St_s = 3.9$ и 7.8) воздействия. Эти результаты наглядно демонстрируют эффективность

двухчастотного возбуждения струи по сравнению с одночастотным на низких частотах и, наоборот, неэффективность на высоких частотах.

Заключение. Установлено, что двухчастотное акустическое возбуждение турбулентной струи на основной частоте и ее субгармонике оказывается эффективным по сравнению с одночастотным возбуждением только на низких частотах; при высоких частотах двухчастотное возбуждение струи не имеет каких-либо преимуществ перед одночастотным возбуждением.

Работа выполнена по гранту РФФИ (№ 00-01-00152).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гиневский А.С., Власов Е.В., Каравосов Р.К.* Акустическое управление турбулентными струями. М.: Физматлит, 2001.
2. *Ho С.-М., Huerre P.* Perturbed free shear layers // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1984. V. 16. P. 365–424.
3. *Husain H.S., Hussain F.* Subharmonic resonance in a shear layers // *Advances in Turbulence 2. Proc. 2nd. Eur. Turbulence Conf. Berlin, 1988.* Berlin: Springer, 1989. P. 96–101.
4. *Paschereit C.O., Wygnanski I., Fiedler H.E.* Experimental investigation of subharmonic resonance in an axisymmetric jet // *J. Fluid Mech.* 1995. V. 283. P. 365–407.
5. *Raman G., Rice E.J.* Axisymmetric jet forced by fundamental and subharmonic tones // *AIAA Journal.* 1991. V. 29. № 7. P. 1114–1122.

Москва

Поступила в редакцию
27.IV.2001