

01;03

Подавление крупномасштабных структур в газонасыщенной импактной струе

© С.В. Алексеенко, Д.М. Маркович, В.И. Семенов

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск

Поступило в Редакцию 2 июня 1998 г.

На основе измерений пульсационной составляющей поверхностного трения при натекании затопленной осесимметричной струи жидкости на преграду зафиксирован эффект подавления крупномасштабных вихревых образований в условиях газонасыщения. Для однофазной и газонасыщенной импактных струй определены условия резонансного усиления когерентных структур и подавления широкополосной турбулентности. Проведен анализ развития различных пульсационных компонент в градиентной области импактной струи.

В газожидкостных пузырьковых течениях пузыри, как правило, не являются просто трассерами, движущимися с потоком. Напротив, неравномерность поля скорости может приводить как к дисперсии пузырей, так и к изменению уровня флуктуаций в непрерывной фазе. Часто воздействие может быть обоюдным, когда на траекторию дисперсной фазы влияет локальная нестационарная турбулентность непрерывной фазы (турбулентная дисперсия), а положение пузырей и след за ними влияет на турбулентность в жидкости (модуляция турбулентности).

Существенное изменение турбулентных характеристик течений при наличии второй фазы наблюдалось в ряде экспериментальных исследований. В обзоре [1] сделан вывод, что в большинстве случаев малые частицы уменьшают интенсивность турбулентности в потоке, в то время как крупные усиливают ее. При этом основными механизмами, определяющими воздействие на турбулентную структуру, являются: диссипация турбулентной кинетической энергии на частицах; увеличение эффективной вязкости из-за присутствия частиц; генерация вихрей или образование следа за частицей; увлечение жидкости частицей (эффект присоединенной массы); увеличение градиентов скорости между двумя частицами; деформация и колебание границ дисперсной фазы. Те или иные механизмы из вышеперечисленных преобладают в зависимости

от концентрации дисперсной фазы, размеров частиц, а также характера течения.

Наименее изученными в отношении влияния второй фазы на турбулентность остаются свободные сдвиговые течения, и, в частности, турбулентные струи. Основной особенностью струйных течений является наличие в слое смешения крупномасштабных вихревых образований (когерентных структур). Известно, что периодическое воздействие на такого типа течение с частотами из области наибольшей восприимчивости струи позволяет эффективно управлять крупномасштабной структурой потока вплоть до резонансного усиления когерентных структур и воздействия на широкополосную турбулентность [2,3]. Характеристики пузырьковых турбулентных струй исследовались в ряде работ [4–6], однако взаимное влияние газовой фазы и крупномасштабной структуры струйного слоя смешения практически не рассматривалось.

Данная работа посвящена экспериментальному изучению развития неустойчивостей в сдвиговом слое осесимметричной импактной струи в присутствии мелкодисперсной газовой фазы. Основные результаты по изучению турбулентной структуры потока получены с помощью электродиффузионного метода измерения касательного напряжения на стенке.

Экспериментальная установка представляла собой замкнутый гидродинамический контур, состоящий из рабочего участка, бака, системы соединительных труб и измерительной аппаратуры. Рабочим участком являлся оргстеклянный канал прямоугольного сечения, имеющий размеры $162 \times 86 \times 2000$ мм. Сопловой блок вставлялся в канал горизонтально через боковую стенку. Используемое сопло имело диаметр 10 мм и бирадиальную образующую, при этом отношение выходного диаметра сопла к диаметру предвключенной камеры составляло 1:4. Профиль скорости на срезе сопла был близок к равномерному, а толщина потери импульса при $x/d = 0.15$ составляла $\theta \approx 0.1$ мм. Измеренная степень естественной турбулентности на этом расстоянии равнялась $u'/U_0 = \sqrt{u'^2}/U_0 = 0.005 \div 0.008$ на оси сопла и $0.05 \div 0.06$ в центре слоя смешения.

Для измерения локальных значений скорости и касательного напряжения на стенке был использован электродиффузионный метод. Детали метода приведены в работе авторов [7]. Датчики касательного напряжения располагались на передвижной стенке канала, на которую натекала струя. Точность перемещения измерительной стенки составляла 0.1 мм.

Возбуждение струи производилось при помощи стандартного электродинамического вибратора ESE 201 посредством сильфона, соединенного с успокоительной камерой. Начальные синусоидальные колебания имели нулевую моду и их среднеквадратичное значение изменялось от $\tilde{u}/U_0 = \sqrt{\overline{\tilde{u}^2}}/U_0 = 0.0001$ до 0.001 в зависимости от условий эксперимента. Частота возбуждения f_f характеризовалась числом Струхала $Sh_d = f_f \cdot d/U_0$. Эксперименты показали, что наложенные колебания малой амплитуды практически не оказывают влияния на характеристики течения вблизи кромки сопла.

Пузырьки воздуха подавались в распределительный блок при помощи компрессора через мелкопористую пластину. Объемный расход воздуха изменялся в процессе эксперимента от 0 до 164 л/ч. Это соответствует объемному газосодержанию $\alpha = 0-12.1\%$ для расхода жидкости $Q_l = 0.33$ л/ч. Средний диаметр пузырей составлял $200 \mu\text{m}$, причем разброс в их размерах был невелик, поэтому газовая фаза рассматривалась в эксперименте как монодисперсная.

Эксперименты были проведены для двух чисел Рейнольдса: $Re = 25200$ 40400 . Здесь $Re = U_0 \cdot d/\nu$, U_0 — средняя скорость жидкости на срезе сопла, d — диаметр сопла, ν — коэффициент кинематической вязкости используемого раствора, равный $1.04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Расстояние между кромкой сопла и плоскостью в экспериментах не изменялось и составляло 20 mm ($H/d = 2$).

Основная информация о турбулентной структуре потока в пристенной области была получена при измерении осредненных и пульсационных величин касательного напряжения на обтекаемой преграде, а также спектральных характеристик.

Известно [3,8], что если возбуждение слоя смешения производится на частоте, лежащей в окрестности наиболее вероятной частоты f_{mp} для данных условий, то именно на этой частоте будут резонансно усиливаться когерентные структуры. В данном случае ($Re = 40400$) диапазон чувствительности лежит в интервале $190 < f_f < 350 \text{ Hz}$ ($0.45 < Sh_d < 0.83$), где f_f — частота возбуждения. Возбуждение на наиболее вероятной частоте $f_f = 250 \text{ Hz}$ ($Sh_d = 0.6$) ведет к снижению сопротивления трения в общей сложности более чем на 30%. Уровень пульсаций возрастает почти в два раза — преимущественно за счет прироста когерентной составляющей. Так, в зоне интенсивного проникновения структур в пристенную область спектральная плотность

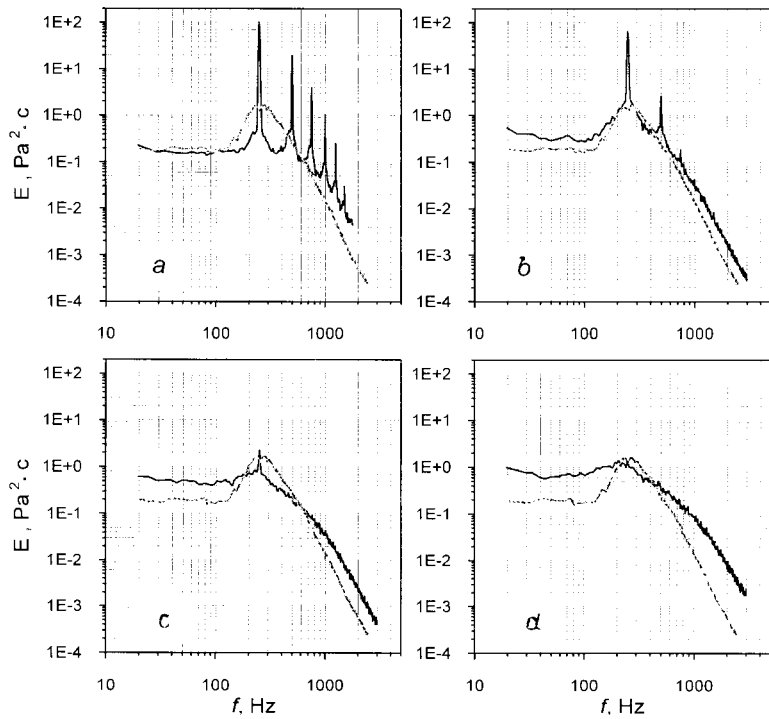


Рис. 1. Спектральная плотность пульсаций касательного напряжения на стенке. Серые линии — невозбужденная однофазная струя. $H/d = 2$, $f_f = 250$ Hz ($Sh_d = 0.6$), $Re = 40400$, $r/d = 1$, 1. *a* — $\alpha = 0$; *b* — 3.4%; *c* — 5.9%; *d* — 10.1%.

пульсаций на резонансной частоте возрастает на два порядка по сравнению с невозбужденной струей (рис. 1, *a*). Распределения интегральных характеристик струи становятся подобными распределениям для малых чисел Рейнольдса [9], а из спектральных зависимостей (рис. 1, *a*) можно сделать заключение, что существенная часть стохастических пульсаций трения в области средних частот подавляется. Таким образом, можно говорить об эффекте квазиламинаризации потока при резонансном усилении крупномасштабных вихревых структур. При возбуждении струи

на частотах, лежащих выше диапазона наибольшей чувствительности, можно наблюдать лишь слабое усиление основной гармоники, не меняющее основные характеристики потока. Возбуждение на низких частотах приводит к усилению кратных гармоник — $2f_f$, $3f_f$ и т.д., если они попадают в диапазон наибольшей чувствительности. Амплитуда наложенных колебаний в исследованном диапазоне практически не оказывает влияния на характеристики потока.

Для двухфазной струи измерения проводились при высоких числах Рейнольдса, $Re = 25200$ и 40400 , с целью исключения эффектов, связанных со всплытием пузырей за счет архимедовых сил. Для больших Re и малых размеров пузырей эти эффекты незначительны. Так, при $Re = 40400$, различие между измеренными величинами касательного напряжения на стенке в симметричных относительно горизонтальной оси потока точках (верхней и нижней) составляло не более 5% для всех исследованных газосодержаний. Газонасыщение струи приводит к существенному возрастанию среднего трения, однако характер течения остается неизменным вплоть до значений газосодержания $\alpha = 8-9\%$. Величина среднеквадратичных пульсаций трения, отнесенная к максимуму трения для каждого газосодержания, монотонно падает во всей области течения, за исключением окрестности критической точки, где абсолютный уровень пульсаций растет. При $\alpha > 8-9\%$ структура потока претерпевает изменения, пристенные характеристики теряют ярко выраженный струйный характер, максимум пульсаций смещается ближе к критической точке. На рис. 1, *b-d* приведено сравнение распределений спектральной плотности пульсаций трения в точке на преграде, куда крупномасштабные вихревые структуры проникают из струйного слоя смещения с наибольшей интенсивностью ($r/d = 1.1$). Отчетливо наблюдается подавление когерентной составляющей пульсаций с увеличением газосодержания. Для существенно больших газосодержаний когерентная составляющая в спектрах практически исчезает для всех r/d .

Анализ эволюции когерентной и стохастической составляющих пульсаций по радиальной координате показывает (рис. 2), что когерентная составляющая пульсаций существенна только в определенном диапазоне радиальных координат ($0.5 < r/d < 3$) и с увеличением газосодержания она падает до нуля при $\alpha > 8\%$. На рис. 2 $\tau'(total)/\tau$; $\tau'(coher)/\tau$; $\tau'(random)/\tau$ — соответственно среднеквадратичные значения полной, когерентной и стохастической составляющих пульсаций касательного

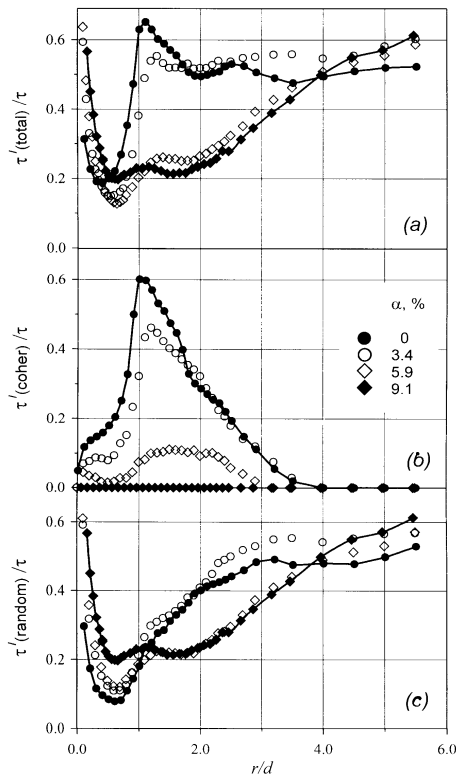


Рис. 2. Полная (a), когерентная (b) и стохастическая (c) составляющие пульсаций поверхностного трения в зависимости от газосодержания. $H/d = 2$, $f_f = 250$ Hz ($Sh_d = 0.6$), $Re = 40400$.

напряжения, отнесенные к осредненному значению трения в данной точке. В области $r/d > 3$ основной вклад в турбулентную энергию вносят стохастические пульсации. Уровень стохастических пульсаций, отнесенных к локальному значению среднего трения в этой зоне, слабо меняется с увеличением газосодержания (рис. 2, c). Этот вывод объясняется уменьшением локальной концентрации пузырей при удалении от критической точки.

Таким образом, в данной работе зафиксирован эффект подавления стохастических турбулентных пульсаций при резонансном усилении крупномасштабных организованных структур в возбуждаемой импактной струе, а также эффект подавления этих структур в условиях газонасыщения струи мелкодисперсной газовой фазой. Полученные результаты могут являться основой для разработки методов управления тепломассопереносом в ограниченных двухфазных струйных потоках.

Работа выполнена в рамках проекта 274 по направлению "Фундаментальные исследования в области физики и высоких технологий" Федеральной целевой программы "Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997–2000 годы".

Список литературы

- [1] Gore R.A., Crowe C.T. // *Int. J. Multiphase Flow*. 1989. V. 15. P. 279–285.
- [2] Crow S.C., Champagne F.H. // *J. Fluid Mech.* 1971. V. 48. P. 547–591.
- [3] Ho C.M., Huang L.S. // *J. Fluid Mech.* 1982. V. 119. P. 443–473.
- [4] Goldschmidt V.W., Householder M.K., Chuang S.C. // *Progress in Heat and Mass Transfer*. Pergamon, Oxford. 1971. V. 6. P. 487–508.
- [5] Milgram J.H. // *J. Fluid Mech.* 1983. V. 85. P. 345–376.
- [6] Sun T.-Y., Faeth G.M. // *Int. J. Multiphase Flow*. 1986. V. 12. P. 99–126.
- [7] Alekseenko S.V., Markovich D.M. // *J. Appl. Electrochemistry*. 1994. V. 24. P. 626–631.
- [8] Alekseenko S.V., Markovich D.M., Semenov V.I. // *Proc. of the 4th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mech. and Thermodynamics*, Brussels. 1997. V. 3. P. 1815–1822.
- [9] Алексеенко С.В., Кулебякин В.В., Маркович Д.М. и др. // *Инж.-физ. журнал*. 1996. Т. 69. С. 615–624.