

УДК 535.8

Влияние дисперсной фазы на турбулентную структуру осесимметричной затопленной импактной струи

А.П. Белоусов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: abelousov@gorodok.net

Проведено экспериментальное исследование турбулентных характеристик газонасыщенной затопленной осесимметричной импактной струи методом PIV/LIF. Предложен новый метод анализа динамики вихревых образований, позволяющий получать спектральные характеристики турбулентного движения при низкой частоте выборки. Проведено сравнение полученных данных с теоретическими моделями.

Ключевые слова: Турбулентные течения, газожидкостный поток, метод PIV/LIF, импактная струя, спектр турбулентных пульсаций.

Изучение влияния дисперсной фазы на турбулентные характеристики газожидкостных потоков — важная задача, поскольку водно-пузырьковые смеси используются во многих технологических процессах. В настоящее время получено большое количество экспериментальной информации, однако многие результаты противоречивы, что мешает построению корректных физических моделей. Например, в работах [1–4], где использовались относительно большие пузырьки ~ 0,5 см, показано, что степень в спектре Колмогорова – 5/3 плавно замещается на – 8/3, что говорит о мгновенной диссипации турбулентной энергии в области следа за всплывающими в жидкости пузырьками. В противоположность этому в [5–7] классический спектр –5/3 остается справедливым даже при 25-процентном содержании газа. Для объяснения этих расхождений авторы [8] вводят “пузырьковый” параметр

$$b = \frac{\alpha U_R^2}{2u_0'^2}, \quad (1)$$

где α — объемное содержание газовой фазы, U_R — скорость всплытия пузырька в покоящейся жидкости, u_0' — пульсационная компонента скорости в отсутствие пузырьков. Считается, что если $b > 1$ — основное влияние на поток оказывают всплывающие пузырьки, и наклон спектральной кривой будет подчиняться закону –8/3. В обратном случае $b < 1$ пузырьки являются трассерами и могут лишь в небольшой степени изменять турбулентные характеристики относительно

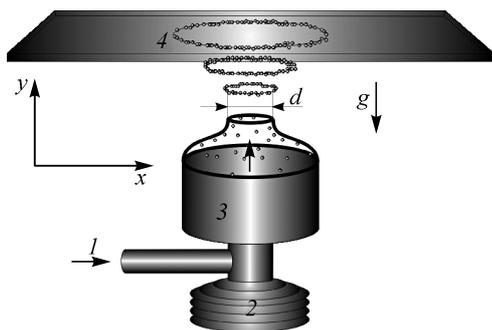


Рис. 1. Осесимметричная затопленная импактная струя.

1 — газожидкостная смесь, 2 — электродинамический вибратор, 3 — сопло, 4 — импактная поверхность.

закона $-5/3$. Проведенное сравнение с экспериментальными данными других авторов показало, что этот параметр в большинстве случаев оказывается хорошим качественным критерием влияния пузырьков газа на турбулентность.

Цель настоящей работы — экспериментальное изучение влияния пузырьков газа на турбулентные параметры потока методом PIV/LIF (Particle Image Velocimetry/Light Induced Fluorescent). В качестве модели использовалась осесимметричная затопленная импактная струя.

Изучаемый поток изображен на рис. 1. Газожидкостная смесь 1 циркулирует в замкнутом гидродинамическом контуре, который состоит из рабочего участка, насоса, резервуара, системы соединительных труб и датчиков для контроля параметров эксперимента. Рабочий участок — прямоугольный бак из органического стекла $200 \times 200 \times 300$ мм³. Сопло 3 ($d = 15$ мм) вводится в бак вертикально через дно так, чтобы газожидкостный поток натекал нормально на импактную поверхность 4. Для генерации крупномасштабных вихревых структур применяется стандартный электродинамический вибратор 2 (ESE – 201), соединенный с успокоительной камерой через сильфон.

Для исследования потока используется метод PIV/LIF, схема которого приведена на рис. 2. Излучение импульсного лазера Nd:YAG (532 нм, вторая гармоника) 1 анаморфотной оптической системой 2 преобразуется в световой нож 3, который выделяет в потоке исследуемое сечение. Лазер дает две последовательные вспышки. Вторичное излучение трассеров и пузырьков проходит через световые фильтры 5 и 6. Поскольку в качестве трассеров используются флуоресцентные частицы, свет, рассеянный ими, имеет более низкую частоту по сравнению с излучением лазера. Таким образом, камера 7 фиксирует изображение пузырьков 9, а камера 8 — изображение трассеров 10. Полученные данные анализируются комплексом 11.

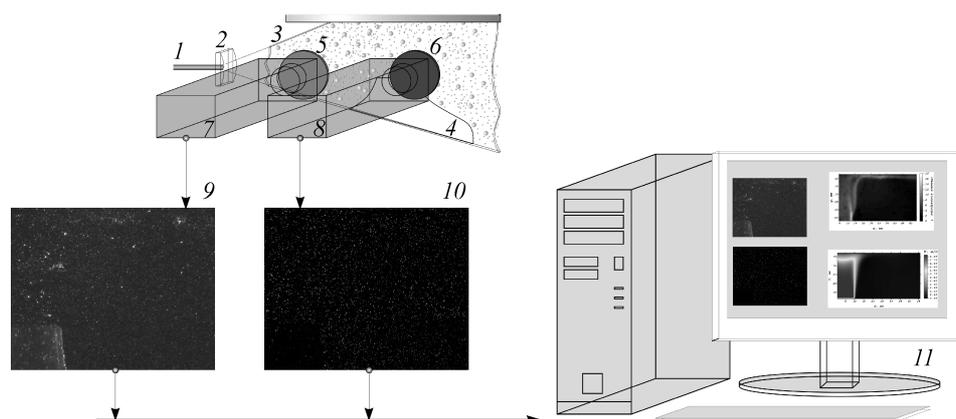


Рис. 2. Схема измерительной системы.

1 — лазерный пучок, 2 — анаморфотный преобразователь, 3 — лазерный нож, 4 — сопло, 5, 6 — светофильтры с максимумом пропускания в зеленой и красной областях спектра соответственно, 7, 8 — CCD-камеры, 9 — изображение пузырьков, 10 — изображение трассеров, 11 — система обработки.

Большинство коммерческих PIV систем обладают плохим временным разрешением. Время между последовательными измерениями составляет порядка одной секунды, что затрудняет определение спектральных свойств пульсационной компоненты скорости. В литературе описаны единичные системы, позволяющие проводить съемку с высокой частотой (до 35 тыс. кадров в секунду), однако такие установки обладают невысоким пространственным разрешением и требовательны к системам сбора и хранения информации.

В некоторых случаях можно заменить временное Фурье преобразование на пространственное, но, к сожалению, на практике такие ситуации встречаются редко. Таким образом, возникает необходимость поиска нового универсального метода, который бы не зависел от частоты сбора информации и геометрических особенностей потока.

Согласно современным представлениям турбулентный поток обладает сложной структурой [9], содержащей разнообразные вихревые образования, отличающиеся как по форме, так и по размерам. Говоря об их размерах, подразумевают некоторые средние размеры и при этом различают мелкомасштабные и крупномасштабные вихри.

Пульсации скорости, которые фиксируются локальными зондами (термоанемометр, оптоволоконно, ЛДА), вызваны движением вихревых структур различных масштабов. Определяя скорости и размеры этих структур, можно предсказать пульсационные характеристики потока. Информация о вихревых структурах может быть получена из мгновенных полей скорости, рассчитанных системой PIV. В настоящее время предложено большое количество методов, позволяющих уверенно детектировать вихри как в простых случаях, когда они легко обнаружимы по картине мгновенной завихренности, так и в сложных, где вихревое движение вуалируется присутствием сильного поперечного градиента скорости (слой смешения, пограничный слой). Таким образом, система PIV является эффективным средством изучения внутренней структуры турбулентности.

В работе для определения параметров вихревых структур (размер, положение центра масс) анализировалось двумерное поле скорости $\vec{V}(x_i, y_i)$, рассчитываемое системой PIV, вычислялось поле завихренности $I(x_i, y_i)$, находились области локализации вихрей $I > I_{\text{порог}}$ ($I_{\text{порог}} = 0,2 \cdot I_{\text{max}}$).

Кинетическая энергия, заключенная в сечении вихревого образования толщиной $l = x_i - x_{i-1} = y_i - y_{i-1}$, может быть рассчитана по формуле

$$E = \frac{1}{8} \rho l^3 \sum_i I^2(x_i, y_i) \left[(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 \right], \quad (2)$$

где ρ — плотность жидкости, x_0, y_0 — координаты центра масс вихревой структуры. Суммирование ведется по области M , занимаемой вихрем (рис. 3).

Эксперимент проводился при числе Рейнольдса 12500. Здесь $Re = U_0 d / \nu$, ν — коэффициент кинематической вязкости, U_0 — среднерасходная скорость потока. Расстояние H между срезом сопла и импактной поверхностью равно 30 мм ($H/d = 2$). Средний размер пузырьков газа — 400 мкм,

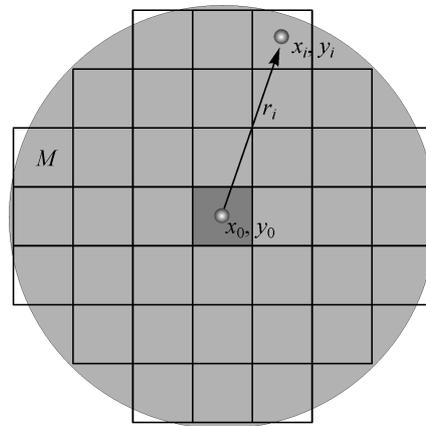


Рис. 3. Вычисление кинетической энергии, заключенной в сечении вихревого образования толщиной l .

объемное содержание на срезе сопла $\sim 4,5\%$. Частота возбуждения выбиралась так, чтобы соответствовать числу Струхала 0,5 (оптимальная величина для формирования крупномасштабных вихревых структур), и синхронизировалась с частотой съемки, при этом камера фиксировала картину, состоящую из ряда локализованных в пространстве когерентных структур. Это позволяло проводить статистический анализ и изучать воздействие дисперсной фазы на вихревые структуры различных масштабов.

Проведем оценку “пузырькового” параметра b для нашего эксперимента. Скорость всплытия пузырьков газа U_R в покоящейся жидкости можно оценить по формуле

$$U_R = \frac{2gr_b^2}{9\nu_L},$$

где g — ускорение свободного падения, r_b — радиус пузырька, ν_L — кинематическая вязкость жидкости. Подставляя данные, для нашего эксперимента получаем скорость ~ 9 см/с. Согласно формуле (1) “пузырьковый” параметр составляет величину $\sim 0,02$, таким образом, следует ожидать, что присутствие газовой фазы не будет существенным образом искажать степенную зависимость $-5/3$.

К числу основных процессов, вызывающих образование, развитие и исчезновение вихрей, относится конвекция (адвекция), генерация (порождение), диффузия и, в последней стадии вырождения, диссипация (переход в тепло) [9]. В процессе турбулентной диффузии происходит распад крупных вихрей на более мелкие, в которых инерционные явления еще преобладают над вязкими. Находящиеся в “инерционном интервале масштабов” вихри участвуют в конвекции и турбулентной диффузии, но они в пренебрежимо малой степени подвержены действию вязкости. Общий процесс дальнейшей деградации вихрей приводит, в конечном счете, к их превращению в мелкие вихри, на которые уже действует вязкая диффузия с последующей вязкой диссипацией кинетической энергии в тепло. Такая каскадная схема, конечно, несколько грубо передает действительные процессы, происходящие в турбулентных потоках, но правильно описывает общие тенденции. Вихри малого масштаба, быстро угасая, не способны сколько-нибудь долго хранить и переносить вниз по потоку информацию о возмущениях, возникших в выше расположенных областях потока.

Кинетическая энергия крупных вихрей имеет порядок удельной энергии местного осредненного движения. Затем она снижается с уменьшением масштаба и становится пренебрежимо малой у мелких вихрей.

В настоящей работе проведен статистический анализ размеров вихревых образований, в зависимости от типа потока (однофазный, двухфазный) и местопо-

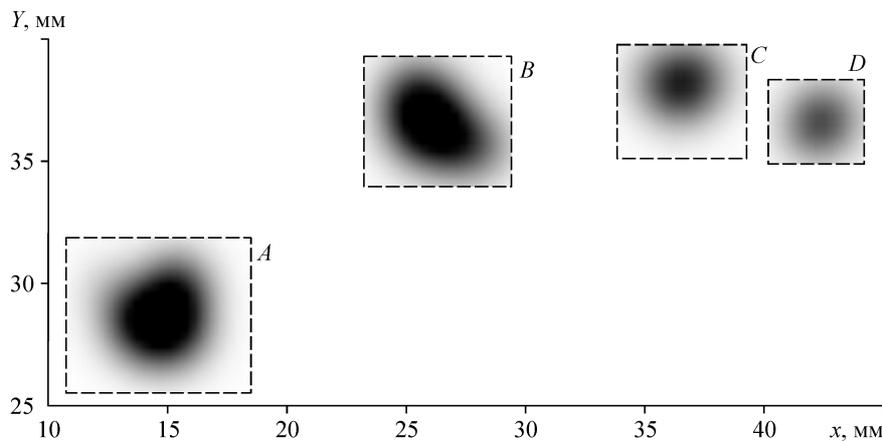


Рис. 4. Области выборки информации.

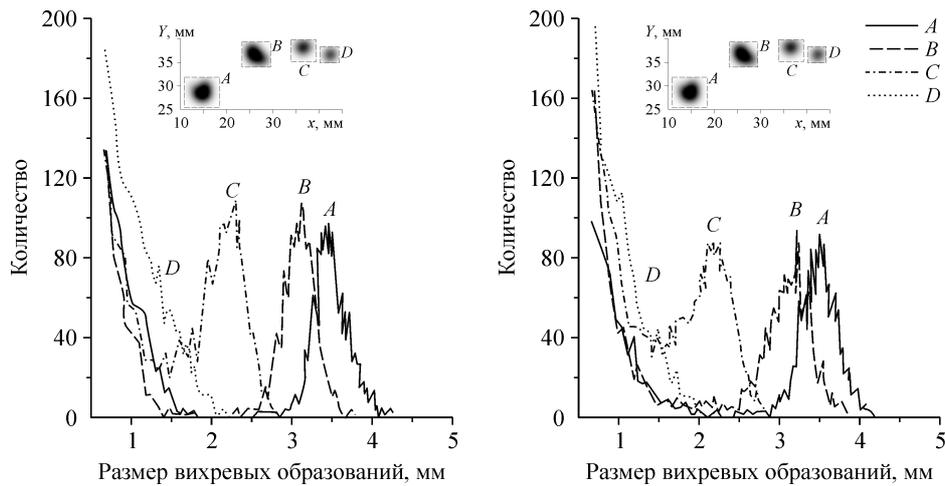


Рис. 5. Анализ динамики вихревых образований в однофазном (а) и двухфазном (б) потоках.

ложения вихревой структуры. Анализировалась стационарная картина, состоящая из ряда когерентных структур. Статистический ряд содержал ~ 2000 полей мгновенной скорости. На рис. 4. приведены области выборки информации. Слева расположена ось симметрии струи, сверху — импактная поверхность. Области А, В, С, D соответствуют когерентной структуре на разных этапах ее развития. А — полностью сформировавшаяся структура, В, С, D — ее изменение вниз по потоку. На рис. 5 представлены результаты эксперимента.

Как видно на рисунке, распределение вихревых образований по размерам в слое смещения имеет два максимума. Правый соответствует крупномасштабным когерентным структурам, левый — вихрям меньших масштабов. Вниз по потоку вихревые образования уменьшаются в размерах и в области D полностью исчезают. Присутствие газовой фазы ($\sim 4,5\%$) подавляет крупномасштабные структуры, что выражается в увеличении разброса вихрей по размерам (см. рис. 5, б) и ускоряет их разрушение.

Рассмотрим суммарное распределение вихревых образований по размерам $N_A + N_B + N_C + N_D$, где N_i — число вихрей в области i . Как видно на рис. 6, основной вклад в общее количество структур вносят мелкомасштабные образования в диапазоне масштабов, в которых происходит вязкая диссипация энергии. Количество вихрей в двухфазном и однофазном потоках существенным образом не изменяется.

Построим энергетический спектр согласно (2). Полученное распределение (рис. 7) соответствует общепринятому представлению о доле турбулентной энергии, содержащейся в вихрях определенных масштабов. В инерционном интервале энергия крупных структур, образующихся на начальном участке струи, постепенно передается более мелким образованиям и полностью гасится в мелкомасштаб-

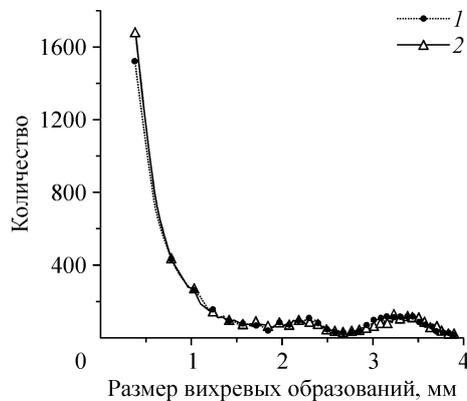


Рис. 6. Зависимость числа вихревых образований от размера для областей А+В+С+D, потоки: однофазный (1) и двухфазный (2).

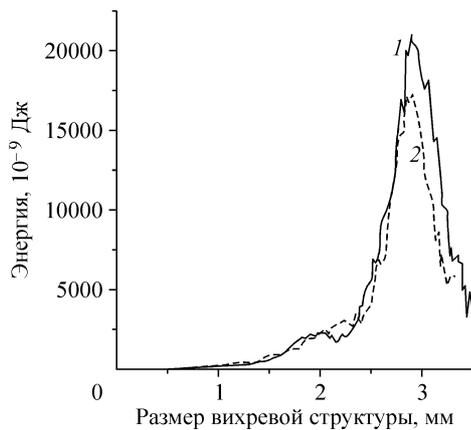


Рис. 7. Доля энергии, приходящаяся на вихри определенного масштаба, потоки: однофазный (1) и двухфазный (2).

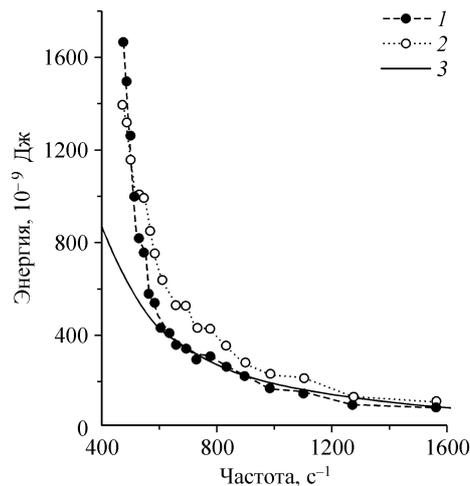


Рис. 8. Зависимость $E(\omega)$ (инерционный интервал) при $\omega = U_0/\lambda$; однофазный (1) и двухфазный (2) потоки, степенная зависимость $\omega^{-5/3}$ (3).

ных структурах. На рис. 7 видно, что дисперсная фаза подавляет развитие крупномасштабных образований. Однако влияние на степенную зависимость $-5/3$ практически незаметно (рис. 8), что согласуется с наблюдениями других исследователей [1–8].

В заключение можно сделать несколько выводов. Расширен диапазон применимости PIV систем для исследования турбулентных процессов. Экспериментально получена информация о влиянии дисперсной фазы на турбулентные параметры осесимметричной импактной струи. Показано, что присутствие пузырьков газа в потоке приводит к изменению статистических характеристик распределения крупномасштабных структур по размерам (увеличивается дисперсия) и ускоряет процесс их разрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lance M., Bataille J. Turbulence in the liquid phase of a bubbly air–water flow // Proc. of NATO Specialist's Meeting, Spitzensee, Germany. — Martinus Nijhoff. — 1983.
2. Lance M., Bataille J. Turbulence in the liquid phase of a uniform bubbly air–water flow // J. Fluid Mech. 1991. — Vol. 222. — P. 95–118.
3. Wang S.K., Lee S.J., Jones O.C., Lahey R.T. Statistical analysis of turbulent two-phase pipe flow // J. Fluid Engng. — 1990. — Vol. 112. — P. 89–95.
4. Michiyoshi I., Serizawa A. Turbulence in two-phase bubbly flow // Proc. Japan US Seminar on two-phase flow dynamics, 1984, 29 July–3 August, Lake Placid, USA.
5. Mudde R.F., Groen J.S., Van den Akker H.E.A. Liquid velocity field in a bubble column: LDA experiments // Chem. Engng Sci. — 1997. — Vol. 52. — P. 4217–4224.
6. Mudde R.F., Saito T. Hydrodynamical similarities between bubble column and bubbly pipe flow // J. Fluid Mech. — 2001. — Vol. 437. — P. 203–228.
7. Cui Z., Fan L.S. Turbulence energy distribution in bubbling gas–liquid and gas–liquid–solid flow systems // Chem. Engng Sci. — 2004. — Vol. 59. — P. 1755–1766.
8. Rensen J., Luther S., Lohse. The effect of bubbles on developed turbulence // J. Fluid Mech. — 2005. — Vol. 538. — P. 153–187.
9. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. — М.: 2003.

Статья поступила в редакцию 18 апреля 2007 г.,
после переработки — 2 апреля 2008 г.