

УДК 532.542.4, 532.574.7
DOI: 10.15372/PMTF202315302

ТУРБУЛЕНТНАЯ СТРУКТУРА СВОБОДНОЙ ПУЗЫРЬКОВОЙ СТРУИ: АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ МОМЕНТОВ СТАРШИХ ПОРЯДКОВ ДЛЯ ФЛУКТУАЦИЙ СКОРОСТИ

А. С. Северин^{*,**}, М. В. Тимошевский^{*}, Б. Б. Илюшин^{*},
К. С. Первунин^{***}

^{*} Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

^{**} Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
Новосибирск, Россия

^{***} Имперский колледж Лондона, Лондон, Великобритания

E-mails: a.severin@alumni.nsu.ru, timoshevskiy.mv@gmail.com, ilyushin@itp.nsc.ru,
konstantin.pervunin@gmail.com

Представлены результаты статистического анализа турбулентной структуры свободной пузырьковой струи при числе Рейнольдса, равном 12 500, на основе PIV-измерений скорости несущей фазы. После применения процедуры статистической фильтрации к полям мгновенной скорости получены распределения статистических моментов старших порядков для флуктуаций скорости (коэффициентов асимметрии и эксцесса), а также энергетические спектры турбулентности для однофазной и газонасыщенной струй. Выполнен анализ влияния дисперсной фазы (пузыри со средним диаметром 0,8 мм) с объемным газосодержанием 0, 1, 2, 3 % на указанные характеристики непрерывной фазы.

Ключевые слова: свободная струя, пузыри, газосодержание, турбулентность, флуктуации скорости, структура течения, моменты старших порядков, метод PIV, статистическая фильтрация

Введение. Для разработки новых и оптимизации существующих математических моделей сложных турбулентных течений требуется комплексная экспериментальная информация об их структуре, что обусловлено необходимостью установления базовых корреляций для корректного замыкания моделей при численном моделировании таких течений и использования больших массивов данных для их верификации [1]. Для адекватного описания сложных турбулентных течений, в том числе с областями контргradientного переноса или обратного энергетического каскада, обычно применяются модели, для использования которых необходима подробная статистическая информация о структуре потока, включая моменты третьего и четвертого порядков для флуктуаций скорости [2].

В настоящее время имеется большой объем экспериментальных данных о сдвиговых пузырьковых потоках, в том числе средние и турбулентные характеристики течений, полученные методом анемометрии по изображениям частиц (particle image velocimetry (PIV)) [3, 4]. Однако подробная информация о пространственных распределениях стати-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 19-79-30075-П). Эксперимент проведен в рамках государственного задания Института теплофизики СО РАН.

© Северин А. С., Тимошевский М. В., Илюшин Б. Б., Первунин К. С., 2023

стических моментов турбулентных флуктуаций высокого порядка, по сути, отсутствует, что обусловлено сложностью вычисления этих величин вследствие их высокой чувствительности к ошибочным измерениям (даже единичным выбросам в “хвостах” функций распределения) независимо от объема исходной выборки.

1. Эксперимент. Эксперименты проводились на гидродинамическом струйном стенде в Институте теплофизики СО РАН. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода, температура которой поддерживалась на уровне $(30 \pm 0,1)^\circ\text{C}$. Затопленная осесимметричная струя с ударным профилем скорости формировалась круглым соплом с внутренним диаметром $D = 15$ мм и высотой 110 мм. Число Рейнольдса, рассчитанное по среднерасходной скорости жидкости $V_0 = 0,663$ м/с, составляло $\text{Re} = V_0 D / \nu = 12\,500$ (ν — кинематическая вязкость воды). Воздушные пузыри формировались в смесителе, установленном перед рабочим каналом. Средний размер пузырей равен $D_b \approx 0,8$ мм, объемное газосодержание $\beta = 0, 1, 2, 3\%$.

Измерения скорости в жидкости проводились методом PIV с высоким временным разрешением ($f_0 = 2$ кГц). Исходные данные, представляющие собой ансамбли из $N \approx 10\,900$ двойных PIV-изображений для каждого значения β , регистрировались непрерывно в течение приблизительно 5 с. Эти массивы данных обрабатывались в программном пакете “ActualFlow” с последовательным применением следующих процедур: Iterative CCF, Peak Validation, Adaptive Median Filter и Cluster Validation. Для получения истинных полей статистических моментов флуктуаций скорости течения непосредственно перед их расчетом применялась также процедура статистической фильтрации векторов [5].

Данный статистический метод фильтрации основан на анализе гистограмм мгновенной скорости в каждой точке потока и отсеке паразитных выбросов в “хвостах” распределений. Вектор скорости считался паразитным, если такой была хотя бы одна из его компонент. Применение данного подхода практически не оказывает влияния на средние значения, позволяет существенно уменьшить погрешность дисперсии и необходимо для вычисления моментов старших порядков (третьего и четвертого) вследствие существенного влияния ошибочных измерений на величину последних. Таким образом, фильтрация позволила получить распределения моментов скорости старших порядков в свободной пузырьковой струе при различных значениях объемного газосодержания.

2. Обсуждение результатов. На рис. 1 приведены пространственные распределения коэффициентов асимметрии S_u и эксцесса E_u флуктуационной компоненты продольной скорости жидкости в свободной пузырьковой струе. Видно, что добавление пузырей приводит к существенному изменению статистической структуры флуктуаций скорости потока. В частности, область больших значений моментов старших порядков (отрицательные значения коэффициента асимметрии (см. рис. 1, а) и положительные значения коэффициента эксцесса (см. рис. 1, б)) занимает практически все ядро пузырьковой струи, в то время как в однофазном потоке эта область имеет вид узкой полосы, расположенной вдоль внутренней границы слоя смешения. Заметим, что коэффициенты асимметрии и эксцесса характеризуют отклонение функции плотности вероятности флуктуаций скорости от равновесного (гауссова) распределения. Такое отклонение распределения турбулентных флуктуаций от равновесного состояния, очевидно, вызвано влиянием пузырей как на крупномасштабные вихревые структуры, что приводит к нарушению их когерентности непосредственно на выходе сопла [6], так и на весь диапазон масштабов турбулентности.

На рис. 2 представлены энергетические спектры турбулентных флуктуаций радиальной скорости жидкости в точке А (ε_v — спектральная плотность энергии турбулентных флуктуаций в радиальном направлении, K_v — радиальная составляющая кинетической энергии турбулентности). Согласно рис. 2 в спектре турбулентных флуктуаций скорости для однофазной струи имеется узкий пик при значении числа Струхала $\text{St} = fD/V_0 \approx 0,4$,

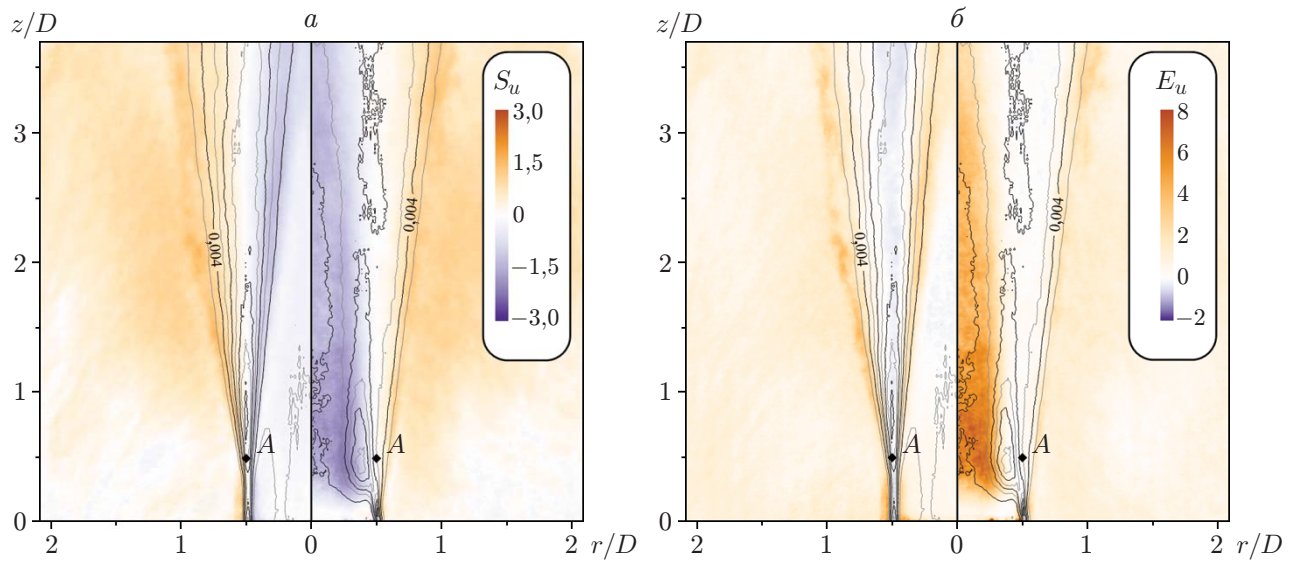


Рис. 1. Пространственные распределения коэффициентов асимметрии S_u (а) и эксцесса E_u (б) флуктуационной компоненты продольной скорости жидкости в свободной пузырьковой струе при $\beta = 0$ (слева) и $\beta = 3\%$ (справа): линии — линии уровня кинетической энергии турбулентности, А — точка, в которой проводится спектральный анализ

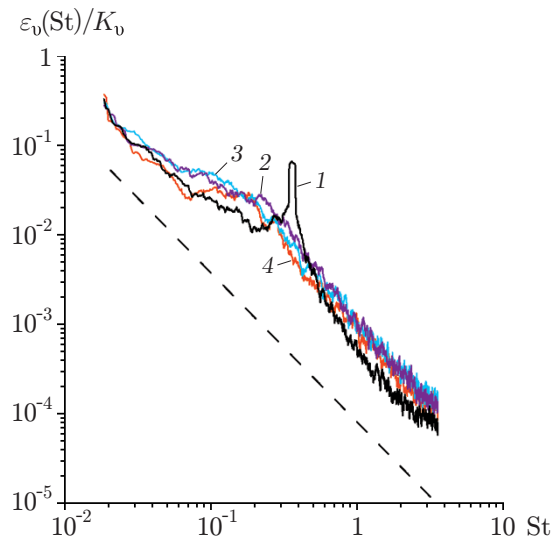


Рис. 2. Энергетические спектры турбулентных флуктуаций радиальной скорости жидкости в точке А(0,5;0,5) (см. рис. 1), расположенной в слое смешения струи, при различных значениях β : 1 — $\beta = 0$, 2 — $\beta = 1\%$, 3 — $\beta = 2\%$, 4 — $\beta = 3\%$; штриховая линия — $St^{-5/3}$

обусловленный прохождением вдоль слоя смещения крупномасштабных тороидальных вихрей (когерентных структур), которые образуются на срезе сопла и эволюционируют вниз по течению [7]. Вместе с тем для пузырьковой струи такой пик отсутствует. По-видимому, это вызвано нарушением процесса формирования когерентных структур пузырями, что приводит к резкому (даже при малых значениях β) расширению данного пика с одновременным уменьшением амплитуды и его смещению в длинноволновую область энергетического спектра. Нарушение когерентности развития крупномасштабных вихревых структур также, очевидно, является причиной отмеченных выше значительных изменений распределений моментов старших порядков для флуктуаций скорости.

Заключение. Статистический анализ ансамблей полей мгновенной скорости жидкости в сочетании с методом статистической фильтрации векторов позволил получить пространственные распределения коэффициентов асимметрии и эксцесса флуктуационной компоненты скорости жидкости в свободных одно- и двухфазной струях. Обнаружены изменения полей этих характеристик в зависимости от объемного газосодержания. Показано, что четко выраженный пик в энергетическом спектре в ближней области слоя смещения однофазной струи, обусловленный прохождением когерентных структур, подавляется при добавлении пузырей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Vaidheeswaran A., Hibiki T.** Bubble-induced turbulence modeling for vertical bubbly flows // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2017. V. 115. P. 741–752.
2. **Курбацкий А. Ф.** Моделирование нелокального турбулентного переноса импульса и тепла. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988.
3. **Alekseenko S. V., Dulin V. M., Markovich D. M., Pervunin K. S.** Experimental investigation of turbulence modification in bubbly axisymmetric jets // J. Engng Thermophys. 2015. V. 24, N 2. P. 101–112.
4. **Pervunin K. S., Timoshevskiy M. V.** Bubbly free and impinging jets: experimental study by means of PIV and PFBI // J. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 754, N 3. 032016.
5. **Heinz O. M., Ilyushin B. B., Markovich D. M.** Application of a PDF method for the statistical processing of experimental data // Intern. J. Heat Fluid Flow. 2004. V. 25, N 5. P. 864–874.
6. **Hussain A. K. M. F.** Coherent structures — reality and myth // Phys. Fluids. 1983. V. 26, N 10. P. 2816–2850.
7. **Crow S. C., Champagne F. H.** Orderly structure in jet turbulence // J. Fluid Mech. 1971. V. 48, N 3. P. 547–591.

*Поступила в редакцию 15/V 2023 г.,
после доработки — 23/V 2023 г.
Принята к публикации 29/V 2023 г.*