

УДК 532.5

## ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР

А. П. Белоусов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск

E-mail: abelousov@ngs.ru

С помощью метода PIV изучено влияние пузырьков газа на энергетические свойства крупномасштабных вихревых структур в осесимметричной затопленной импактной струе.

Ключевые слова: турбулентные потоки, крупномасштабные вихревые структуры, струйные течения, метод PIV.

Турбулентность — образование в течениях жидкостей и газов многочисленных вихрей различных размеров, вследствие чего их характеристики под действием хаотических флуктуаций изменяются от точки к точке и во времени нерегулярно [1]. Большинство течений жидкостей и газов как в природе (движение воздуха в земной атмосфере, воды в реках и морях и т. п.), так и в технических устройствах (трубах, каналах, струях, пограничных слоях вблизи твердых тел, следах за такими телами и т. п.) являются турбулентными.

Вследствие большой интенсивности турбулентного перемешивания турбулентные течения обладают повышенной способностью к передаче количества движения (и, следовательно, к повышенному силовому воздействию на обтекаемые твердые тела), передаче теплоты, распространению химических реакций (в частности, горения), переносу взвешенных частиц, рассеиванию звуковых и электромагнитных волн и созданию флуктуаций их амплитуд и фаз [1].

В процессах переноса количества движения и кинетической энергии пульсаций, а также рейнольдсовых напряжений и других турбулентных характеристик участвуют вихри различных масштабов. Особое значение имеют крупномасштабные, “большие” вихри, динамика которых изучается в разделе теории турбулентности, посвященном когерентной турбулентности, возникающей в турбулентных струях, следах за обтекаемыми телами, предотрывных областях пристенных турбулентных пограничных слоев, а также в природных условиях (смерчи, циклоны) [2–5].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование методом PIV влияния дисперсной фазы на энергетические свойства крупномасштабных вихревых структур.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Жидкость (дистиллированная вода с температурой  $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) циркулировала в замкнутом гидродинамическом контуре, который состоял из прямоугольного бака с размерами  $200 \times 200 \times 300$  мм, изготовленного из органического стекла, резервуара, системы соединительных труб и датчиков для контроля параметров эксперимента. В прямоугольный бак через дно вертикально вводится сопло ( $d = 15$  мм), так чтобы поток жидкости натекал на импактную поверхность под углом  $90^{\circ}$ . Для создания периодического возмущения потока использовался стандартный электродинамический вибратор ESE-201, соединенный с успокоительной камерой через сильфон.

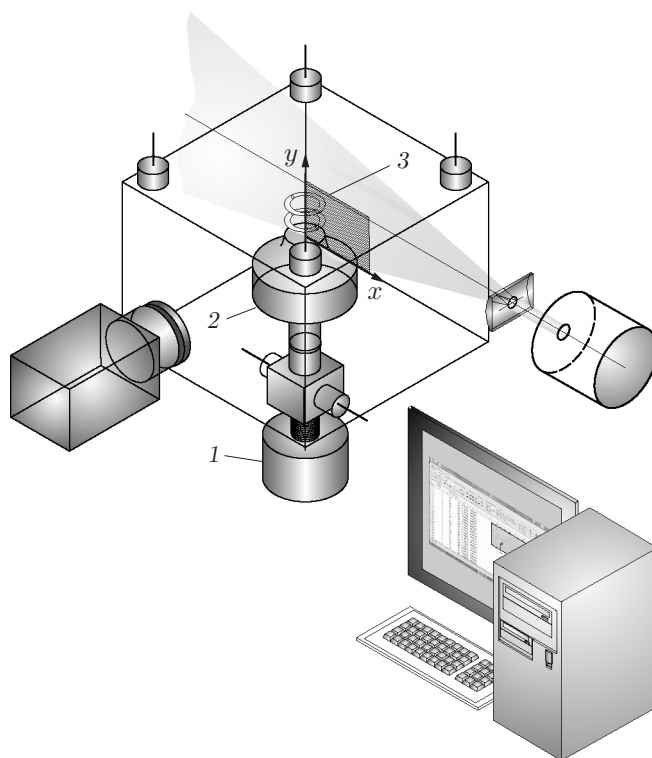


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — электродинамический вибратор ESE-201; 2 — сопло; 3 — импактная поверхность

Для измерения поля скоростей применялась система PIV. Излучение импульсного лазера Nd:YAG (длина волны равна 532 нм, вторая гармоника) преобразовывалось анаморфотной оптической системой в лазерный нож, который выделял в потоке исследуемое сечение. Лазер давал две последовательные вспышки. Для улучшения качества изображения вторичное излучение флуоресцентных трассеров (полимерные частицы диаметром 10 мкм, плотность которых приближенно равна плотности воды) проходило через световой фильтр (пропускание в красной области спектра) и фиксировалось камерой, что позволяло избавиться от шумовой засветки. Полученные изображения анализировались с помощью системы обработки.

Измерения проводились при числе Рейнольдса  $Re = 12\,500$ , которое определялось по формуле

$$Re = U_0 d / \nu$$

( $\nu$  — кинематическая вязкость жидкости;  $U_0 = 0,833$  м/с — среднерасходная скорость потока;  $d$  — диаметр выходного отверстия сопла). Расстояние между срезом сопла и импактной поверхностью  $H = 30$  мм ( $H/d = 2$ ). Средний диаметр пузырьков газа приближенно равен 400 мкм, объемная доля газа на срезе сопла 4,5 %. Параметры PIV-системы следующие: программное обеспечение Dantec Flow Manager v. 4.11, время между последовательными вспышками лазера 0,2 мс, физический размер области измерения  $53 \times 30$  мм, разрешение 0,33 мм между соседними векторами скорости, размер расчетной области  $16 \times 16$  пикселей ( $0,67 \times 0,67$  мм), ширина лазерного ножа 1 мм. Согласно [7] погрешность измерения скорости не превышала 5 %. Для уменьшения погрешности использовалось сглаживание мгновенного поля скоростей (три цикла осреднения компонент векторов скорости по восьми соседним точкам). Измерения проводились при упорядоченной генерации вихревых образований путем внешнего периодического воздействия, позволяющего создавать в по-

токе когерентные структуры. Период срабатывания затвора камеры был кратен периоду внешних воздействий генератора, что позволяло фиксировать вихри в пространстве для всех реализаций (3000 мгновенных полей завихренности).

Изучение вихревых структур на разных этапах их развития осуществлялось с помощью введения разности фаз (задержки по времени) между импульсом генератора и моментом срабатывания затвора (в рассматриваемом эксперименте разность фаз равна  $\pi/4$ ). Частота воздействия определялась оптимальным для данной системы значением числа Струхала  $Sh = 0,5$ .

Проанализируем мгновенные поля скоростей  $\mathbf{V}(x_i, y_i)$  ( $x_i, y_i$  — дискретные координаты точек пространства, задаваемые системой PIV). Значение завихренности векторного поля скоростей  $\mathbf{V}(x, y)$  для точек  $(x_i, y_i)$  определяется по формуле

$$\text{rot } \mathbf{V} = \left( \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) \mathbf{k} \quad (1)$$

( $V_x, V_y$  — проекции вектора скорости на оси  $x$  и  $y$  соответственно).

Для определения границ области, занятой вихревым образованием, выбирается некоторое пороговое значение завихренности  $I_{tr} = 0,2I_{\max}$ , превышающее уровень шума и позволяющее четко идентифицировать вихри. Форма вихревых тороидальных структур в плоскости лазерного ножа близка к круговой ( $d_V \approx 4$  мм). Положение центров определяется по формулам

$$X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i, \quad Y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i,$$

где  $X, Y$  — координаты центра;  $N$  — число точек вихревого образования;  $X_i, Y_i$  — текущие координаты точки.

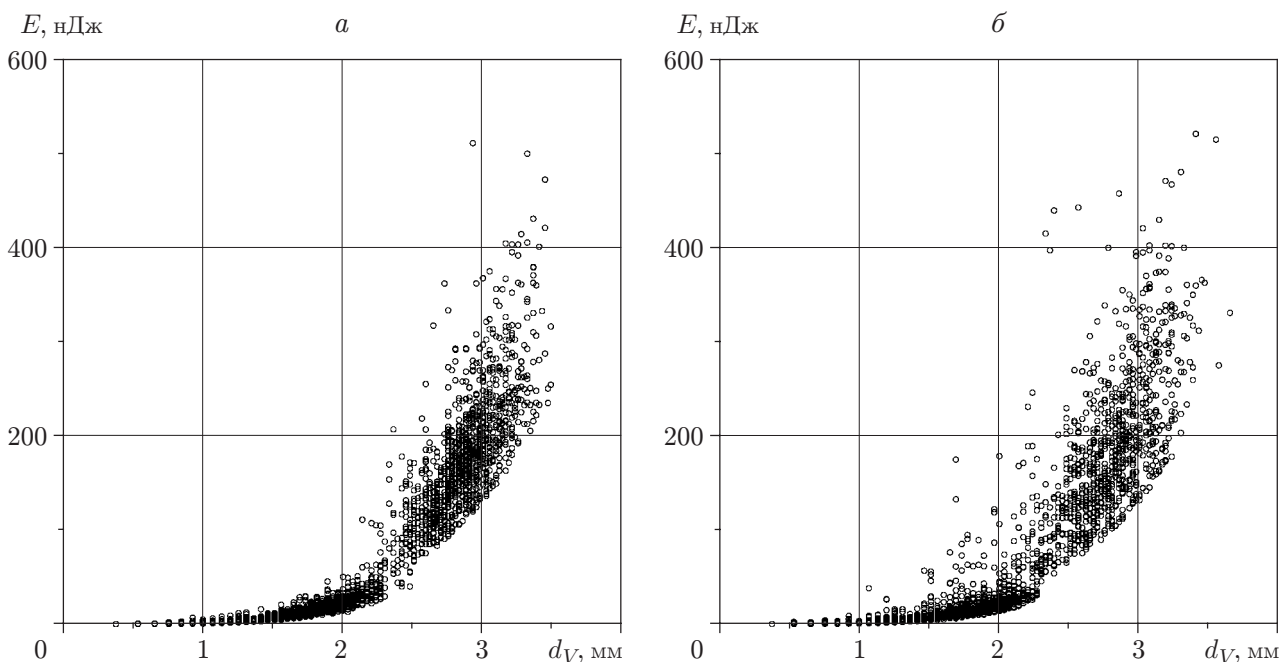


Рис. 2. Зависимости  $E(d_V)$  для однофазного (а) и двухфазного (б) потоков

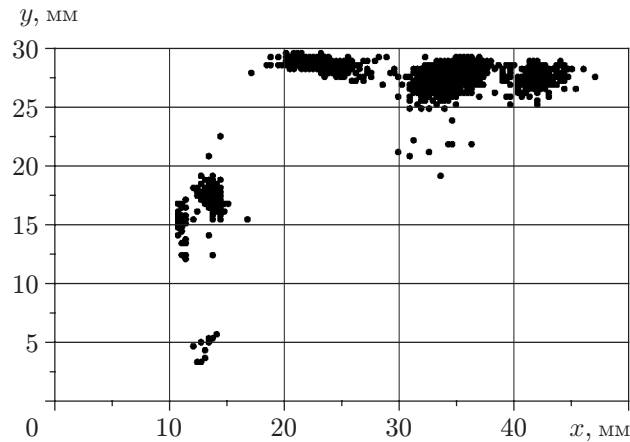


Рис. 3. Области локализации вихревых структур в потоке

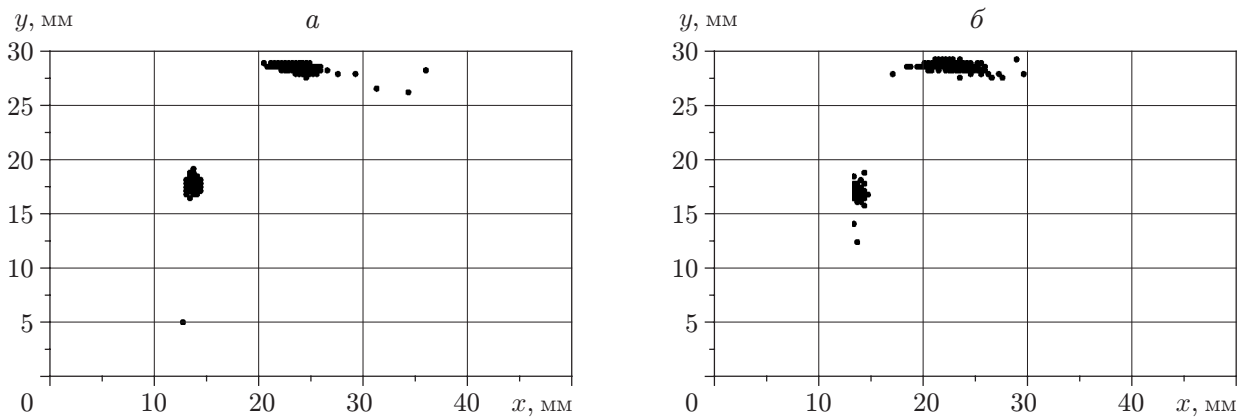


Рис. 4. Влияние дисперсной фазы на локализацию крупномасштабных вихревых структур:  
 а — однофазный поток, б — двухфазный поток

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

$$E = \frac{\rho l^3}{2} \sum V_i^2$$

(в силу теоремы Стокса и предположения о вращательной симметрии вихря  $2\pi V_i r_i = \sum I(x_j, y_j) \Delta x_j \Delta y_j$  при условии  $j \leq i$ ,  $r_i^2 = (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2$ ). Здесь  $\rho$  — плотность жидкости;  $x_0, y_0$  — координаты центра вихревой структуры;  $I(x_j, y_j)$  — величина завихренности в точке. Суммирование проводится по области, занимаемой вихрем.

На рис. 2 приведены зависимости  $E(d_V)$  для однофазного и двухфазного потоков. Видно, что наличие дисперсной фазы обуславливает увеличение разброса размеров и значений энергии крупномасштабных вихревых структур. Подобное поведение вихревых структур отмечено в работах [5, 6].

На рис. 3 представлено пространственное распределение областей локализации вихревых структур (координаты центров). В силу симметрии струи рассматривается только ее правая половина. Центр струи соответствует координате  $x = 4,77$  мм. Верхняя граница совпадает с импактной поверхностью.

На рис. 4 представлены области локализации крупномасштабных вихревых структур ( $d_V > 2,4$  мм) однофазного и двухфазного потоков. Для однофазного потока (2118 вихрей) средние координаты центров вихревых образований  $(x, y)$  следующие: нижняя область — 13,7 мм, 17,7 мм; верхняя область — 23,8 мм, 28,5 мм; для двухфазного (1764 вихря) — 13,9 мм, 17,0 мм; 23,0 мм, 28,7 мм соответственно. Видно, что наличие дисперсной фазы приводит к смещению вихревых структур вверх по потоку (уменьшению энергии крупномасштабных вихревых структур). При этом увеличивается разброс центров вихрей по координатам.

Таким образом, под воздействием дисперсной фазы крупномасштабные вихревые структуры разрушаются. Следовательно, данные, полученные в работах [5, 6], подтверждаются.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Физика.** Большой энциклопедический словарь. 4-е изд. / Под ред. А. М. Прохорова. М.: Большая рос. энцикл., 1999.
2. **Лойцянский Л. Г.** Механика жидкости и газа. 7-е изд. М.: Дрофа, 2003.
3. **Agrawal A., Prasad A.** Measurements within vortex cores in a turbulent jet // J. Fluid Engng. 2003. V. 125, N 3. P. 561–568.
4. **Chhabra S., Hug P., Prasad A.** Characteristics of small vortices in a turbulent axisymmetric jet // J. Fluid Engng. 2006. V. 128, N 3. P. 439–445.
5. **Белоусов А. П.** Влияние дисперсной фазы на турбулентную структуру осесимметричной затопленной импактной струи // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 3. С. 435–440.
6. **Алексеев С. В., Маркович Д. М., Семенов В. И.** Турбулентная структура газонасыщенной импактной струи // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2002. № 5. С. 22–33.
7. **Raffel M.** Particle image velocimetry. A practical guide / M. Raffel, C. Willert, J. Kompenhans. Berlin: Springer, 1998.

*Поступила в редакцию 21/X 2009 г.,  
в окончательном варианте — 11/X 2010 г.*

---