



УДК 535.8

А.П. Белоусов

*Институт теплофизики СО РАН, Россия,
630090, Новосибирск, академика Лаврентьева пр., 1, E-mail: abelousov@ngs.ru*

ВЛИЯНИЕ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В ГАЗОНАСЫЩЕННОЙ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ИМПАКТНОЙ СТРУЕ

Методом PIV изучено влияние пузырьков газа на энергетические свойства крупномасштабных вихревых структур (КВС) в осесимметричной затопленной импактной струе.

ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПОТОКИ, КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ,
СТРУЙНЫЕ ТЕЧЕНИЯ, PIV

ВВЕДЕНИЕ

Турбулентность – явление, наблюдаемое во многих течениях жидкостей и газов и заключающееся в том, что в этих течениях образуются многочисленные вихри различных размеров, вследствие чего их гидродинамические и термодинамические характеристики (скорость, давление, плотность) испытывают хаотические флуктуации и поэтому изменяются от точки к точке во времени нерегулярно. Большинство течений жидкостей и газов турбулентно, как в природе (движение воздуха в земной атмосфере, воды в реках и морях, газа в атмосферах Солнца и звезд и межзвездных туманностях и т.п.), так и в технических устройствах (в трубах, каналах, струях, в пограничных слоях около твердых тел, в следах за такими телами и т.п.).

Благодаря большой интенсивности турбулентного перемешивания турбулентные течения обладают повышенной способностью к передаче количества движения (и поэтому к повышенному силовому воздействию на обтекаемые твердые тела), передачи теплоты, ускоренном распространении химических реакций (в частности горения), способностью нести взвешенные частицы, рассеивать звуковые и электромагнитные волны и создавать флуктуации их амплитуд и фаз [1].

В процессах переноса количества движения и кинетической энергии пульсаций, а также рейнольдсовых напряжений и других турбулентных характеристик, участвуют вихри разных масштабов. Особое место занимают крупномасштабные, «большие» вихри. Изучением их взаимодействий занимается сравнительно новый раздел теории турбулентности, посвященный так называемой когерентной турбулентности, которая образуется в турбулентных струях, «следах» за обтекаемыми телами, в предотрывных областях «пристенных» турбулентных пограничных слоев, а также в природных условиях (смерчи, циклоны) [2 – 5].

Цель данной работы – экспериментальное изучение влияния дисперсной фазы на энергетические свойства крупномасштабных вихревых структур методом PIV.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

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

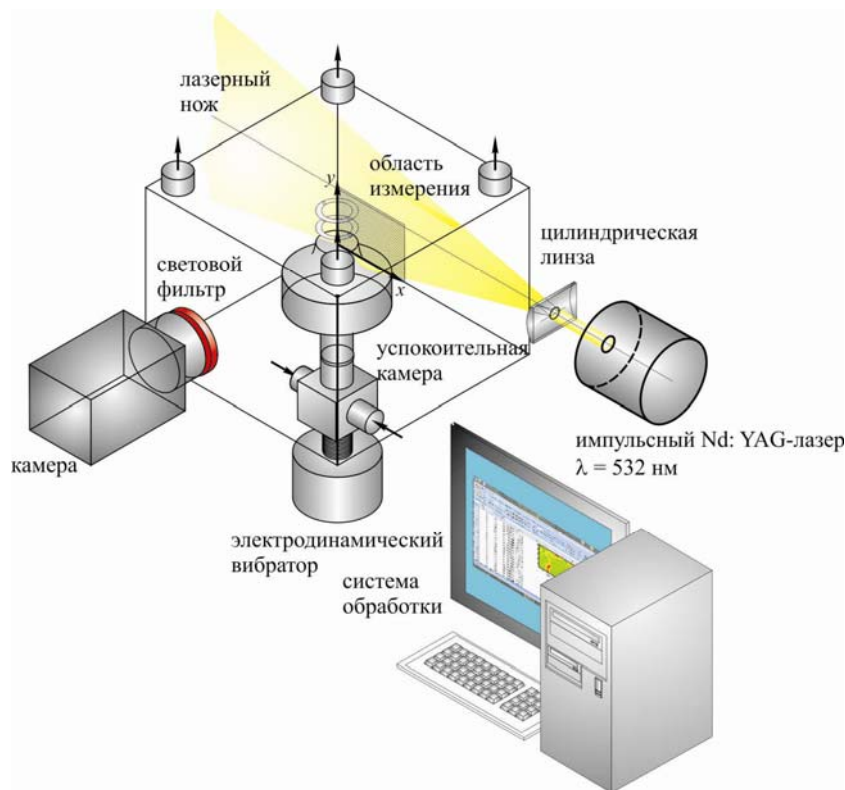


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

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

Измерения проводились при числе Рейнольдса $Re = 12\ 500$, определяемого как

$$Re = \frac{U_0 d}{\nu},$$

(ν – кинематическая вязкость жидкости; $U_0 = 0,833\text{ м/с}$ – среднерасходная скорость потока, d – диаметр выходного отверстия сопла). Расстояние между срезом сопла и импактной поверхностью $H = 30\text{ мм}$ ($H/d = 2$). Средний размер пузырьков газа – 400 мкм , объемное содержание на срезе сопла – $4,5\%$. Параметры PIV системы: программное обеспечение (Dantec Flow Manager v. 4.11), время между последовательными вспышками лазера 200 мкс ,

физический размер области измерения 53×30 мм, разрешение $0,33$ мм/вектор, размер расчетной области 16×16 пикселей ($0,67 \times 0,67$ мм), ширина ножа 1 мм. Согласно [7] погрешность измерения не превышала 5% . Для понижения погрешности использовалось «сглаживание» мгновенного поля скорости (три цикла осреднения компонент векторов скорости по 8 соседним точкам). Измерения проводились при упорядоченной генерации вихревых образований путем внешнего периодического воздействия, позволяющего создавать в потоке когерентные структуры. Период срабатывания затвора камеры равнялся периоду генератора, что позволяло фиксировать вихри в пространстве для всех реализаций (3000 мгновенных полей завихренности). Изучение вихревых структур на разных этапах развития осуществлялось введением разности фаз (задержки по времени) между импульсом генератора и моментом срабатывания затвора ($\pi/4$ в рассматриваемом эксперименте). Частота воздействия определялась оптимальным для данной системы значением числа Струхала $Sh = 0,5$.

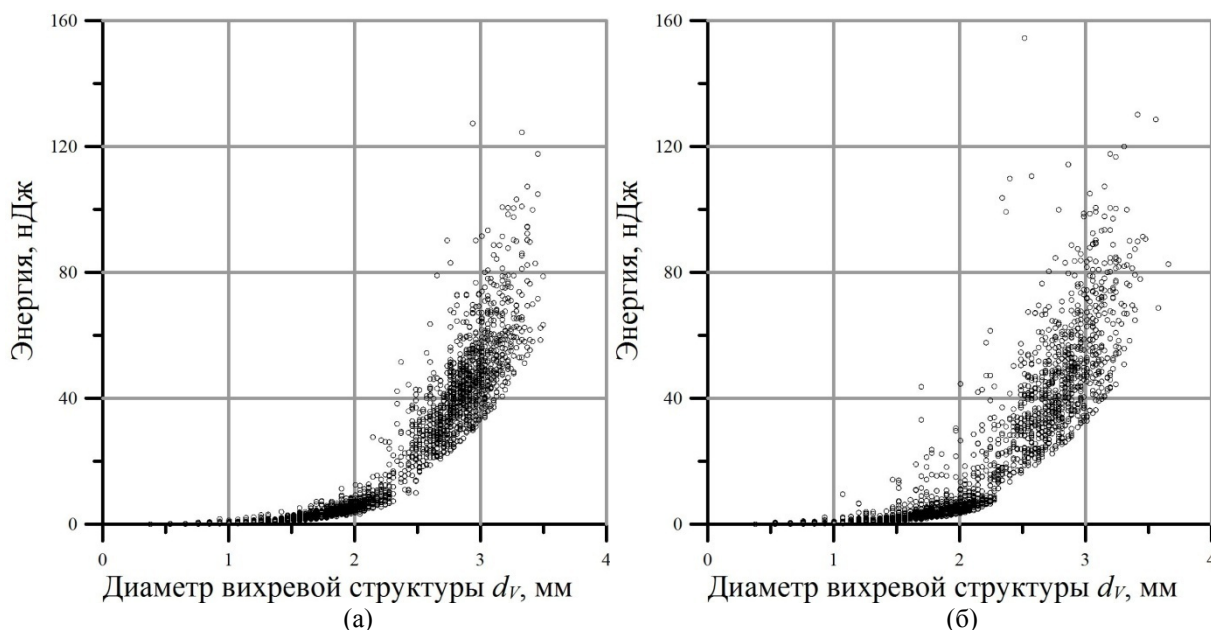


Рис. 2. Сравнение зависимостей $E(d_v)$ для однофазного и двухфазного потоков
(а) – однофазный поток; (б) - двухфазный поток.

Проанализируем мгновенные поля скоростей $\mathbf{V}(x_i, y_i)$ (x_i, y_i – дискретные координаты точек пространства, задаваемые системой PIV в декартовой системе координат). Значение завихренности векторного поля $\mathbf{V}(x, y)$ скорости для точек (x_i, y_i) вычисляется по формуле

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

(V_x, V_y – проекции вектора скорости на оси x и y соответственно), \mathbf{k} – единичный вектор в направлении оси z .

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

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

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

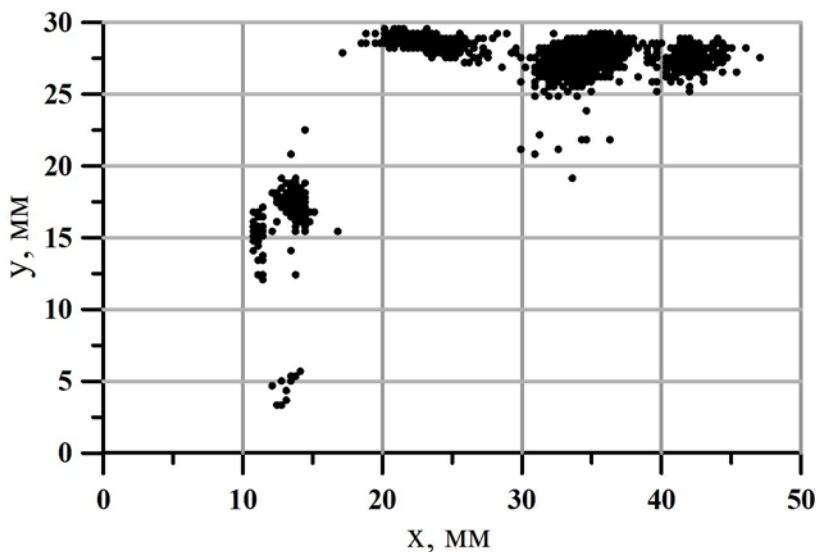


Рис. 3. Локализация вихревых структур в потоке

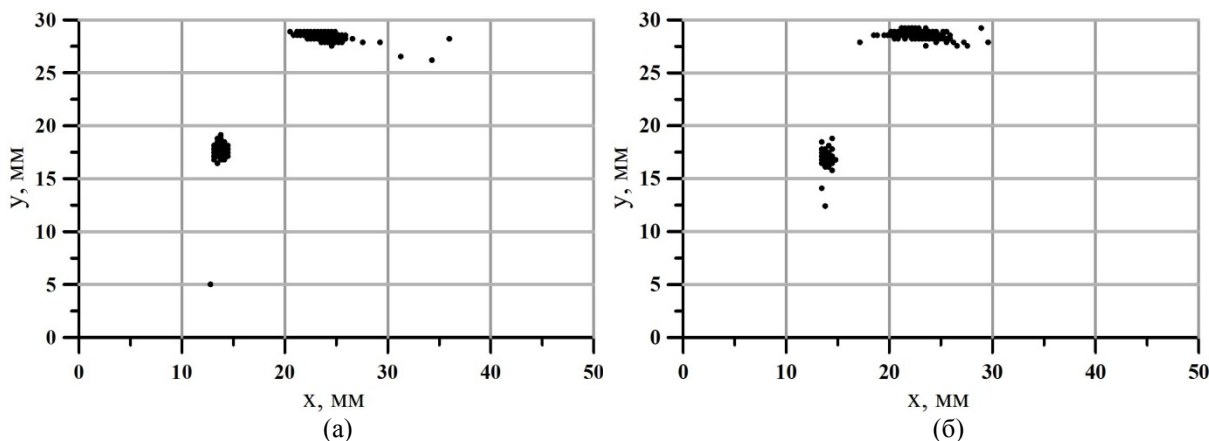


Рис. 4. Влияние дисперсной фазы на локализацию КВС:

- (а) – однофазный поток (2188 вихрей); средние координаты центров вихревых образований $(x; y)$: нижняя область – (13,7 мм; 17,7 мм); верхняя область – (23,8 мм; 28,5 мм);
- (б) – двухфазный поток (1764 вихря); средние координаты центров вихревых образований $(x; y)$: нижняя область – (13,9 мм; 17,0 мм); верхняя область – (23,0 мм; 28,7 мм).

Кинетическая энергия, заключенная в сечении вихревого образования толщиной $l = x_i - x_{i-1} = y_i - y_{i-1}$, может быть рассчитана по формуле [5]

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

где ρ – плотность жидкости, x_0, y_0 – координаты центра вихревой структуры $I(x_i, y_i)$ – величина завихренности в точке. Суммирование ведется по области, занимаемой вихрем.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 (а, б) показано сравнение зависимостей $E(d_V)$ для однофазного и двухфазного потоков. Видно, что наличие дисперсной фазы приводит к увеличению разброса

крупномасштабных вихревых структур по энергиям и размерам. Аналогичное поведение вихревых структур отмечено в работах [5, 6].

На рис. 3 приведено пространственное распределение областей локализации вихревых структур (координаты центров). Вследствие 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) для однофазного и двухфазного потоков. Видно, что наличие дисперсной фазы приводит к смещению вихревых структур вверх по потоку (уменьшение энергии КВС). При этом растет разброс центров вихрей по координатам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о разрушении крупномасштабных вихревых структур дисперсной фазой, что подтверждает данные, полученные в работах [5, 6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Физика. Большой энциклопедический словарь** / Гл. ред. А. М. Прохоров. – 4-е изд. – М.: Большая Российская Энциклопедия, 1999. – 944 с.
2. **Лойцянский Л. Г.** Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
3. **Agrawal A., Prasad A.** Measurements Within Vortex Cores in a Turbulent Jet // Journal of Fluid Engineering, May 2003, Vol. 125, pp. 561 – 568.
4. **Chhabra S., Hug P., Prasad A.** Characteristics of Small Vortices in a Turbulent Axisymmetric Jet // Journal of Fluid Engineering, May 2006, Vol. 128, pp. 439 – 445.
5. **Белоусов А. П.** Влияние дисперсной фазы на турбулентную структуру осесимметричной затопленной импактной струи // Теплофизика и аэромеханика, 2008, т. 15, № 3, стр. 435 – 440.
6. **Алексеев С.В., Маркович Д.М., Семенов В.И.** Турбулентная структура газонасыщенной импактной струи // Механика жидкости и газа, №5. 2002.
7. **Raffel M., Willert C., Kompenhans J.** Particle image Velocimetry. A practical guide, Springer, Berlin. 1998.

A.P. Belousov

*Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Russia,
630090, Novosibirsk, Akademika Lavrent'eva pr., 1, E-mail: abelousov@ngs.ru*

EFFECT OF THE GAS PHASE ON THE ENERGY PROPERTIES OF LARGE-SCALE VORTICAL STRUCTURES IN LIQUID-GAS IMPINGING JET

In this work the investigation of gas bubbles effect on large-scale vortical structures energy properties in axisymmetric submerged impinging jet by PIV method is presented.

TURBULENCE, LARGE-SCALE VORTICAL STRUCTURES, JET FLOWS, PIV