

УДК 535.8

А. П. Белоусов

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

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ ИМПАКТНОЙ СТРУЕ

Работа посвящена экспериментальному изучению динамики вихревых образований в осесимметричных импактных струях. Проведены измерения мгновенного поля скорости и завихренности методом PIV. Вычислена энергия, заключенная в вихревых образованиях. Определены области локализации вихревых структур в зависимости от величины энергии.

ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПОТОКИ, КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ,
СТРУЙНЫЕ ТЕЧЕНИЯ, PIV

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивность отвода тепла от поверхности (или подвода к ней) – фактор, во многом определяющий работу современных технологических устройств. Использование импактных струй – эффективный способ теплообмена, рассматриваемый в большом числе теоретических и экспериментальных исследований [1]. Теплоотдача в импактных струях полностью определяется динамикой течения. Основные методы изучения: измерение давления, термоанемометрия, доплеровская анемометрия, электрохимия, визуализация и т.д. [1, 2].

Согласно современным представлениям [3, 4], в развитии дозвуковых турбулентных струй преобладающую роль играют регулярные, периодические структуры, существующие в начальном участке струи. Эти структуры в опытах идентифицируются как визуальными наблюдениями, так и методами корреляционного анализа, так как их движение характеризуется определенными частотами.

Исследования регулярной структуры турбулентных струй показали, что развитие струи происходит следующим образом: вследствие неустойчивости тонкого слоя смешения вблизи сопла появляются мелкие волны завихрений, которые быстро делаются круче и объединяются попарно. Последующие объединения становятся все больше и затем разрушаются, превращаясь в систему турбулентных вихрей, захватывающих всю область течения. Слияние упорядоченных вихревых структур является основным фактором расширения слоя смешения по потоку. Характерная частота этих крупномасштабных образований соответствует числу Струхала 0,3–0,5. Указанные вихри в пределах начального участка существуют на фоне низкотурбулентного течения в ядре струи, благодаря чему они фиксируются в виде пиков на спектральных распределениях пульсационной скорости, как на оси струи, так и в зоне смешения [1].

Одномерные энергетические спектры продольной составляющей пульсации скорости, как следует из результатов [1, 5 – 8] различаются формой вершины, т.е. распределением спектральной функции при низких волновых числах. Спектры, измеренные на оси струи в пределах начального участка (4 диаметра сопла), имеют довольно резко выраженные пики,

вызываемые регулярными вихревыми структурами в слое смешения [3, 8]. При смещении датчика термоанемометра вдоль оси на расстояние свыше 6 диаметров сопла, либо в радиальном направлении в зоне начального участка на расстояние, превышающее 1,2 диаметра сопла, спектры обеих компонент пульсаций приобретают плоскую вершину, подобную наблюдавшейся в развитых турбулентных пристенных пограничных слоях: при малых волновых числах значения зависимости энергии от волнового числа постоянны. Видимо, естественное возрастание интенсивности турбулентности течения в указанных областях маскирует пики спектральной плотности, поэтому последние можно обнаружить только на низкотурбулентном фоне [1].

Энергетические спектры поперечной компоненты пульсационной скорости имеют те же характерные особенности [5, 6].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Появление современных средств гидродинамического эксперимента (Particle Image Velocimetry) [9] дает возможность детального изучения крупномасштабных вихревых структур, что отражено в работах посвященных идентификации [10-13] и изучению свойств [11 – 16] вихревых образований. Получена информация о численной плотности, размерах, энергии и внутренней структуре. К сожалению, практически во всех работах исследуются свойства вихревых образований в свободных струях. В то время как импактные струи остаются малоизученными [17].

Цель данной работы – экспериментальное изучение динамики крупномасштабных вихревых структур в осесимметричной затопленной импактной струе 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 $200 \times 200 \times 300$ мм, изготовленного из органического стекла, резервуара, системы соединительных труб и датчиков для контроля параметров эксперимента. В прямоугольный бак вертикально через дно вводилось сопло ($d = 15$ мм, профиль соответствует зависимости Витошинского [1], длина сопла $2d$, степень поджатия 3), 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 сильфон.

Для измерения поля скорости применялась система PIV. Излучение импульсного лазера Nd:YAG (вторая гармоника $\lambda = 532$ нм) 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 20 мкм) для улучшения качества изображения проходило через световой фильтр, и фиксировалось камерой, что позволяло избавиться от шумовой засветки. Полученные изображения анализировались системой обработки.

Измерения проводились при числе Рейнольдса $Re = 25\ 000$, определяемого как

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

(ν – кинематическая вязкость жидкости; $U_0 = 1,6$ м/с – среднерасходная скорость потока). Расстояние между срезом сопла и импактной поверхностью $H = 30$ мм ($H / d = 2$), что соответствует характерным режимам работы струйных теплообменников [1]. Параметры PIV системы: программное обеспечение (Dantec Flow Manager v. 4.0), время между последовательными вспышками лазера 20 мс, физический размер области измерения 53×30

мм, разрешение 0,67 мм/вектор, размер расчетной области 32×32 пикселя (1,34×1,34 мм), ширина ножа 1 мм. Согласно [9] относительная погрешность измерения скорости не превышала 5%. Измерения проводились при упорядоченной генерации вихревых образований путем внешнего периодического воздействия, позволяющего создавать в потоке когерентные структуры. Частота воздействия определялась оптимальным для данной системы значением числа Струхала $Sh = 0,5$.

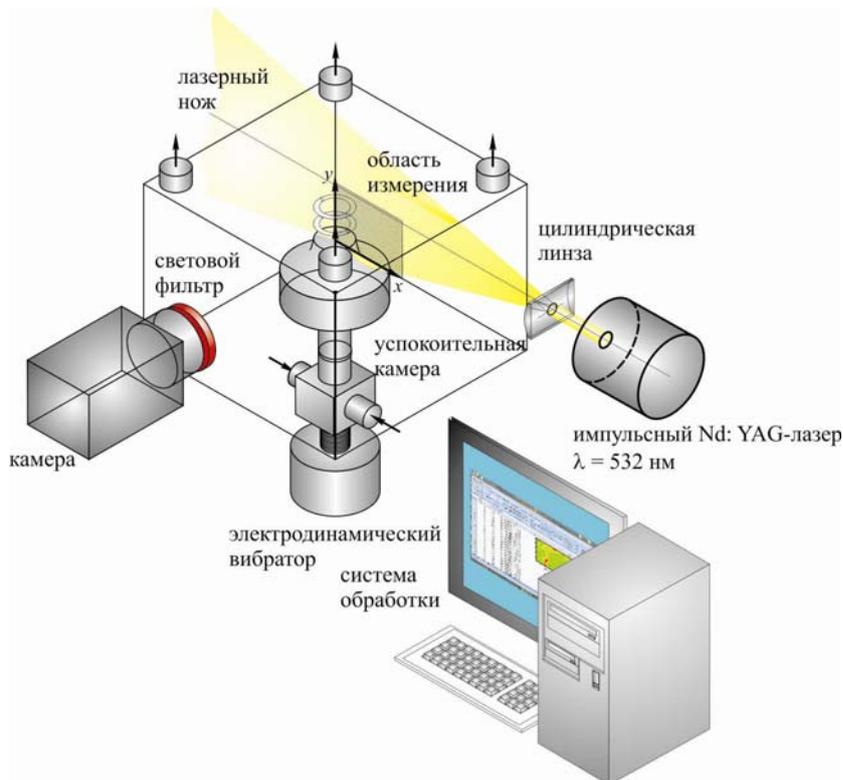


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

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 $\mathbf{V}(x_i, y_i)$ 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) $I_{\text{гр}} = 0,2 \cdot I_{\text{max}}$, позволяющее четко идентифицировать вихри. Форма вихревых тороидальных структур в плоскости лазерного ножа близка к круговой ($d_V \approx 4$ мм). Размер согласуется с критериями [10]. 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.

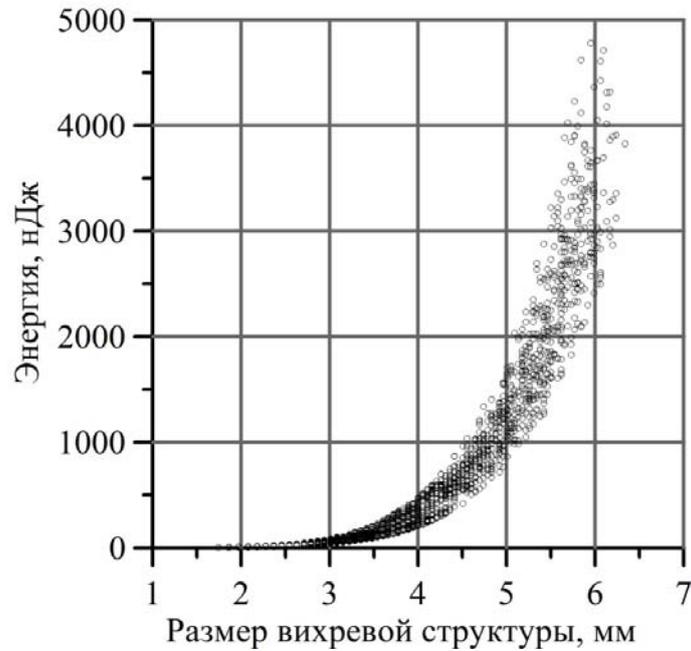


Рис. 2. Зависимость кинетической энергии вихревого движения от размера вихревой структуры

Кинетическая энергия, заключенная в сечении вихревого образования толщиной $l = x_i - x_{i-1} = y_i - y_{i-1}$, может быть рассчитана по формуле [17]

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

где ρ – плотность жидкости, x_0, y_0 – координаты центра вихревой структуры. Суммирование ведется по области, занимаемой вихрем.

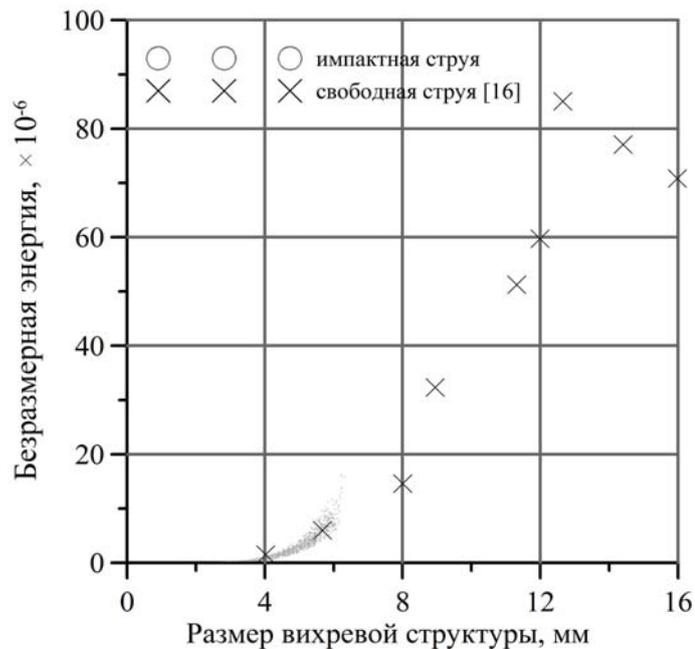


Рис. 3. Зависимость безразмерной энергии от диаметра вихревой структуры

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 показано распределение вихрей по энергиям в зависимости от размера, определяемого пороговым значением завихренности. Видно, что в изучаемой области рост размера связан с ростом энергии степенной зависимостью, как отмечалось в работе [16]. Сравнение зависимости энергии, нормированной на среднюю энергию потока, от размера вихревой структуры, с данными [16] проводится на рис. 3. Подобие результатов служит косвенным подтверждением адекватности используемого анализа.

На рис. 4 приведено пространственное распределение областей локализации вихревых структур. Вследствие симметрии струи рассматривается только ее правая половина. Центр струи соответствует координате $x = 4,77$ мм; импактная поверхность – $y = 43,3$ мм; край сопла – координатам $x = 12,25$ мм, $y = 13,3$ мм.

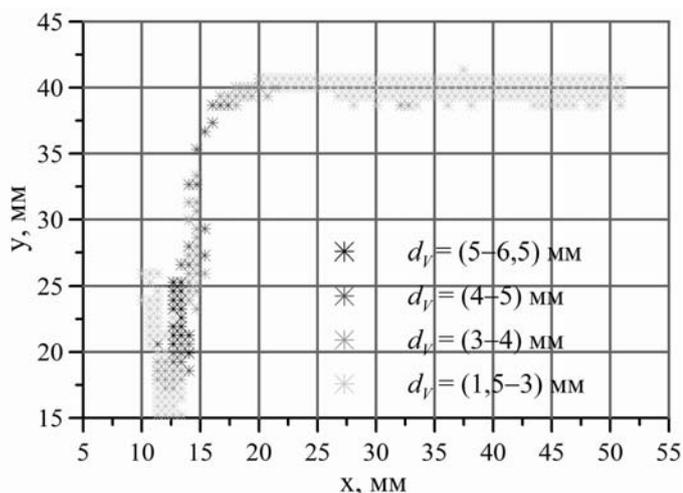


Рис. 4. Пространственная локализация вихревых структур в зависимости от размера

Вблизи сопла размер вихрей минимален, минимальна и их энергия. Вниз по потоку вихри увеличиваются в размерах, достигая максимума при $y = (20 - 25)$ мм. Далее, вихри постепенно уменьшаются в размерах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение можно сделать несколько выводов. С применением метода трассерной визуализации (PIV) изучены энергетические свойства вихревых образований в осесимметричной затопленной струе. Соответствие результатов (рис. 3) данным [16], говорит об эффективности анализа картин мгновенной завихренности при диагностике крупномасштабных когерентных структур в данной постановке. Пространственная локализация вихревых структур с различной энергией (рис. 4) согласуется с классической моделью эволюции вихрей [1, 3, 4] в струйных течениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дыбан Е. П., Мазур А. И. Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел. - Киев: Наук. думка, 1982. - 303 с.
2. Hussein H. J., Capp S. P., George W. K. Velocity Measurements in a High Reynolds Number, Momentum-Conserving Axisymmetric Turbulent Jet // J. Fluids Mech. - 1994. - № 258. - P. 31 - 75.
3. Гиневский А. С., Власов Е. В., Колесников А. В. Аэроакустические взаимодействия. - М.: Машиностроение, 1978. - 177 с.
4. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. - М.: Дрофа, 2003. - 840 с.

5. **Bradshaw P., Ferriss D. H., Johnson R. F.** Turbulence in the noise-producing region of a circular jet // J. Fluid Mech. - 1964, v. 19, № 4. - P. 591 - 624.
6. **Donaldson C., Snedeker R., Margolis A.** A study of free jet impingement heat transfer: Pt 2. Free jet turbulent structure and impingement heat transfer // J. Fluid Mech. - 1971, v. 45, № 3, P. 477 - 512.
7. **Gibson M. M.** Spectra of turbulence in a round jet // J. Fluid Mech. - 1963, v. 15, № 2, P. 161 - 173.
8. **Ko N. W., Davies P. O.** The near field within the potential cone of subsonic cold jets // J. Fluid Mech. - 1971, v. 50, № 1, P.49 - 78.
9. **Raffel M., Willert C., Kompenhans J.** Particle image Velocimetry: A practical guide. - Berlin: Springer, 1998.
10. **Jeong J., Hussain F.** On the identification of a vortex // J. Fluid Mech. - 1999, v. 285, P. 69 - 94.
11. **Perry A. E., Chong M. S.** A description of eddying motions and flow patterns using critical-point concepts // Ann. Rev. Fluid Mech. - 1987, v.19, P.125 - 155.
12. **Hussain A. K. M. F.** Coherent structures and turbulence // J Fluid Mech. - 1986, v. 173, P. 303 - 356.
13. **Robinson S. K., Kline S. J., Spalart P. R.** Quasi-coherent structures in the turbulent boundary layer – II: Verification and new information from a numerically simulated flat-plate boundary layer. In: S. J. Kline, N. H. Afgan (eds.). Near wall turbulence, Proceedings of Zanic memorial conference, New York, 1989, P. 218 - 247.
14. **Chhabra S., Hug P., Prasad A.** Characteristics of Small Vortices in a Turbulent Axisymmetric Jet // Journal of Fluid Engineering. - 2006, v. 128, P. 439 - 445.
15. **Agrawal A., Prasad A. K.** Properties of Vortices in the Self-Similar Turbulent Jet // Exp. Fluids. - 2002, v. 33, P. 565 – 577.
16. **Agrawal A., Prasad A. K.** Measurements within Vortex Cores in a Turbulent Jet // ASME J. Fluids Eng. - 2003, v. 125, P. 561 - 568.
17. **Белоусов А. П.** Влияние дисперсной фазы на турбулентную структуру осесимметричной затопленной импактной струи // Теплофизика и аэромеханика. - 2008, т. 15, № 3, С. 435 - 440.

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*

ENERGY PROPERTIES OF LARGE-SCALE VORTICAL STRUCTURES IN AXISYMMETRIC SUBMERGED IMPINGING JET

The vortical structures dynamic in axisymmetric impinging jet is experimentally evaluated. Instance velocity field and vorticity are measured by PIV method. Vortical structures energy is calculated. Vortical structures space localization depending on energy is detected.

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