

А. А. Гусейнов^{1,2}, Д. В. Литвинова^{1,2}, А. Ю. Кравцова^{1,2}✉

Юстировка комплекса цифровой трассерной визуализации для исследований течений жидкости в микроканалах с препятствиями

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

² Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: kravtsova.alya@gmail.com

Аннотация. Юстировка комплекса цифровой трассерной визуализации позволяет добиться качественной визуализации картины гидродинамики течения жидкости в микрофлюидных каналах с цилиндрическим телом обтекания при скорости течения до 20 м/с.

Ключевые слова: цифровая трассерная визуализация, микроканал, цилиндрическое тело обтекания, поле скорости

A. A. Guseinov^{1,2}, D. V. Litvinova^{1,2}, A. Y. Kravtsova^{1,2}✉

Alignment of the particle image velocimetry equipment for investigations of the fluid flows in microchannels with bluff body

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: kravtsova.alya@gmail.com

Abstract. Adjustment of the particle image velocimetry equipment allows achieving high-quality visualization of the hydrodynamic picture of the fluid flow in microfluidic channels with a cylindrical body at a flow velocity of up to 20 m/s.

Keywords: particle image velocimetry, microchannel, circular cylinder, flow velocity

Введение

Метод цифровой трассерной визуализации (Particle Image Velocimetry – PIV) основывается на отслеживании движения мельчайших частиц-трассеров, равномерно распределенных в исследуемом потоке жидкости или газа. Эти частицы освещаются лазерным импульсом, сформированным в тонкий лазерный «нож», расположенный в плоскости наблюдения. Высокоскоростные камеры фиксируют последовательные изображения освещенных трассеров с минимальной временной задержкой между кадрами. Анализируя смещение частиц между последовательными изображениями, можно определить мгновенные поля скоростей в плоскости лазерного сечения.

Изучение кавитации в микромасштабах до сих пор является сложной задачей. Традиционным методом исследования является высокоскоростная теневая визуализация [1], позволяющая определять режимы кавитационного течения и, иногда, возникновение неустойчивостей в потоке. Зачастую, для более глубокого понимания процессов, происходящих в небольших объемах жидкости, нужны

количественные характеристики, такие как средняя скорость потока, пульсационная составляющая скорости и т.д. Метод цифровой трассерной визуализации может стать одним из эффективных и простых методов исследования кавитационных течений [2].

Актуальность исследования определяется необходимостью более глубокого осмысления и анализа сложных процессов, применимых в современных научных и технических областях [3-5]. Метод трассерной визуализации представляет собой надежный инструмент, позволяющий исследовать динамику потоков жидкостей и газов, что имеет ключевое значение для решения экологических, инженерных и медицинских задач [6, 7]. В условиях глобальных изменений климата и загрязнения окружающей среды возможность отслеживать перемещение загрязняющих веществ становится особенно актуальной для разработки эффективных стратегий охраны экосистем.

Кроме того, с развитием технологий и методов обработки данных, трассерная визуализация открывает новые горизонты для оптимизации инженерных процессов и повышения их эффективности. Измерение скорости потока до десятков метров в секунду в каналах малого размера требует дальнейшего развития метода цифровой трассерной визуализации. В статье описана юстировка комплекса цифровой трассерной визуализации для исследования потоков жидкости в каналах микронного размера.

Параметры экспериментального стенда

Изучение свойств движения жидкости в каналах микронного размера как в условиях кавитации, так и в докавитационных режимах течения проводится на гидродинамическом стенде исследования многофазных и критических течений Института теплофизики. Стенд включает в себя различные компоненты. Основным оптическим прибором установки является инвертированный люминесцентный микроскоп производства АО «ЛОМО» г. Санкт-Петербург. В микроскоп входят набор объективов $\times 4 \dots \times 40$, блоки светофильтров UV, V, G, два оптических входа для осветителей и видео тубус. Канал микронного размера устанавливается на предметный столик микроскопа. Глубина канала составляет 200 мкм, ширина 2 мм, длина 5 см. В центральной части канала находится тело цилиндрической формы высотой 200 мкм и диаметром 1 мм. Скорость жидкости варьировалась в диапазоне от 0,01 м/с до 20 м/с. Поведение потока жидкости вблизи тела обтекания представляет наибольший интерес для исследования.

Для измерения количественных характеристик потока в микроканале была проведена юстировка комплекса цифровой трассерной визуализации.

Методика измерений

Для исследования скоростных характеристик потока жидкости в каналах микронного размера использован метод цифровой трассерной визуализации. Принцип метода заключается в следующем. В жидкость добавляются флуоресцентные трассерные частицы размером 2 мкм нейтральной плавучести [8]. В качестве источника светового излучения использовался импульсный лазер

Beamtech Vlite-Ni с излучателем Nd:YLF, длительность лазерного импульса (~200 нс), энергия импульса в пучке 20 мДж. Частота повторения импульсов до 10 кГц. Минимально возможная частота повторения импульсов 200 Гц. Длина волны светового излучения составляла 527 нм («зеленый» световой диапазон). Свет, попадая на трассерные частицы, отражается от них в «красном» световом диапазоне с длиной волны около 645 нм, после чего фиксируется на камере.

Для фиксации картины движения частиц требуется использовать скоростные камеры с хорошим матричным разрешением (2048x2048 Мпикс) и разрядностью более 8 бит. В исследовании использовалась камера Photron fastcam s12. Максимальная частота съемки составляет 1 000 000 к/с. Камера и лазер управлялись специальным программным обеспечением с помощью компьютера. Работа лазера и камеры должна быть синхронизирована с точностью до 1 нс. Для решения этой проблемы была проведена оценка физической задержки открытия затвора камеры и лазера. Полученные задержки были учтены в программе управления синхронизатором.

Для того, чтобы иметь возможность исследовать течение жидкости в каналах микронного размера, расположенных на столике микроскопа, измерительная система цифровой трассерной визуализации была внедрена в микроскоп. Для доставки лазерного излучения к исследуемому объекту система лазерного излучения была дополнена «рукой», с длиной световода 1,8 м, а также оптической системой позволяющей рассеивать пучок в 1,3 раза. Далее лазерный свет проходит по оптическому пути внутри микроскопа и через объектив засвечивает микроканал. Яркий отраженный свет также проходит через объектив микроскопа и по оптическому пути попадает на матрицу камеры, что позволяет зафиксировать точное положение трассерных частиц в потоке. Далее с помощью расчета последующих смещений частиц была получена картина распределения скоростей потока жидкости. Измерение мгновенного поля скорости потока основано на вычислении смещения трассерных частиц, находящихся в плоскости лазерного ножа. Обработка изображений в программном обеспечении «Actualflow» позволяет рассчитать смещения частиц за время между вспышками источника света и построить двумерное поле скорости.

Обработка экспериментальных данных

Для расчета двумерного поля скорости на первом этапе обработки проводилось вычитание среднего по интенсивности изображения, рассчитанного по серии из 1000 изображений. Эта процедура позволяет компенсировать неоднородность экспозиции изображения для кадров, удалить блики с изображений. Далее изображение разбивалось на расчетные области. Было рассмотрено два типа расчетных областей: квадратные 128x128 и 64x64 пикселя, а также расчетные области, вытянутые вдоль по потоку 256x128, 128x64 пикселя. Перекрытие расчетных областей составляло 50% и 75%. Поля мгновенной скорости рассчитывались с помощью итерационного кросскорреляционного алгоритма с непрерывным смещением и деформацией элементарных расчетных ячеек. Подпиксельная интерполяция кросскорреляционного пика осуществлялась по трем точкам с ис-

пользованием одномерной аппроксимации функцией Гаусса. По результатам полученных расчетов было установлено, что оптимальным размером расчетной ячейки для каналов микроразмера являются прямоугольные области, и перекрытие расчетных областей должно составлять 50%. Поля скорости с такими расчетными ячейками имеют относительно низкий уровень шума и высокое пространственное разрешение.

Заключение

Было показано, что юстировка комплекса цифровой трассерной визуализации со скоростным короткоимпульсным лазером и высокоскоростной камерой с высокими техническими характеристиками, такими как короткое время экспозиции (~200 нс), микроскопом и сложным световым путем, позволяет добиться качественной визуализации картины гидродинамики течения жидкости в микрофлюидных каналах с цилиндрическим телом обтекания при скорости течения до 20 м/с.

Благодарности

Исследование выполнено за счет средств государственного задания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lobasov A. S., Skripkin S. G., Tsoy M. A., Kravtsova A. Y. Investigation of the cavitation processes behind a cylinder located in a microchannel in a wide range of Reynolds numbers // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022. V. 38. P. 102306.
2. Keane R. D., Adrian R. J., Zhang Y. Super-resolution particle image velocimetry // *Meas. Sci. Technol.*, 1995. V. 6, P. 754–768.
3. Roetmann K., Schmunk W., Garbe C. S., Beushausen V. *Exp. Fluids*. 2008. V. 44. P. 419–430.
4. Sinton D. *Microfluidics and Nanofluidics*. 2004. V. 1. P. 2–21.
5. Santiago J. G., Wereley S. T., Meinhart C. D., Beebe D. J., Adrian R. J. *Exp. Fluids*. 1998. V. 25. P. 316–319.
6. Hoffmann M., Schluter M., Fabiger N. R. *Chemical Engineering Science*. 2006. V. 61. P. 2968–2976.
7. Hoffmann M., Schluter M., Rabiger N. *Chemie Ingenieur Technik*. 2007. V. 79. P. 1067–1075.
8. Kravtsova A. Yu. Visualization of Flow Regimes in Symmetric Microchannel in Case of Different Inlet Flowrate Ratios for Fixed Outlet Reynolds Number // *Journal of Engineering Thermophysics* Vol. 29, No. 4, 2020.

© А. А. Гусейнов, Д. В. Литвинова, А. Ю. Кравцова, 2025