

Д. А. Ланшаков^{1,2}, Д. В. Куликов¹, С. В. Двойнишников¹, А. Ю. Кравцова^{1,2}*

Применение метода лазерной анемометрии для исследования течений в щелевых зазорах

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

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: kravtsova.alya@gmail.com

Аннотация. В работе показана возможность применения метода лазерной доплеровской анемометрии к исследованию многофазных течений в щелевых каналах характерного размера 1 мм. Отработана методика получения профилей скоростей потока в узких каналах.

Ключевые слова: лазерная доплеровская анемометрия, щелевой канал, многофазный поток, пороговый метод фильтрации

D. A. Lanshakov^{1,2}, D. V. Kulikov¹, S. V. Dvoinishnikov, A. Y. Kravtsova^{1,2}*

Adaptation of the Laser Anemometry Method to Study of Flows in Slit Channels

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

² Novosibirsk National Research State University, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: kravtsova.alya@gmail.com

Abstract. The adaptation of the method of laser Doppler anemometry to the study of multiphase flows in slit channels of characteristic size of 1 mm has been carried out in the paper. The method of obtaining flow velocity profiles in slit channels has been developed.

Keywords: laser Doppler anemometer, slit channel, multiphase flow, threshold filtration method

Введение

Несмотря на кажущуюся простоту, определение количественных закономерностей течения многофазных жидкостей в зазорах с малым размером является трудной задачей. Распространенной техникой точечного измерения скоростей течения жидкости и газа являются бесконтактные методы диагностики потоков, такие как, лазерная доплеровская анемометрия (ЛДА). Первый прототип современной ЛДА системы в однолучевом режиме был представлен еще в 1964 году [1] и уже после в двухлучевом режиме [2–3]. Позднее была показана эффективность применения метода ЛДА для турбулентных течений [4]. При пересечении двух когерентных лазерных лучей формируется измерительный объем. Трассерные частицы, пересекая измерительный объем, переизлучают модулированный свет в соответствии с темными и светлыми полосами интерференционной картины, что позволяет, зная расстояния между полосами, рассчитать нормальную составляющую скорости трассера [5–9]. Feng и соавторы использовали

систему ЛДА для измерения распределений скорости в гидротехническом оборудовании [10]. Аналогичные исследования были проведены Pedersen и соавторами [11] и Wuibaut и соавторами [12]. Zhang и соавторы измерили скорость пульсаций центробежного насоса с помощью ЛДА, одновременно отбирая образцы пульсации давления [13]. Liu и соавторы [14] определили частотные характеристики потока уже вблизи крыла. Используя ЛДА, Danlos и соавторы [15] получил значения скорости потока жидкости в пограничном слое сопла Вентури для докавитационных потоков и в ближней области возникновения второй фазы. При этом измерения скорости в пограничном слое при возникновении второй фазы не проводилось. Все вышеперечисленные работы были выполнены для турбулентных течений в трехмерной конфигурации. Работ по анализу характеристик скорости жидкости в щелевых каналах с помощью метода ЛДА практически нет. Поэтому, в данной работе мы сосредоточили свое внимание на адаптации метода ЛДА для исследования потоков жидкости в щелевых каналах.

Экспериментальная установка

Для проведения измерений скорости потока в щелевом канале методом ЛДА использовался экспериментальный стенд с замкнутым гидродинамическим контуром (рис. 1). Щелевой зазор представляет собой канал длиной $l = 276$ мм, шириной $w = 120$ мм и высотой $h = 1,2$ мм. Внутри щелевого канала располагается крыло. Хорда крыла, C , составляет 70 мм. Размах совпадает с шириной щелевого зазора. Крыло выполнено по полиному четвертой степени и соответствует профилю аэродинамического крыла NACA0012.

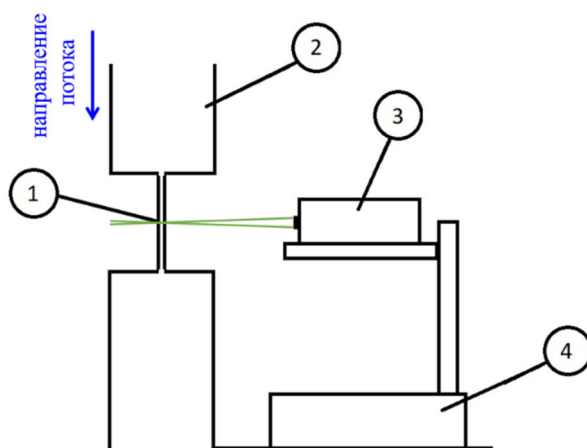


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – щелевой канал, 2 – подводной канал, 3 – лазерная доплеровская измерительная система ЛАД-080, 4 – координатно-перемещающее устройство

В ходе экспериментальных исследований среднерасходная скорость потока варьировалась и составляла 14,16, 16,21, 18,67 м/с. Число Рейнольдса, рассчитанное по среднерасходной скорости, U_0 , характерному размеру тела обтекания, C , и кинематической вязкости, ν , $Re = C \cdot U_0 / \nu$ составляет $\sim 10^6$.

Методика измерений

В проводимых исследованиях использовалась двухкомпонентная система ЛДА – «ЛАД 080». Она сконструирована на базе полупроводникового лазера Mitsubishi ML1013R с длиной волны 684 нм (красный цветовой диапазон) и мощностью 70 мВт (рис. 1 «3»). При экспериментальных измерениях анемометр устанавливается на автоматическое координатно-перемещающее устройство (рис. 1 «4»), минимальный шаг позиционирования которого 0,1 мм. В ЛАД 080 реализована двухчастотная дифференциальная оптическая схема, основанная на ячейке Брэгга с 80 МГц частотным сдвигом, фокусное расстояние объектива 500 мм, а размер измерительной области в воде $0,1 \times 0,1 \times 0,5$ мм. В качестве трассеров в экспериментах используются полиамидные частицы нейтральной плавучести и светорассеивающие частицы естественного происхождения. ЛДА позволяет поочередно измерять продольную и поперечные компоненты вектора скорости при перемещении позиционирующего устройства с шагом 0,1 мм. Согласно техническому паспорту ЛАД 080, точность измерения средней скорости составляет 0,5%.

Для измерения продольной компоненты скорости потока в щелевом канале выполнялась настройка измерительного оборудования согласно следующему алгоритму. Анемометр позиционировался на координатном устройстве на расстоянии приблизительно 450 мм от измерительной области. На пути лазерного луча находилась стенка канала, выполненная из полиметилметакрилата толщиной 20 мм. Проводя микроперемещения ЛДА ближе-дальше по направлению высоты щелевого канала, определялись границы канала по характерному падению значения скорости. Для корректного измерения значений выбирается центральная область канала. Измерительный объем позиционировался поперек канала и составлял третью часть высоты канала.

Построение сетки координат измеряемых точек велось с учетом расположения тела обтекания в щелевом канале, таким образом, чтобы в области градиентных течений сетка была чаще, в области равномерных течений – реже. Нулевой координатой является область передней кромки крыла (рис. 2).

При работе установки на высоких скоростях потока амплитуда вибраций стенок щелевого канала начинает достигать больших значений. Стенки канала попадают в измерительный объем, порождая шумовые эффекты с абсолютным значением до 2 м/с при измерении значений скорости потока. Такие данные были успешно отфильтрованы пороговым методом, так как основная скорость потока составляет порядка 9–11 м/с.

При проведении измерений в многофазных потоках в качестве трассерных частиц также выступают небольшие пузырьки парогазовой полости. Такие пузырьки, помимо того, что движутся вместе с потоком, имеют свою скорость всплытия за счет выталкивающих сил. Скорость их всплытия зависит от диаметра пузырька и в нашей задаче не превышала 0,1 м/с. Таким образом, скорость всплытия пузырька соотносится как 1/100 к скорости течения жидкости в щелевом канале, что является малой величиной и соответствует погрешности измерений метода.

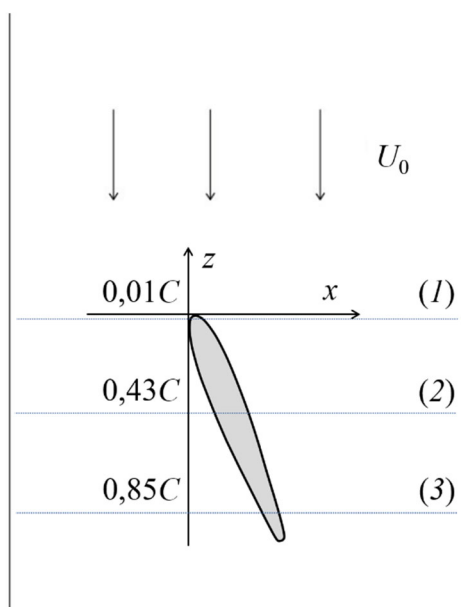


Рис. 2. Схема щелевого канала с сеткой координат измеряемых точек (1), (2) и (3)

Каждая точка в профилях скорости потока получена с осреднением 1000 измерений.

Результаты

В разделе представляются экспериментальные результаты измерения профилей продольной составляющей средней скорости потока, полученные методом ЛДА в щелевом канале.

На рис. 3 профиль продольной составляющей средней скорости получен на расстоянии $0,01C$ от передней кромки крыла. Область разрыва профиля соответствует области расположения крыла в щелевом зазоре. Над профилем скорость потока составляет в максимуме 14 м/с, а под профилем 9 м/с, что соответствует реальным значениям.

В центральной области крыла, методом ЛДА был получен ряд точек в пограничном слое (рис. 4), в области возникновения второй фазы в потоке жидкости. Отметим, что вблизи границы крыла скорость потока принимает противоположный знак относительно основного течения жидкости. Такое изменение является полностью корректным. Вблизи стенки крыла возникает так называемое возвратное течение, и это течение реализуется большую часть времени.

Толщина пограничного слоя в значительной степени увеличивается с увеличением расстояния от передней кромки крыла (рис. 5). В области задней кромки она составляет порядка 30 мм. Скорость потока в этой области значительно меньше скорости основного потока, что является полностью физическим и показывает корректность полученных методом ЛДА данных для щелевого зазора с расположенным в нем крылом.

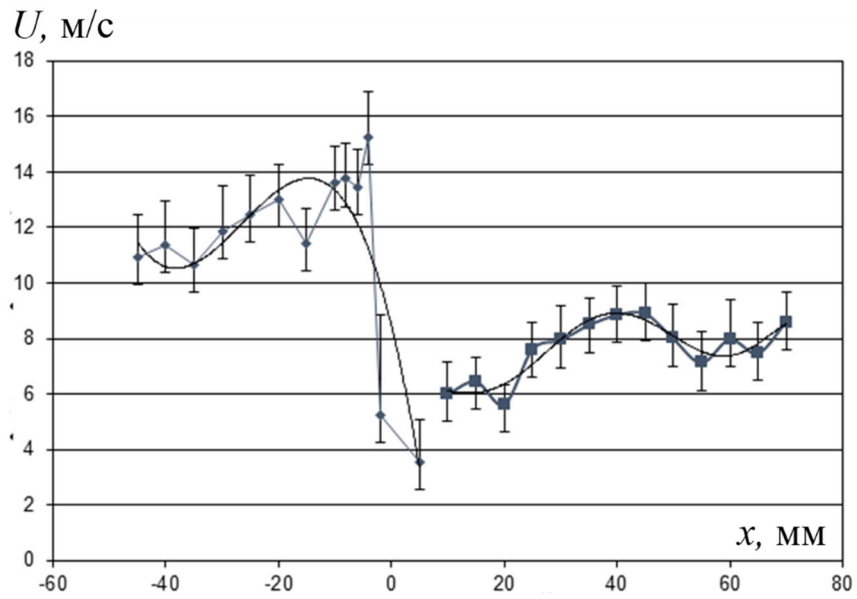


Рис. 3. Профиль продольной составляющей средней скорости потока в области передней кромки крыла, полученный на расстоянии 0,01С

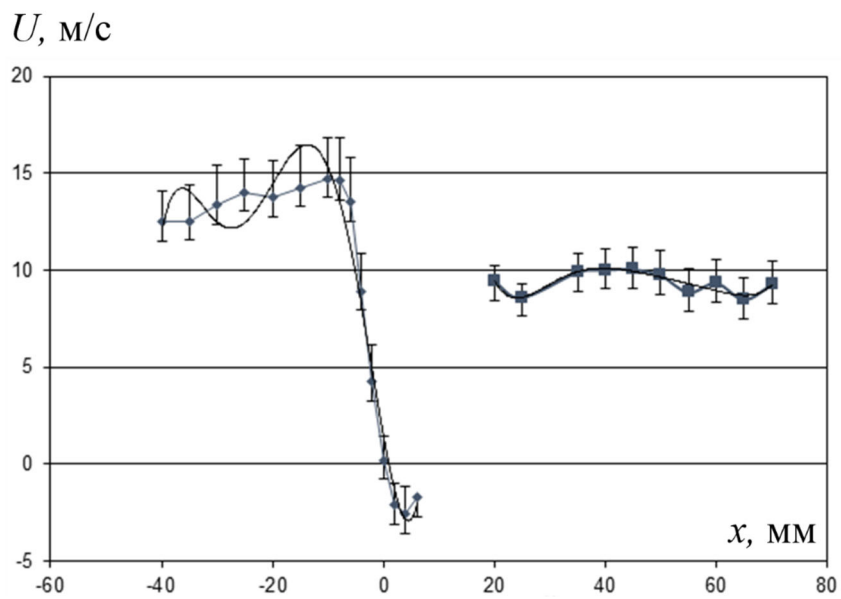


Рис. 4. Профиль продольной составляющей средней скорости потока в центральной области крыла, полученный на расстоянии 0,43С

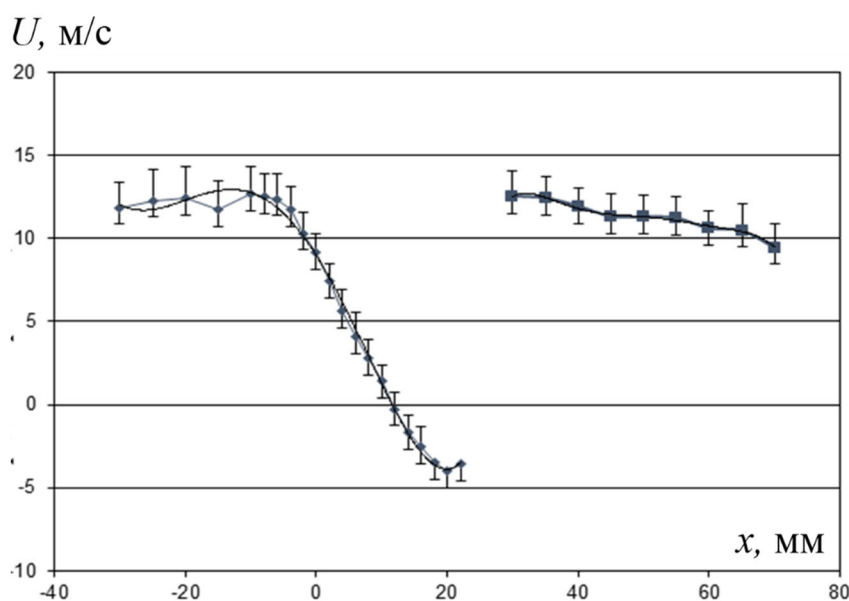


Рис. 5. Профиль продольной составляющей средней скорости потока в области задней кромки крыла, полученный на расстоянии 0,85С

Заключение

По результатам работ показана возможность применения метода лазерной доплеровской анемометрии к исследованию течений в щелевых каналах характерного размера 1 мм. Отработана методика получения профилей скоростей потока в щелевых зазорах с погрешностью измерения, не превышающей 0,5%.

По результатам измерений, получены профили продольных компонент средней скорости потока в различных сечениях щелевого канала. Показано, что измерения с помощью метода ЛДА позволяют отразить реальную картину течения вблизи крыла, а также получить значения скорости в пристеночной области обтекаемого объекта при возникновении второй фазы в потоке.

Благодарности

Исследование выполнено за счет средств государственного задания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yeh Y., Cummins H. Z. Localized fluid flow measurements with an HeNe laser spectrometer // Appl. Phys. Lett. – 1964. – V. 4. – P. 176–178.
2. Vom Stein H. D., Pfeifer H. J. A Doppler difference method for velocity measurements // Metrologia. – 1969. – V. 5. – P. 59–61.
3. Дубнищев Ю. Н., Арбузов В. А., Белоусов П. П., Белоусов П. Я. Оптические методы исследования потоков // Сибирское университетское издательство. 2003.
4. Климов А. В., Меледин В. Г., Аникин Ю. А., Куликов Д. В., Кротов С. В., Кабардин И. К. Спектральный метод детектирования сигналов лазерного доплеровского измерителя скорости турбулентных потоков // Автометрия. – 2018. – Т. 54. – №3. – С. 85–93.
5. Kabardin I. K., Kolotilov V. V., Usov E. V., Yavorsky N. I., Kabardin A. K., Kakaulin S. V., Gordienko M. R., Polyakova V. I., Pravdina M. K., Derzho O. G. Features of Setting Boundary Conditions in Problems of Modeling Turbulent Gas Motion in Turning-and-Expanding Flow for k-ε

Turbulence Model and Reynolds Stress Transfer Model // Journal of Engineering Thermophysics. – 2021. – V. 30. – №2. – P. 317–323.

6. Kabardin I. K., Klimonov I. A., Usov E. V., Yavorsky N. I., Kabardin A. K., Kakaulin S. V., Ezendeeva D. P., Gordienko M. R., Polyakova V. I., Pravdina M. H. Calculation-Experiment Study of Gas Motion in Controlled Turning-and-Diverging Flow // Journal of Engineering Thermophysics. – 2020. – V. 29. – №3. – P. 393–401.

7. Meledin V. и др. Laser Doppler semiconductor anemometry of vortex flow behind the vane wheel rotor of the water turbine // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering (ред. Dubnistchev, Y. N. & Rinkevichyus, B. S.). 2006. – V. 6262 2620G–11.

8. Sadbakov O. и др. Laser Doppler Diagnostics of Flow Structure Downstream of Hydroturbine Blade Wheel at Optimal and Forced Loads // Thermophys and aeromechanics. – 2004. – V. 11. – P. 561–566.

9. Zhang Z. Optical guidelines and signal quality for LDA applications in circular pipes // Exp. Fluids. – 2004. – V. 37. – P. 29–39.

10. Feng J. J.; Benra F. K.; Dohmen H. J. Investigation of periodically unsteady flow in a radial pump by CFD simulations and LDV measurements // ASME J. Turbomach. – 2011. – V. 133. – P. 011004.

11. Pedersen N.; Larsen P. S.; Jacobsen C. B. Flow in a centrifugal pump impeller at design and off-design conditions – Part I: Particle image velocimetry (PIV) and laser Doppler velocimetry (LDV) measurements // ASME J. Fluids Eng. – 2003. – V. 125. – P. 61–72.

12. Wuibaut G.; Bois G.; Hajem M. E.; Akhras A.; Champagne J. Y. Optical PIV and LDV comparisons of internal flow investigations in SHF impeller // Int. J. Rotating Mach. – 2006. – V. 20006. – P. 069521.

13. Zhang, N.; Zheng, F.K.; Liu, X.K.; Gao, B.; Li, G. Unsteady flow fluctuations in a centrifugal pump measured by laser Doppler anemometry and pressure pulsation // Phys. Fluids. – 2020. – V. 32. – P. 125108.

14. Liu H., Lin P., Tang F., Chen Y., Zhang W., Yan S. Experimental Study on the Relationship Between Cavitation and Lift Fluctuations of S-Shaped Hydrofoil // Frontiers in Energy Research. – 2021. – V. 9. – P. 813355.

15. Danlos A., Mehal J.-E., Ravelet F., Coutier-Delgosha O., Bakir F. Study of the cavitating instability on a grooved Venturi profile // ASME J. Fluids Eng. – 2014. – V. 136 (10). – P. 101302.

© А. А. Ланшаков, Д. В. Куликов, С. В. Двойнишников, А. Ю. Кравцова, 2023