

*Д. А. Ланшаков<sup>1,2</sup>, А. Ю. Кравцова<sup>1,2\*</sup>, Д. В. Куликов<sup>1</sup>, С. В. Двойнишников<sup>1,2</sup>*

## **Развитие метода лазерной анемометрии для исследования течений в щелевых зазорах**

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

<sup>2</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: [kravtsova.alya@gmail.com](mailto:kravtsova.alya@gmail.com)

**Аннотация.** Проведено развитие метода лазерной анемометрии для исследования течений жидкости в щелевых зазорах. Развитие метода включало в себя более глубокую фильтрацию экспериментального сигнала, содержащего флуктуации и шум. Производилась обработка сигнала по соотношению сигнал/шум. Применялись фильтры скользящего среднего и статистический критерий  $3\sigma$ , после чего проводилось осреднение сигнала. Такой подход позволил увеличить точность получаемых значений скорости потока. Погрешность измерений составила менее 1%.

**Ключевые слова:** метод лазерной анемометрии, методики фильтрации, фильтр скользящего среднего, статистические критерии

*D. A. Lanshakov<sup>1,2</sup>, A. Y. Kravtsova<sup>1,2\*</sup>, D. V. Kulikov<sup>1</sup>, S. V. Dvoinishnikov<sup>1,2</sup>*

## **Development of the Laser Anemometry Method for Studying Flows in Slit Gaps**

<sup>1</sup> Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Novosibirsk National Research State University, Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: [kravtsova.alya@gmail.com](mailto:kravtsova.alya@gmail.com)

**Abstract.** The development of the laser anemometry method for the study of fluid flows in slit gaps was carried out. The development of the method included deeper filtering of the experimental signal containing fluctuations and noise. Signal processing was performed on the basis of signal-to-noise ratio. And moving average filters and  $3\sigma$  statistical criterion were applied. After that the signal was averaged. This approach allowed to increase the accuracy of the obtained values of flow velocity. The measurement error was less than 1%.

**Keywords:** laser anemometry method, filtering techniques, moving average filter, statistical criteria

### ***Введение***

Исследования различных типов течений жидкости и газа проводятся во многих направлениях. Подтверждение математических моделей с помощью проведенных экспериментов является одной из основных причин практических исследований. Также, изучение новых типов течений позволяет не только уточнить уже существующие математические типы задач, но и приводит к новым практическим и теоретическим задачам.

Изучение гидродинамических течений с помощью различных методов влечет за собой отслеживание возникновения новых течений и/или устойчивости гидродинамической задачи в рамках заданного времени. Некоторые методы могут позволить получить значения скоростей и давлений в различных областях исследуемого стенда. Мы будем рассматривать методологический способ изучения гидродинамики кавитационного течения в щелевых каналах.

Самым распространенным методом исследования кавитационного течения является высокоскоростная визуализация [1]. Этот метод дает визуальное представление о течении, предоставляет возможность наблюдать возникновение кавитации, что облегчает задачу описания изучаемого типа кавитации. Однако, данный метод имеет ряд недостатков для анализа параметров течения: нет никаких количественных оценок размеров кавитационных полостей и изменения профиля скорости в области тела обтекания.

Более универсальным методом исследования является оптический метод диагностики потока – метод цифровой трассерной визуализации. Данный метод позволяет проводить измерения мгновенных полей скорости потока в выбранном сечении. Основа метода состоит в том, что светорассеивающие частицы, находящиеся в плоскости течения, фиксируются электронно-цифровой камерой, в течение короткого промежутка времени. Областью измерения является плоскость, подсвеченная лазерным световым ножом. Частицы, попадающие в эту область, освещаются дважды за короткий промежуток времени, что позволяет отслеживать их перемещение. Каждое изображение фиксируется на фотографическую или электронную (цифровую) камеры. После этого изображения обрабатываются с использованием кросс-корреляционной функции, для того чтобы определить направление перемещения частиц и значение скорости. В итоге, для каждого двойного изображения получается двухкомпонентное мгновенное поле скорости потока. Далее, зачастую, проводится усреднение полученных мгновенных полей скорости для минимизации погрешности измерений [2–3]. Ключевыми недостатками являются обязательное наличие светорассеивающих частиц в потоке и необходимость в двух оптических доступах.

В рамках данной работы была поставлена задача провести исследование в щелевом канале методом лазерной доплеровской анемометрии с использованием экспериментального стенда – кавитационного туннеля.

Лазерные доплеровские анемометры широко используются для бесконтактного исследования динамики жидкостей и газов. Практические реализации данных измерений находят себя в различных областях, таких, как исследование характера движения жидкостей в капиллярах живых организмов, определение скорости колеблющихся нитей малых характерных размеров на дугообразном контуре [4] и измерение размеров капель аэрозоля в промышленности [5–6]. В сравнении с методом PIV лазерная доплеровская анемометрия обладает лучшей пространственной локализацией и лучшим временным разрешением.

## ***Параметры экспериментального стенда***

Измерение скоростных характеристик потока проводилось на кавитационном гидродинамическом стенде замкнутого типа. Кавитационная полость возникла в области крыла, расположенного в узком щелевом канале. Щелевой канал имеет высоту  $h = 1,2$  мм, ширину  $w = 120$  мм и длину  $l = 276$  мм. Крыло выполнено по полиному четвертой степени и соответствует профилю аэродинамического крыла NACA0012. Длина хорды крыла,  $C$ , равна 70 мм. Размах крыла составляет 1,2 мм и совпадает с шириной щелевого зазора. Подробное описание установки можно найти в работе Skripkin et al. 2022 года [7]. Для измерения скорости потока вблизи крыла NACA0012 в щелевом зазоре была проведена адаптация системы лазерной доплеровской анемометрии, которая после использовалась для диагностики течения.

### ***Методика измерений***

Система лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА) – «ЛАД 080» состоит из двухкомпонентного анемометра и координатно-перемещающегося устройства. В ходе экспериментальных исследований анемометр располагается на автоматическом координатно-перемещающем устройстве. Шаг позиционирования устройства составляет 0,1 мм, что позволяет проводить измерения с высокой точностью. В анемометре реализована двухчастотная дифференциальная оптическая схема с 80 МГц частотным сдвигом. Объектив имеет фокусное расстояние от 450 мм до 550 мм. Размер измерительной области в воде  $0,1 \times 0,1 \times 0,5$  мм. В работе были проведены измерения продольной и поперечной компоненты скорости кавитационного потока. Погрешность измерений не превышала 0,5%.

### ***Извлечение и обработка профилей в щелевом канале***

В данном разделе описан ход извлечения и обработки профилей с указанием каждого этапа работы с зашумленным сигналом.

Профили продольной составляющей средней скорости потока изначально в ходе записи сигнала эксперимента являются сигналом с флуктуациями и шумами. В данной работе была проведена полуавтоматическая обработка. В «ручной» части обработки были отсеяны все точки положения координатно-перемещающего устройства (КПУ), на которые приходилось не более чем 100 вспышек. Данное количество вспышек не было достаточным для достоверности сигнала в данном положении КПУ. Следующим действием в обработке сигнала было отбрасывание всех данных, в которых измерительный объем располагался в механических повреждениях щелевого канала из-за непредсказуемости значений средних объемных скоростей жидкости. В автоматической части обработки для данного типа сигнала нужно применить фильтр, который нивелирует шум в обрабатываемом сигнале, но, в тоже время, имеет подходящую импульсную характеристику. Фильтр скользящего среднего удовлетворяет указанным требованиям и был использован для обработки данного сигнала [8].

Профили продольной составляющей средней скорости потока получают в качестве файлов типа .db и автоматически преобразовываются в файлы типа .xlsx

с помощью программного обеспечения для «ЛАД-080». После отбрасывания всех точек с менее чем 100 вспышками к массивам данных в каждом положении КПУ был применен следующий алгоритм (рис. 1).

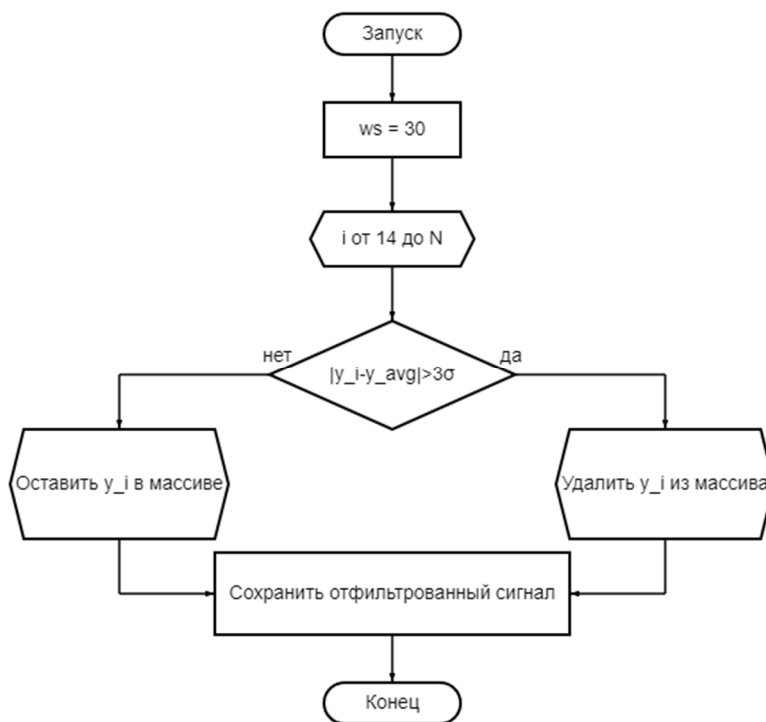


Рис. 1. Блок-схема используемого алгоритма

Фильтр скользящего среднего значения двигает окно фильтрации вдоль данных  $y_{i-(ws-1)/2} \dots y_{i+(ws-1)/2}$ , в котором записывает среднее значение  $y_{avg}$  по элементам в окне фильтрации:

$$y_{avg} = \frac{1}{ws} \left( y_{i-\frac{ws-1}{2}} + y_{i-\frac{ws-1}{2}+1} + \dots + y_{i+\frac{ws-1}{2}} \right),$$

где  $ws$  – размер окна фильтрации. Для данных профилей  $ws = 30$ .

Следующим шагом обработки было применение фильтрации с помощью «статистического критерия  $3\sigma$ ». Были удалены все вспышки, абсолютное значение которых превышало  $y_{avg} + 3\sigma$ , где

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{ws} (y_j - y_{avg})^2}{ws(ws-1)}}.$$

В конечном итоге были получены достоверные данные в каждом положении КПУ с использованием «полуавтоматической» обработки зашумленного сигнала.

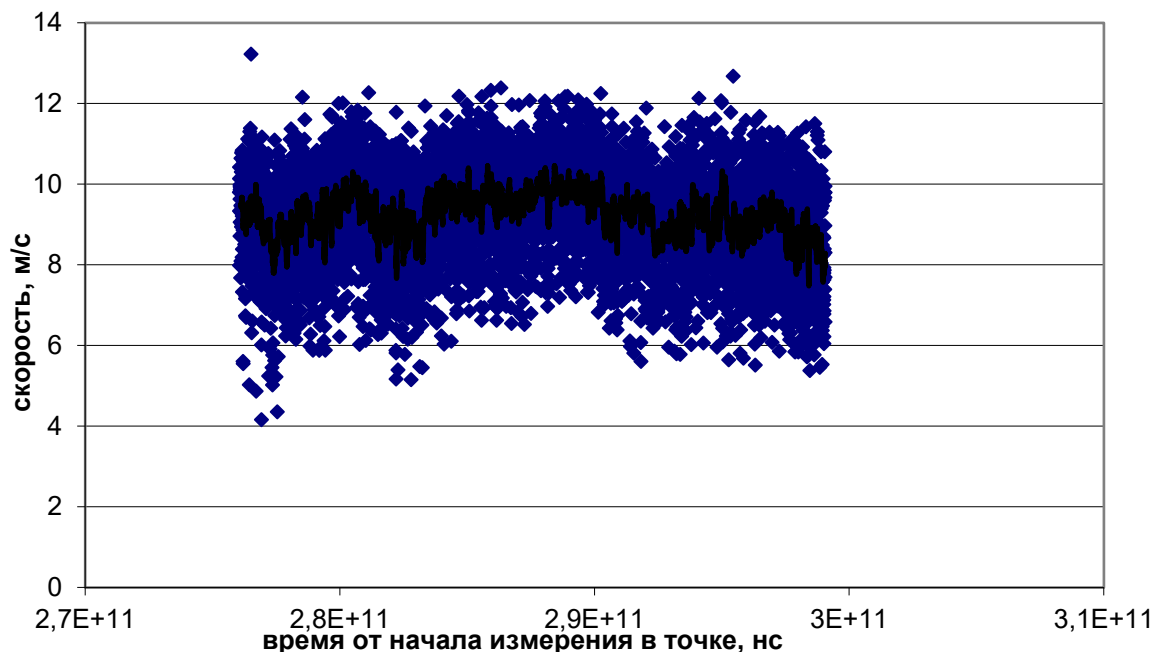


Рис. 2. Зависимость скорости от времени в определенном положении КПУ после «полуавтоматической» обработки

По результатам измерений были получены профили скорости движения жидкости в различных сечениях рабочего канала. Результаты были сопоставлены с теоретическими кривыми, и показано значительное сходство. Погрешность измерений методом лазерной доплеровской анемометрии составила менее 1%.

### *Заключение*

Метод лазерной доплеровской анемометрии был применен для исследования потока жидкости в каналах щелевой конфигурации. Для этого использовалось координатно-перемещающее устройство с точностью позиционирования 0,1 мм, что позволило повысить точность измерений.

Развитие метода включало в себя более глубокую фильтрацию экспериментального сигнала, содержащего флуктуации и шум. Производилась обработка сигнала по соотношению сигнал/шум. Применялись фильтры скользящего среднего и статистический критерий  $3\sigma$ . После этого проводилось осреднение сигнала. Такой подход позволил увеличить точность получаемых значений скорости потока. Погрешность измерений составила менее 1%.

## *Благодарности*

Исследование выполнено за счет средств государственного задания.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савин А.А., Харин Д.С. Цифровая модель картин визуализации потоков // Журнал Радиоэлектроники. – 2013. – №12.
2. Лазерные доплеровские измерители скорости / Ю.Г.Василенко, Ю.Н. Дубнищев, В.П. Коронкевич и др.; Отв. ред. Ю.Е. Нестерихин. – Новосибирск: Наука. 1975. 164 с.
3. Меледин В.Г., Наумов И.В., Аникин Ю.А., Садбаков О.Ю. и др. Лазерная доплеровская измерительная система (ЛДИС, 3-я компонента) для диагностики газожидкостных потоков ЛАД-056 ЛМЗ. Техническое описание и инструкция по эксплуатации / Р5 134 00 00 00. – Новосибирск: Изд. Ин-та теплофизики СО РАН. 2004. 51 с.
4. Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М. Интерферометрический метод измерения диаметров капель // Теплофизика и аэромеханика. – 2011. – Т. 18, № 1. – С. 1–13.
5. Nigmatulin R.I., Akhatov I.Sh., Topolnikov A.S. Theory of Supercompression of Vapor Bubbles and Nanoscale Thermonuclear Fusion // Phys. Fluid. – 2005. – V.17. – P.107–116.
6. Ахметбеков Е.К., Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М., Токарев М.П., Тюрюшкин А.Н. Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow) \\ Вычислительные методы и программирование. – 2006. – Т. 7. – С. 79–85.
7. Skripkin S. G., Tsoy M. A., Kravtsova A. Y. Experimental study of cavitating flow around a NASA 0012 hydrofoil in a slit channel // Scientific reports. – 2022. – P. 12:11182.
8. Двойнишников С. В. Методы обработки данных в научных исследованиях : учеб. пособие // Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск. 2022. 76 с.

© Д. А. Ланиаков, А. Ю. Кравцова, Д. В. Куликов, С. В. Двойнишников, 2024