

К. С. Зубанов^{1}, И. К. Кабардин¹, М. Р. Гордиенко¹, Н. И. Яворский¹*

Калибровка ультразвукового зонда измерения скорости с помощью метода лазерной доплеровской анемометрии

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: k.zubanov@g.nsu.ru

Аннотация. Работа посвящена калибровке ультразвукового зонда измерения скорости в многофазном потоке с помощью метода лазерной доплеровской анемометрии. В основе метода измерения скорости лежит свойство изменения частоты ультразвуковых волн при отражении от движущихся фазовых неоднородностей в потоке. За счет данного свойства становится возможным измерение скорости потока путем регистрации проходящих через поток ультразвуковых волн, генерируемых ультразвуковым излучателем. Анализ спектра регистрируемого сигнала позволяет построить зависимость между центром масс спектра сигнала и скоростью потока. Предложенный метод измерения скорости многофазного потока реализован в виде измерительного зонда, состоящего из двух пьезоэлементов, один из которых выступает в роли излучателя, а другой – в роли приемника ультразвуковых волн. Показана возможность измерения скорости многофазного потока предложенным методом. Выполнена экспериментальная демонстрация работы предложенного метода и калибровка зонда методом лазерной доплеровской анемометрии.

Ключевые слова: многофазный поток, ультразвук, зонд, измерение скорости, лазерный доплеровский анемометр

K. S. Zubanov^{1}, I. K. Kabardin¹, M. R. Gordienko¹, N. I. Yavorsky¹*

Calibration of an Ultrasonic Velocity Measurement Probe Using the Laser Doppler Anemometry Method

¹ S. S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk,
Russian Federation
* e-mail: k.zubanov@g.nsu.ru

Abstract. The work is devoted to the calibration of an ultrasonic probe measuring velocity in a multiphase flow using the method of laser Doppler anemometry. The velocity measurement method is based on the property of changing the frequency of ultrasonic waves when reflected from moving phase inhomogeneities in the flow. Due to this property, it becomes possible to measure the flow velocity by registering ultrasonic waves passing through the stream generated by an ultrasonic emitter. Analysis of the spectrum of the recorded signal allows us to build a relationship between the center of mass of the signal spectrum and the flow velocity. The proposed method for measuring the velocity of a multiphase flow is implemented in the form of a measuring probe consisting of two piezoelectric elements, one of which acts as an emitter and the other as a receiver of ultrasonic waves. The possibility of measuring the velocity of a multiphase flow by the proposed method is shown. An experimental demonstration of the proposed method and calibration of the probe by laser Doppler anemometry were performed.

Keywords: multiphase flow, ultrasound, probe, velocity measurement, laser Doppler anemometer

Введение

Многофазные потоки часто можно встретить в природе, а также в современных технологиях. Свое применение они находят во многих промышленных отраслях: в энергетике, биотехнологиях, каталитической химии, нефтехимии, металлургии и других отраслях промышленности [1]. Двухфазный поток в биореакторах является частным случаем многофазного потока. В биореакторах газовую фазу подают в культуральную жидкую среду для питания микроорганизмов. Одно из самых важных применений микробных технологий – это создание больших биореакторов, где будет получаться продукт при ферментации бактериями определенных газов. Численное моделирование является основным инструментом тестирования конструкционных гипотез о построении правильного биореактора. Но численное моделирование нуждается в точных исходных данных, а также в экспериментальной валидации расчетов.

Измерение газо-гидродинамических характеристик биореакторов является сложной задачей вследствие высокой оптической плотности среды и высоких скоростей течения, что накладывает физические ограничения на применяемое измерительное оборудование. Из-за сложности и редкой востребованности данного оборудования не существует коммерчески доступных решений под конкретные ферментационные процессы. Поэтому разработка измерительного оборудования для диагностики многофазного газожидкостного потока в гидродинамической модели реактора ферментации с оптически плотными средами носит эксклюзивный характер и, следовательно, актуальна для развития нашего процесса.

Описание метода

В работе используются ультразвуковые излучатели, способные под приложенным переменным сигналом генерировать колебания. Принцип работы излучателей ультразвука основан на обратном пьезоэлектрическом эффекте. Пьезоэлементы (кристаллы) способны деформироваться под влиянием внешнего электрического поля. Если такой материал окажется во внешнем переменном электрическом поле, то он будет генерировать механические колебания [2]. Частота таких колебаний будет совпадать с частотой изменения потенциала на обкладках пьезоэлектрика, то есть с частотой изменения электрического поля. Если частота колебаний внешнего электрического поля совпадает с резонансной частотой излучателя, то амплитуда генерируемых колебаний существенно увеличится.

В основе метода измерения скорости лежит доплеровский метод. Его суть заключается в эффекте сдвига частоты ультразвукового сигнала, который рассеивается на фазовых неоднородностях, относительно значения опорной частоты. Фазовыми неоднородностями могут выступать пузырьки газа или дисперсионная фаза. Разность частот $f_1 - f_2$ зависит от скорости рассеивающей неоднородности [3]. Опорная частота f_1 (создаваемая источником) определяется резонансной частотой ультразвукового преобразователя, используемого в эксперименте. Отраженная частота f_2 определяется частотой ультразвуковых волн, которые регистрируются преобразователем – приемником.

Далее выполняется дискретное преобразование Фурье сигнала, в результате которого получается спектр Фурье сигнала.

Следующий шаг – вычисление центра масс спектра сигнала. Центр масс спектра сигнала вычисляется по формуле:

$$S(w) = \frac{\sum_i A(\omega_i) \cdot \omega_i}{\sum_i A(\omega_i)},$$

где $A(\omega_i)$ – амплитуда гармоники, которой соответствует ω_i частота.

Далее строится зависимость между значениями центра масс спектра сигнала при различных скоростях потока и самими значениями скорости потока. При повышении скорости потока значения центра масс спектра сигнала должны увеличиваться, а при понижении – наоборот уменьшаться. Отслеживание центра масс спектра сигнала было выбрано потому, что при прохождении ультразвуковых волн через многофазный поток происходит отражение от множества движущихся фазовых неоднородностей, которые имеют отличные друг от друга скорости.

Для измерения скорости потока использован современный бесконтактный оптический метод лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА). В качестве устройства использующего данный метод был выбран измеритель ЛАД-07. Этот измеритель был разработан и произведен ОАО «ИОИТ» и ИТ СО РАН, г. Новосибирск.

Схема работы измерителя представлена на рис. 1. Подробное описание работы метода ЛДА сделано в работе [4].

Прибор устанавливался на координатно-перемещающее устройство, которое позволяло перемещать прибор в области 250 x 250 x 250 мм с точностью 0,1 мм. Лазерный доплеровский анемометр в этой работе позволял измерять две проекции скорости в диапазоне 0,001..200 м/с, а также пульсации этой скорости.

По измерениям вычислялось среднее значение компоненты скорости:

$$\langle u \rangle = \sum_{i=1}^N u_i,$$

где u_i – единичное измерение компоненты скорости из выборки из N событий, $\langle u \rangle$ – среднее значение компоненты скорости. Среднеквадратичное отклонение компоненты скорости δu (СКО):

$$\delta u = \sqrt{\frac{1}{N \cdot (N - 1)} \sum_{i=1}^N (u_i - \langle u \rangle)^2}.$$

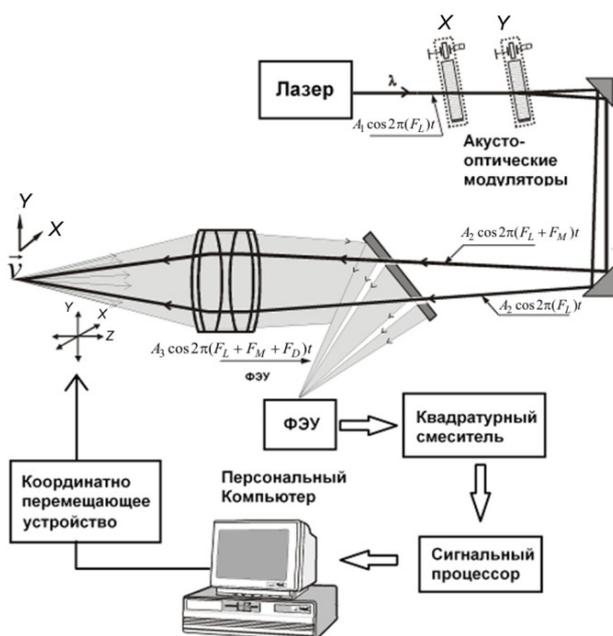


Рис. 1. Схема работы лазерно-доплеровского анемометра

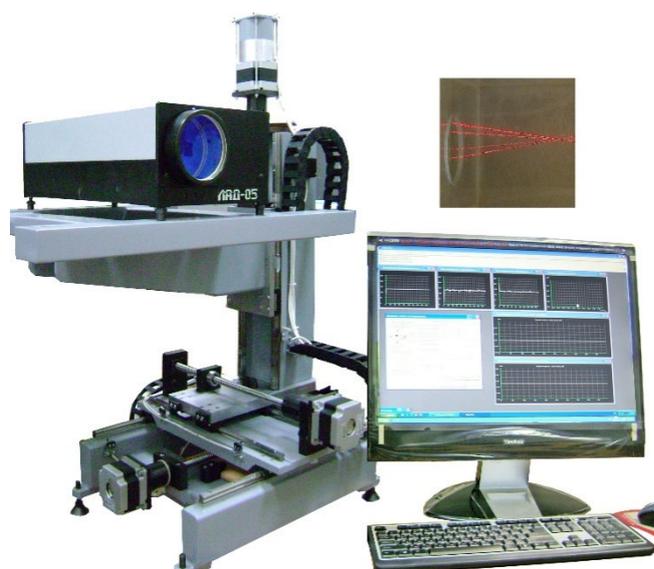


Рис. 2. Анемометр на координатно-перемещающем устройстве

Результаты

Ультразвуковой метод измерения скорости многофазного потока был реализован с помощью зонда (рис. 3), в наконечнике которого содержатся два пьезоэлемента, выступающих в роли генератора и приемника ультразвуковых волн, и опробован в лабораторных условиях на созданном экспериментальном стенде (рис. 4).

Имеется жидкостный резервуар 1 из которого при помощи насоса 2 по каналу 3 циркулирует жидкостный поток с фазовыми неоднородностями в виде пузырьков газа. Расход через поперечное сечение канала контролируется ультразвуковым расходомером. В измерительный участок встраивается зонд измерения скорости 5, сигнал с которого поступает на модуль обработки сигнала 6. Затем данные передаются компьютеру с помощью модуля регистрации и обработки сигнала 7. После этого на персональном компьютере при помощи программного обеспечения, написанного на языке Python, происходит анализ регистрируемого сигнала и вычисление необходимых значений.

В качестве жидкости для потока использовалась вода, газовую фазу составляли пузырьки воздуха, вводимые в канал при помощи компрессора.

Был проведен ряд экспериментов для калибровки зонда в данном экспериментальном стенде. При различных скоростях потока, были измерены скорости потока вдоль радиуса трубы методом ЛДА (рис. 5). Используя полученные данные, можно переводить значения центра масс спектра сигнала в скорость потока.

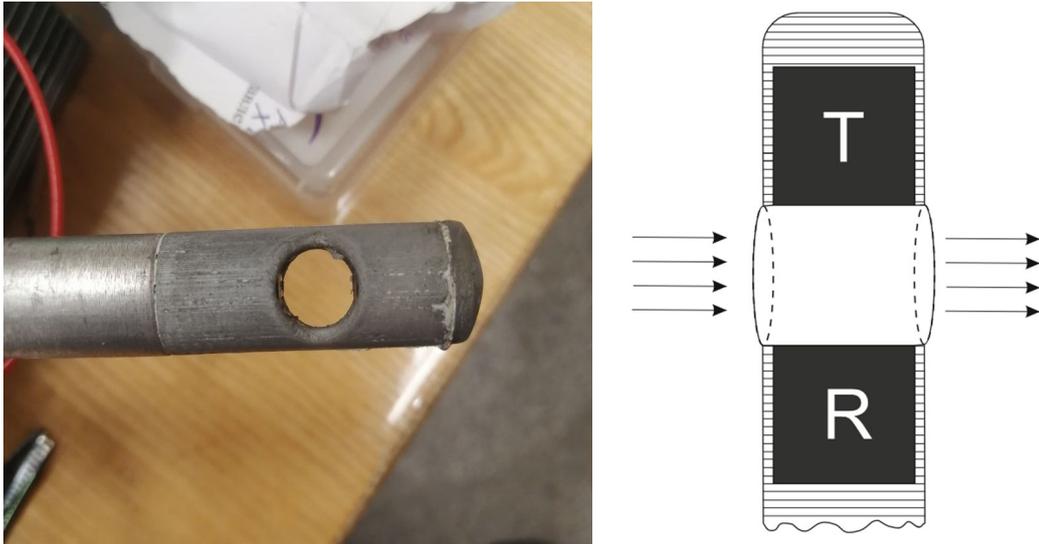


Рис. 3. Макет зонда измерения газосодержания

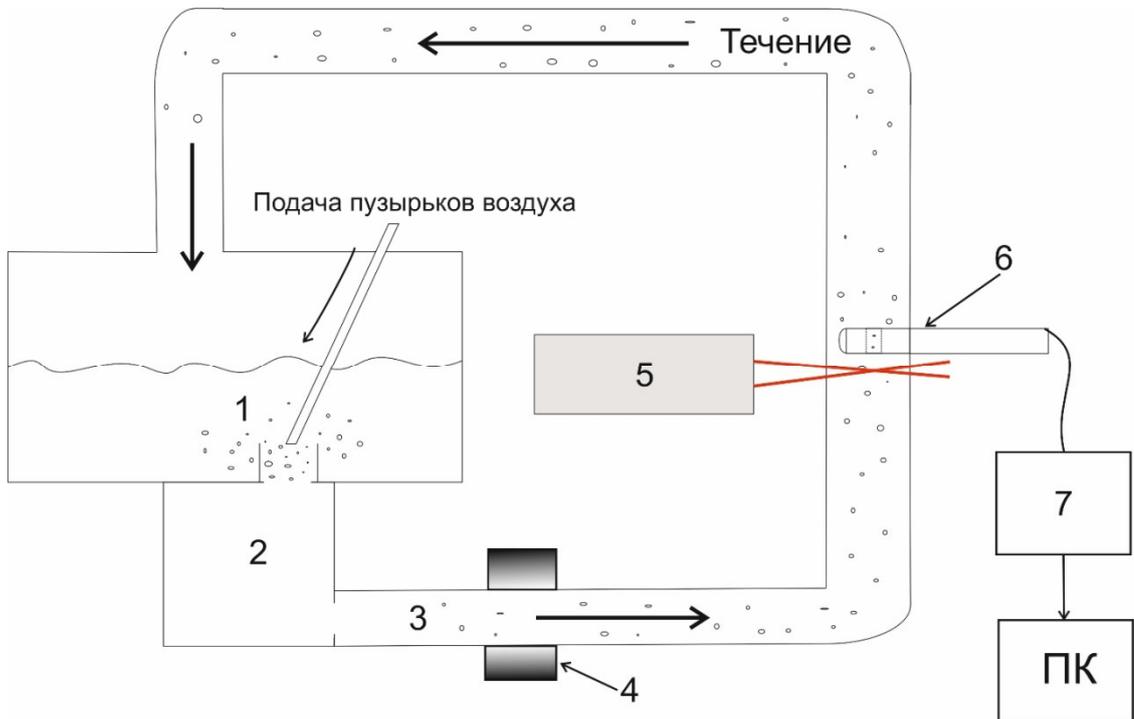


Рис. 4. Схема экспериментального стенда: 1 – резервуар с жидкостью; 2 – насос; 3 – проточный канал; 4 – ультразвуковой расходомер; 5 – лазерный доплеровский анемометр; 6 – ультразвуковой зонд, 7 – модуль регистрации и обработки сигнала

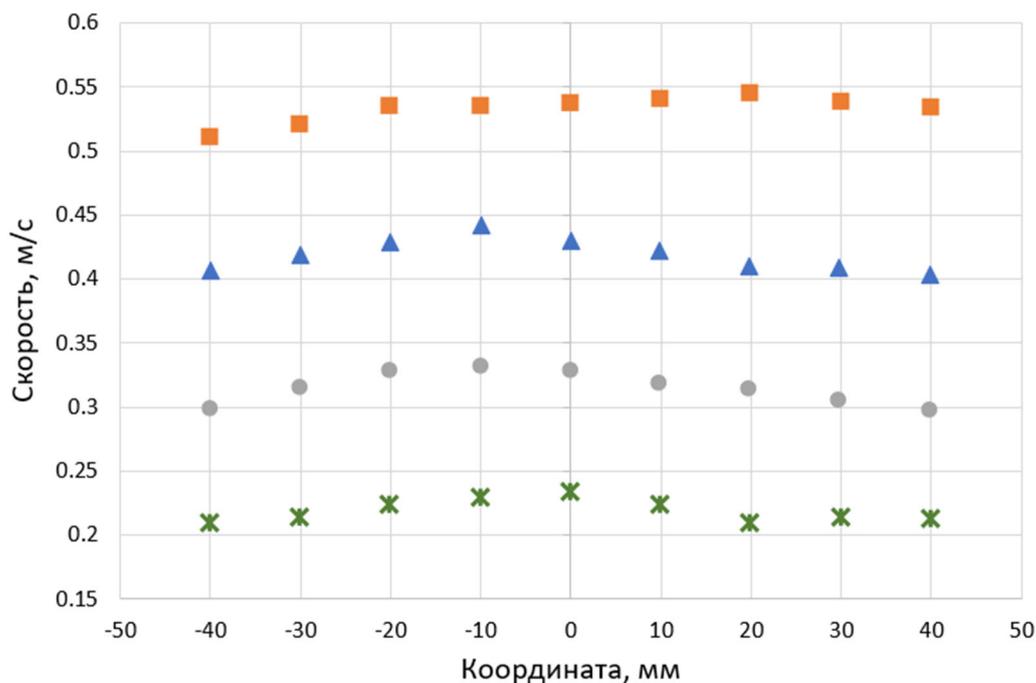


Рис. 5. Профили скорости при различном расходе, измеренные методом ЛДА

Калибровочные значения позволяют перевести полученные значения центра масс спектра сигнала (Гц) в скорость потока жидкости в канале (м/с).

После проведения калибровки зонда измерения скорости была произведена настройка измерительного комплекса. Затем были измерены скорости потока вдоль радиуса сечения трубы с шагом 10 мм совместно методом ЛДА и зондом измерения скорости (рис. 6).

Как видно на графиках, значения скорости, измеряемые зондом, лежат в области значений, полученных методом ЛДА, с погрешностью не более 20%.

Заключение

Метод измерения скорости, предложенный в данной работе, позволяет измерять скорость в многофазном потоке. При этом необходимо получать экспериментальные калибровочные данные, которые этот метод будет использовать.

Была проведена калибровка зонда измерения скорости методом ЛДА, были получены профили скорости для канала круглого сечения предложенным методом.

Погрешность измерений зондом после калибровки методом ЛДА составляет не более 20%.

Применение данного метода позволит измерять скорость многофазных потоков в оптически непрозрачных средах путем погружения зонда в измерительную область.

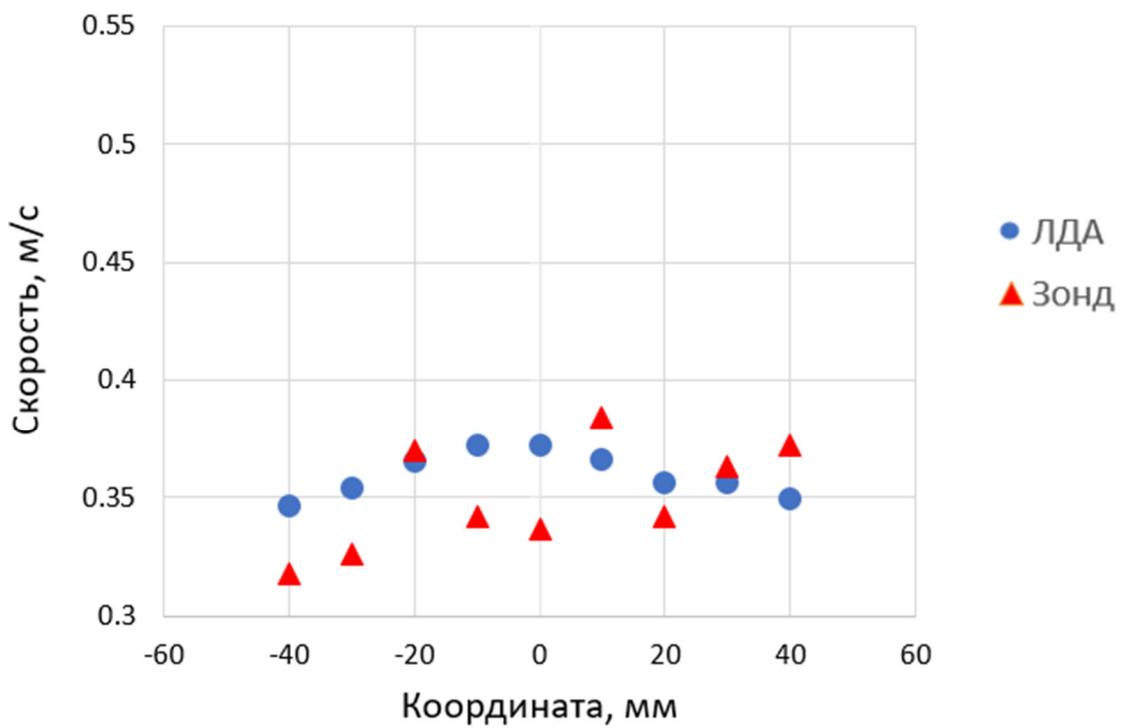
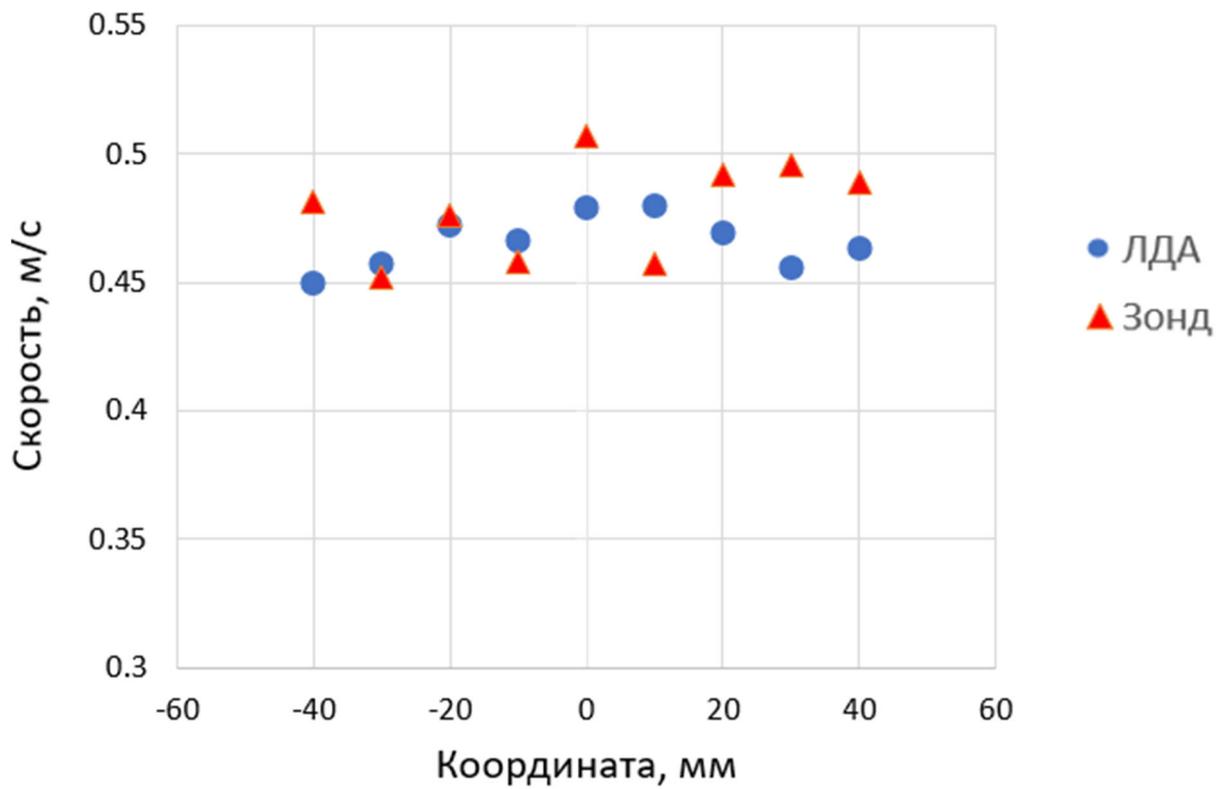


Рис. 6. Измеренные профили скорости совместно методом ЛДА и разрабатываемым зондом измерения скорости

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник: Кн. 2 / СПб.: Политехника, 2004.
2. Santhosh K. V., Roy B. K. An Intelligent Flow Measurement Technique using Ultrasonic Flow Meter with Optimized Neural Network // International Journal of Control and Automation. – Vol. 5, № 4, December, 2012.
3. Andruszkiewicz et al. Ultrasonic measurements of flow in two-phase liquid gas systems I – III. Chemical and Process Engineering, 2008.
4. Yavorsky N.I, Meledin V.G., Kabardin I.K., Gordienko M.R., Pravdina M.Kh., Kulikov D.V., Polyakova V.I., Pavlov V.A. Velocity field diagnostics inside the Ranque-Hilsh vortex tube with square cross-section // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2027, No. 1. – P. 030122.

© К. С. Зубанов, И. К. Кабардин, М. Р. Гордиенко, Н. И. Яворский, 2024