

*И. А. Евдокименко<sup>1\*</sup>, П. Д. Лобанов<sup>1</sup>, А. В. Чинак<sup>1</sup>, К. А. Филиппский<sup>2</sup>*

## **Коррекция ошибок в корреляционных методах измерений**

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

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

\* e-mail: evdokimenko.ilia96@mail.ru

**Аннотация.** В данной работе было проведено экспериментальное исследование всплытия пузырей в барботажной колонне с использованием теневой съемки. Коррекция ошибок в корреляционном анализе позволяет увеличить точность измерения скорости пузырей. Анализ показал, что накопление данных даже с высоким уровнем шума позволяет выделить информационный пик и определить среднюю скорость всплытия пузырей с минимальным расхождением между различными методами обработки. Полученная средняя скорость составила 0,221 м/с. Подтверждена эффективность коррекции ошибок для улучшения надежности результатов в условиях стационарного течения.

**Ключевые слова:** корреляционный анализ, пузырь, измерение скорости, коррекция ошибок

*I. A. Evdokimenko<sup>1\*</sup>, P. D. Lobanov<sup>1</sup>, A. V. Chinak<sup>1</sup>, K. A. Filippskiy<sup>2</sup>*

## **Error Correction in Correlative Measurement Methods**

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

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

\* e-mail: evdokimenko.ilia96@mail.ru

**Abstract.** In this paper, an experimental study of bubble floating in a barbotage column was carried out using shadowing imaging. Error corrections in correlation analysis allow to increase the accuracy of bubble velocity measurement. The analysis showed that the accumulation of data even with high noise level allows to isolate the information peak and determine the average bubble popping velocity with minimal discrepancy between different processing methods. The obtained average velocity was 0.221 m/s. The effectiveness of error correction to improve the reliability of the results under steady-state flow conditions is confirmed.

**Keywords:** correlation analysis, bubble, velocity measurement, error correction

### ***Введение***

В современных экспериментальных методах измерения часто используется корреляционный анализ сигналов. Примером тому служит метод цифровой трассерной визуализации PIV, корреляционный тепловой датчик [1], методы оптического измерения скорости и размеров пузырей [2, 3]. Кроме того, корреляционный анализ используется в акустических методах измерения.

Корреляционный анализ используется для нахождения временного или пространственного сдвига сигналов. Величина пространственного или временного

сдвига определяется расположением максимума корреляционной функции на временной оси или на пространственной плоскости.

В реальных измерениях не всегда сигналы имеют хорошее соотношение сигнал/шум. Кроме того, для обработки экспериментальных данных существует множество тонкостей, без учета которых невозможно получить надежные и точные результаты измерений. К таким тонкостям можно отнести соотношение между скоростью частиц и частотой съемки, большие градиенты скорости и сильное изменение скорости в малой области измерения.

Целью данной работы является проведение коррекции ошибок в определении скорости газовых пузырей на теневых изображениях, полученных при значительных временных интервалах для стационарного режима течения.

### *Методы и материалы*

Экспериментальная установка представляет собой барботажную колонну прямоугольного сечения из оргстекла с размерами 800x200x50 мм (рис. 1а), которая заполнена жидкостью (водопроводной водой) до уровня  $H_0=500$  мм. Для изменения гидродинамической структуры в канал параллельно устанавливались две преграды (рис. 1б) на высоте 240 мм от основания канала. Подача газа в колонну осуществляется через 36 капилляров с диаметром 0,5 мм, вмонтированных в основание канала. Приведенная скорость газа в эксперименте составляла  $U_G=4$  мм/с. Теневая съемка осуществлялась при помощи цифровой камеры Hisense Zyla с максимальной частотой съемки 50 Гц. Для проведения эксперимента скорость съемки ограничивалась до 15 кадров/с.

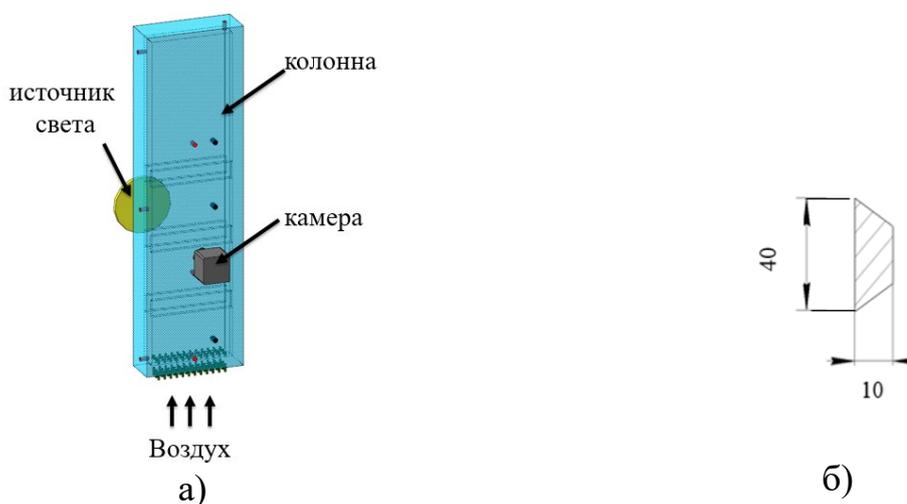


Рис. 1. Экспериментальная установка: а) барботажная колонна; б) одиночная преграда

## Результаты

На рис. 2 приведены примеры изображений, полученных при помощи теневой съемки, и их корреляционная функция.

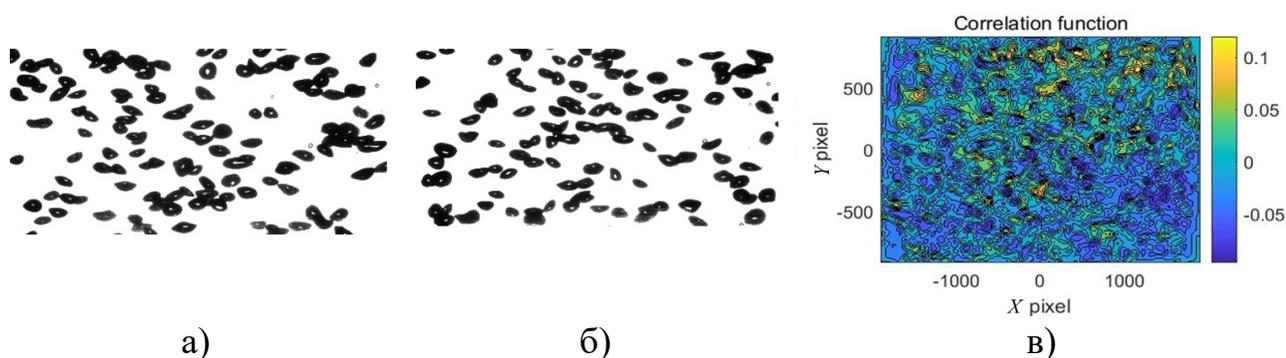


Рис. 2. Пример полученных изображений (а и б) и корреляционная функция (в)

На рис. 3 показаны результаты суммирования корреляционных функций для двух и двадцати кадров.

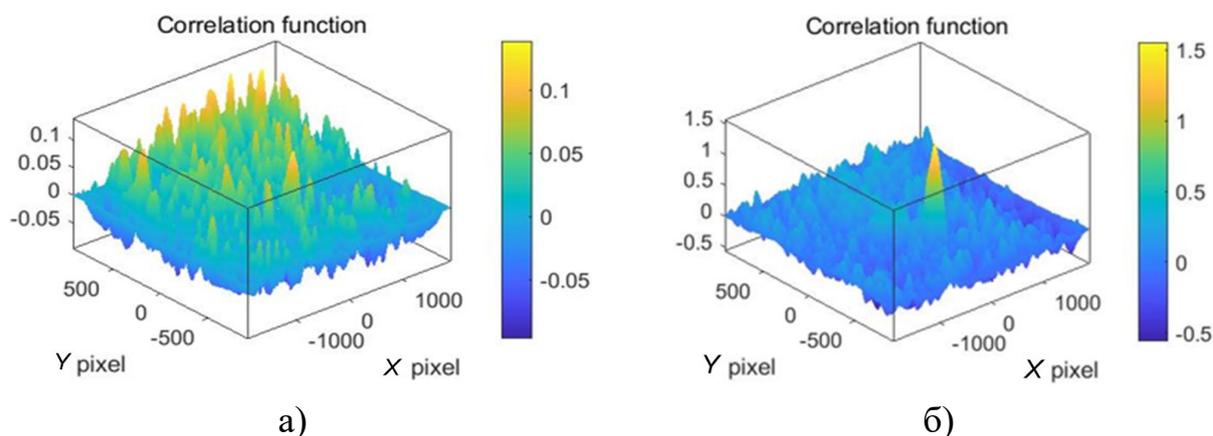


Рис. 3. Сумма корреляционных функций: а) для двух кадров; б) для двадцати кадров

На рис. 4 показана гистограмма распределения скорости всплытия пузырей.

## Обсуждение

«Non-post-interrogation» метод основан на поиске положение пика корреляционной функции, соответствующего наиболее вероятному смещению в данной области, и позволяет получить более высокое отношение сигнал/шум. Его действие состоит в коррекции входных данных для алгоритма поиска локального максимума.

Полученные кадры имеют очень плохое соотношение сигнал/шум. Однако, если предполагается, что течение в колонне стационарно, либо очень медленно

меняется, то правомерно ожидать находить информационный пик корреляционной функции в одном и том же месте.

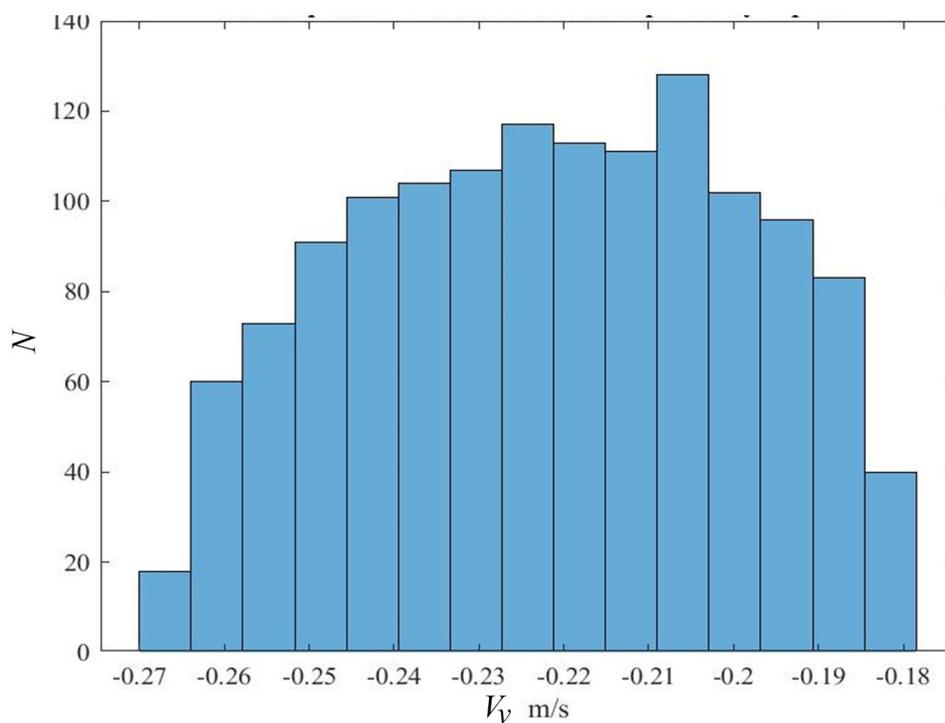


Рис. 4. Гистограмма распределения скорости всплытия пузырей

В связи с этим можно предположить, что поэлементное сложение корреляционных полей будет увеличивать соотношение сигнал/шум. Так как, случайные пики будут взаимно компенсироваться, а информационные пики будут суммироваться и увеличиваться. Исходя из результатов, приведенных на рис. 3, видно, что по мере роста количества кадров, уровень основного пика существенно растет по сравнению со случайными шумами. В результате суммирования двадцати кадров становится возможным выделить основной информационный пик корреляционной функции.

Гистограмма распределения скорости всплытия пузырей позволяет определить среднюю скорость пузыря, которая составляет 0,221 м/с. Также была проведена обработка этих же данных, снятых парами изображений с малым интервалом времени между ними. Обработка таких кадров при помощи другого алгоритма позволила определить среднюю скорость, как 0,222 м/с. Таким образом расхождение между результатами работы двух методов составляет около 1%

### *Заключение*

Проведено экспериментальное исследование всплытия пузырей в барботажной колонне с преградами трапецевидной формы при помощи метода теневой съемки. Проведены исследования разных типов обработки данных экспериментов для измерения скорости пузырей корреляционным методом. Показано, что для стационарного случая, накопление «зашумленных» данных может позволить

получить результат без потери точности. Средняя скорость пузыря в эксперименте составила 0,221 м/с.

### ***Благодарности***

Работа выполнена в рамках госзадания ИТ СО РАН.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Мамыкин А. Д. Измерение скорости неизотермических потоков жидких металлов методом кросскорреляции //Труды Института механики УрО РАН "Проблемы механики и материаловедения". – 2014. – С. 111–115.
2. Chinak A. V. et al. Measurement of velocity profiles in multicomponent flows //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1105. – №. 1. – С. 012071.
3. Chinak A. V. et al. Motion characteristics of bubbles behind a sudden channel expansion //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1382. – №. 1. – С. 012089.

© *И. А. Евдокименко, П. Д. Лобанов, А. В. Чинак, К. А. Филиппский, 2024*