

М. Р. Гордиенко^{1}, Н. А. Прибатури¹, В. Г. Меледин¹, П. Д. Лобанов¹*

Многоинформационная методика для экспериментального изучения двухфазных пузырьковых течений

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: fregat120@yandex.ru

Аннотация. В данной работе показано применение новой методики, которая позволяет получать данные по скоростям и газосодержанию в пузырьковых течениях. Методика позволяет получать как 2D, так и 3D характеристики пузырьковых течений. Алгоритм обработки этой методики позволяет получать информацию о траектории пузырьков, скорости и пульсациях. Также данная методика позволяет измерять размер пузырей и даже фиксировать вращение. В работе приведена демонстрация работы данной методики для исследования пузырьковых течений в различных каналах: плоских прямоугольных; цилиндрических; кольцевых. В каждом из каналов демонстрируется траектория отдельно взятого пузырька. Для некоторых каналов приводятся измерения газосодержания и пульсаций скорости. Показанные демонстрации работы новой методики свидетельствуют о том, что это методика достаточно успешно себя показывает в работе со многими пузырьковыми течениями.

Ключевые слова: пузырьковое течение, экспериментальное изучение, видеосъемка, обработка изображения

M. R. Gordienko^{1}, N. A. Pribaturin¹, V. G. Meledin¹, P. D. Lobanov¹*

Multi-Information Technique for Experimental Study of Two-Phase Bubble Flows

¹ S. S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: fregat120@yandex.ru

Abstract. In this paper, a new technique is shown in the work, which allows obtaining data on velocities and gas content in bubble flows. The technique allows us to study both 2D and 3D characteristics of bubble flows. The processing algorithm of this technique allows you to obtain information about the trajectory of bubbles, velocity and pulsations. Also, this technique allows you to measure the size of bubbles and even fix the rotation. The paper presents a demonstration of the operation of this technique for the study of bubble flows in various channels: flat rectangular; cylindrical; annular. In each of the channels, the trajectory of a single bubble is demonstrated. For some channels, measurements of gas content and velocity pulsations are given. The demonstrated demonstrations of the new technique indicate that this technique shows itself quite successfully in working with many bubble flows.

Keywords: bubble flow, experimental study, videography, image processing

Введение

Пузырьковые течения в последнее время набирают популярность. Это обусловлено тем, что они начинают чаще применяться в таких отраслях промышленности, как металлургия, химическая промышленность, теплоэнергетика и

фармацевтика. Существуют различные методы экспериментального изучения пузырьковых течений, в том числе и с помощью оптических методов [1, 2]. Эти методы хорошо работают с пузырьковыми течениями, но при этом имеют высокую стоимость. С помощью цифровой скоростной камеры и качественной обработки сигнала можно получать необходимое количество информации. При этом данный метод имеет невысокую стоимость. Скоростная камера с последующей обработкой данных была успешно применена для определения скорости и траекторий пузырьков [3, 4]. Использование указанных методов не позволяет получать данные о размере, форме и эволюции пузырьков. Цель данной работы – разработка методики получения 2D и 3D характеристик течений с пузырьками, а также проверка разработанной методики в различных геометриях и формах каналов с центрами всплытия пузырьков.

Основы методики

В жидкости с небольшими скоростями можно создать условия для возникновения газовых или паровых включений. Пузырьковые двухфазные среды встречаются повсеместно: в объеме неподвижной жидкости, газо- и парожидкостных течениях в трубах и каналах разной геометрии, в кипении жидкости и других течениях. Параметры пузырей легко устанавливаются с помощью фиксации их изображения, это становится возможным из-за разной оптической прозрачности пузырей и жидкости. Из фиксируемых параметров по времени одного и того же объекта можно получить данные о скорости и динамике формы пузыря. Фиксация изображения происходит с помощью цифровой скоростной камеры, после чего полученные данные обрабатываются для получения качественных и количественных параметров пузырькового течения.

В проведенном эксперименте частота кадров достигала 2000 кадров в секунду, данная скорость подбирается из скорости движения объекта, в частности, в данной работе – это скорость всплытия пузырьков. Метод, приведенный в статье, обладает рядом преимуществ. С помощью него, помимо скорости, можно получить данные о траектории и вращении объекта в двух и трехмерном пространстве, также данные о пульсациях и осредненных значениях скорости. Близким аналогом данного метода, который повсеместно применяется, является томография.

Для обработки изображений применяется ряд методов цифровой обработки изображений: морфологический анализ и сегментация, спектральная и адаптивная пространственная фильтрация, а также нелинейные преобразования полей [4-6].

На первом этапе необходимо провести фильтрацию кадров по спектру. Для сглаживания геометрических неровностей проводится аффинное преобразование. Далее сравниваются пары кадров, и по различию яркости пикселей выставляется адаптивный фильтр по пространству. Данный фильтр также помогает в усреднении кадров. Прделанные шаги относятся к первому нелинейному преобразованию.

Второе нелинейное преобразование начинается с приглушения неоднородности яркости. Для этой цели создается дополнительный фильтр, выполняющий морфологическую эрозию частей адаптивного пространственного фильтра. Затем первый фильтр вычитается из второго.

За увеличение резкости отвечает третье нелинейное преобразование. Преобразование завершается выполнением обратной свертки Люси-Ричардсона с построенной функцией размытия точки.

Заключительным шагом является четвертое нелинейное преобразование. Производится пороговая дискриминация и трансформация в бинарный образ. В этом случае рассчитывается наилучший пороговый коэффициент, и с помощью морфологического фильтра производится выборка маленьких элементов. По итогу проходит заливка полученных контуров и обработка краев. С помощью пиксельного временного интегрирования выстраивается матрица газосодержания. Формируются и сохраняются в файле визуализации двух и трехмерных картин движения пузырей.

К полученным результатам можно добавить высокую пороговую чувствительность за счет ряда выполненных преобразований, что позволило регистрировать пузыри с плохими контрастными показателями, маленьким размером и в среде с плохо реализованным освещением.

Примеры использования методики

Далее будут приведены примеры работы методики, отслеживающей всплытие пузырей, в различных каналах с жидкостью с центром всплытия пузырей. Демонстрация методики приводится для всплытия пузыря в плоском, кольцевом, цилиндрическом канале. Также приводятся примеры всплытия в свободном объеме жидкости.

На рис. 1 приводится работа методики в плоском канале с жидкостью, как для одного пузыря, так и для цепочки пузырей. На рис. 2 приведены вертикальная и горизонтальная компоненты пульсаций скорости для центра масс пузыря, всплывающего в этом канале.

Анализ пульсаций показывает существование двух пиков на спектре. Эти пики коррелируют с пульсацией угла вращения пузырька вокруг оси и пульсацией площади пузырька. На рис. 3 показаны зависимости для площади пузырька, а также для угла между главной осью эллипса, аппроксимирующего пузырек и горизонталью.

На рис. 4 (слева) продемонстрировано всплытие пузырей из источника. На рис. 4 (справа) представлена временная картина всплытия пузырей. Каждый пузырек обозначается отдельной кривой, по горизонтали отложена высота всплытия, по вертикали время эксперимента, в течение которого эти пузыри всплывают. Чем меньше угол с горизонталью, тем быстрее всплывает пузырек.

На рис. 5 приведено распределение газосодержания по ширине и высоте канала. Можно заметить, что имеются характерные пики газосодержания при всплытии пузырей, что говорит о том, что недалеко от источника всплытия имеется явление стратификации по высоте всплытия.

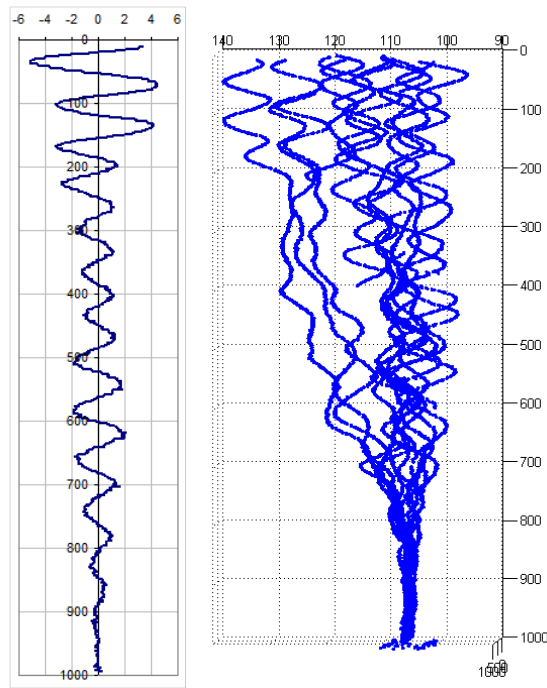


Рис. 1. Траектория всплытия одного пузырька в плоском канале (слева).
Траектории всплытия нескольких пузырьков (справа)

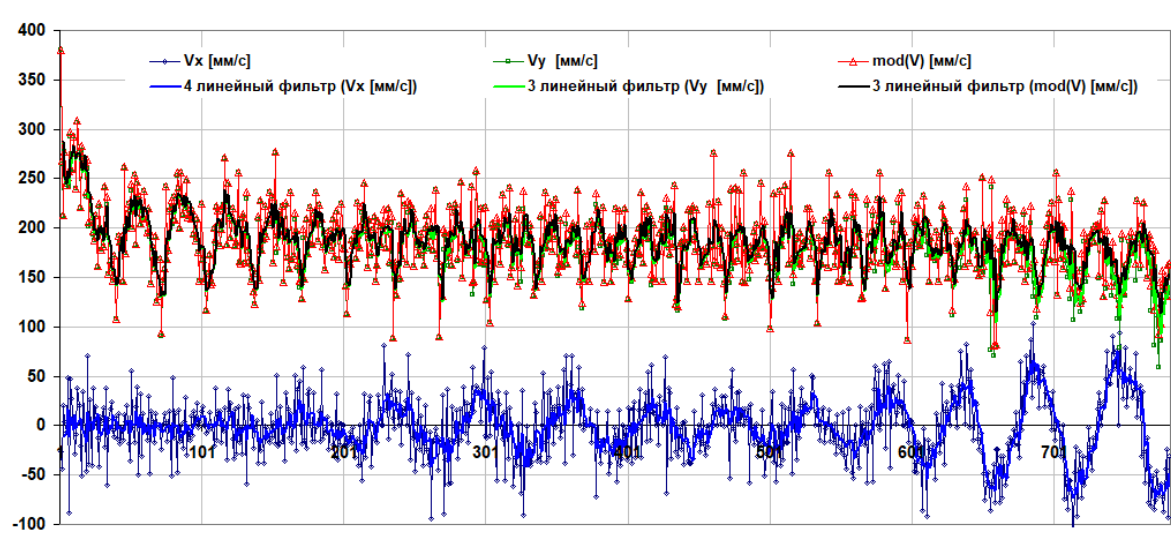


Рис. 2. Пульсации компонент и модуля скорости всплывающего одиночного пузырька

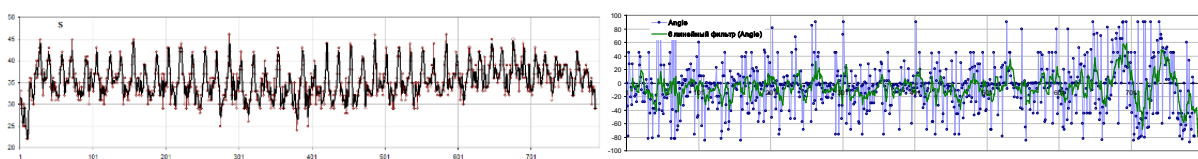


Рис. 3. Эволюция площади проекции пузырька на плоскость XU ; угла между горизонталью и главной осью аппроксимирующего пузырек эллипса

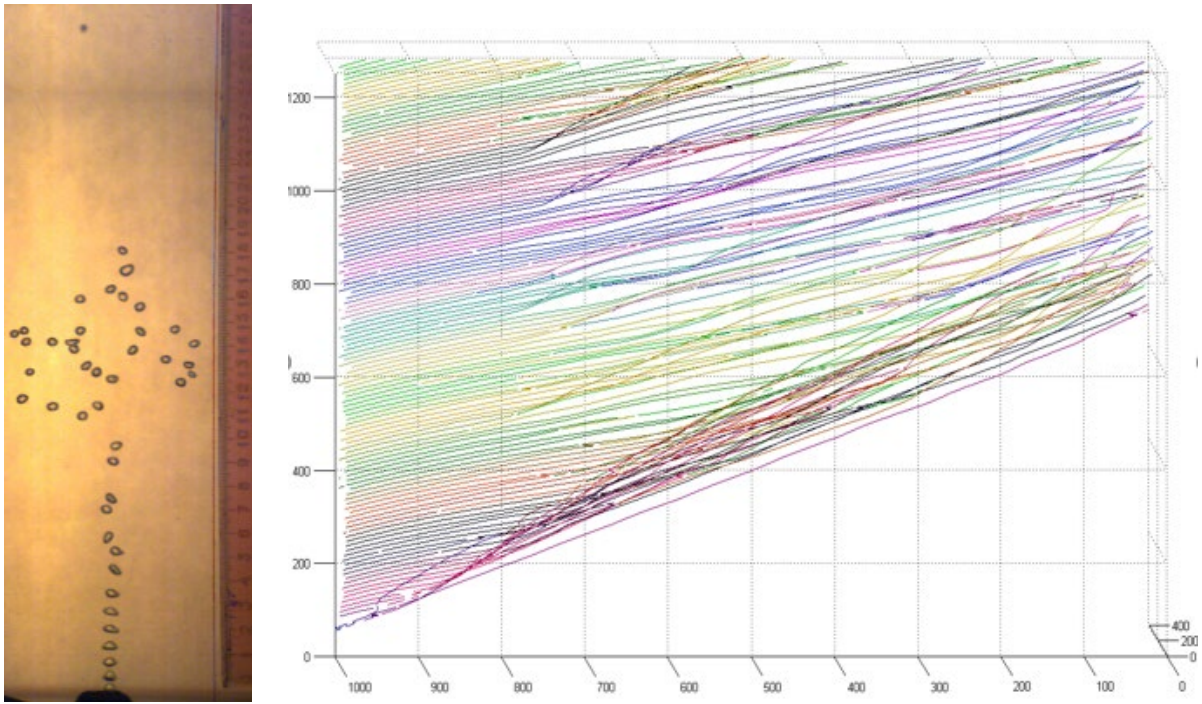


Рис. 4. Всплытие цепочки пузырей (слева). Всплытие каждого пузырька в цепочке пузырей на графике (время от высоты всплытия). Каждая линия соответствует определенному пузырьку

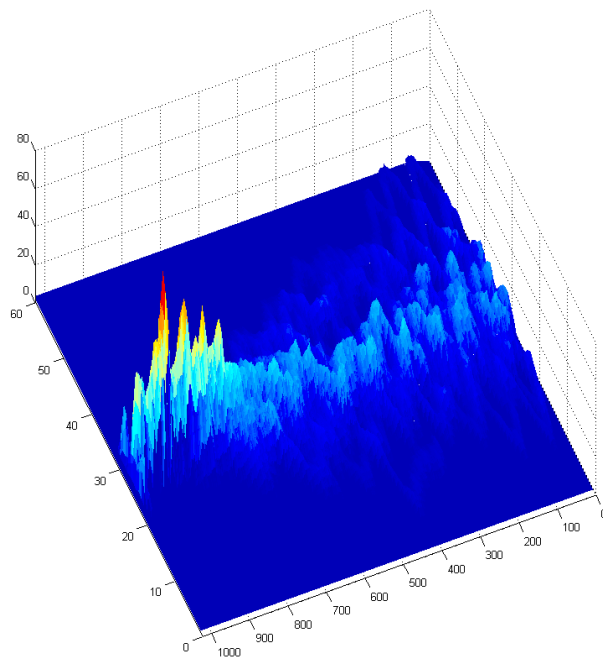


Рис. 5. Уровень газосодержания по ширине и высоте канала

Пузырь, всплывающий в свободном объеме жидкости, продемонстрирован на рис. 6, а на рис. 7 представлены траектории струи пузырей, исходящих из этого же источника в свободном объеме. Вид сверху для этих траекторий показан

на рис. 8. На рис. 9 представлены три компоненты скорости для отдельно взятого пузырька, всплывающего в объеме жидкости. На рис. 10 представлены спектры пульсаций модуля скорости и площади проекции пузыря на одну плоскость.

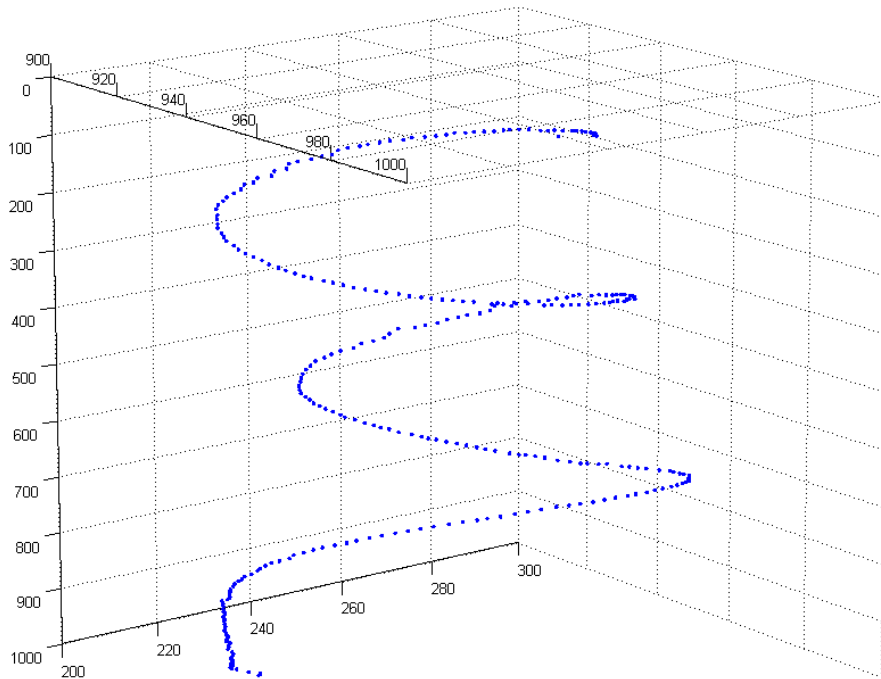


Рис. 6. Траектория всплывающего пузырька в свободном объеме жидкости

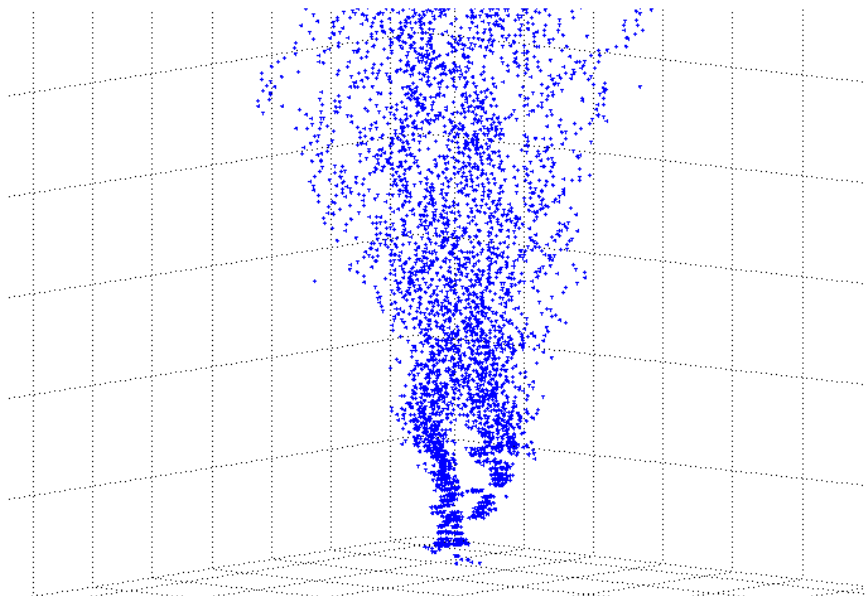


Рис. 7. Траектории множества пузырей свободно всплывающих из одного источника в объеме жидкости.

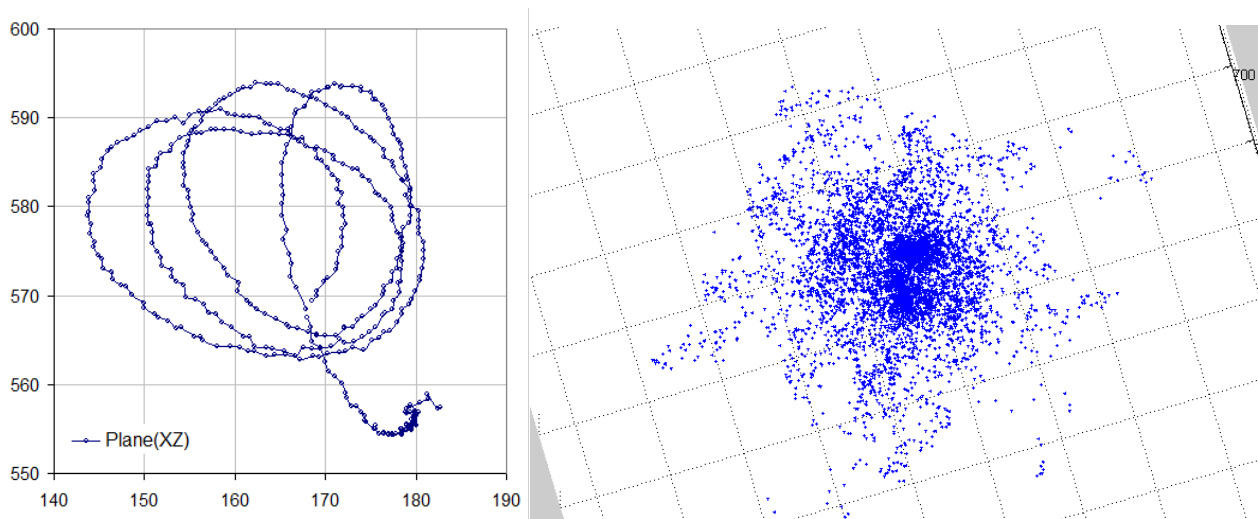


Рис. 8. Вид сверху на траекторию всплывающего одиночного пузыря (слева) и траекторию всех пузырей (справа)

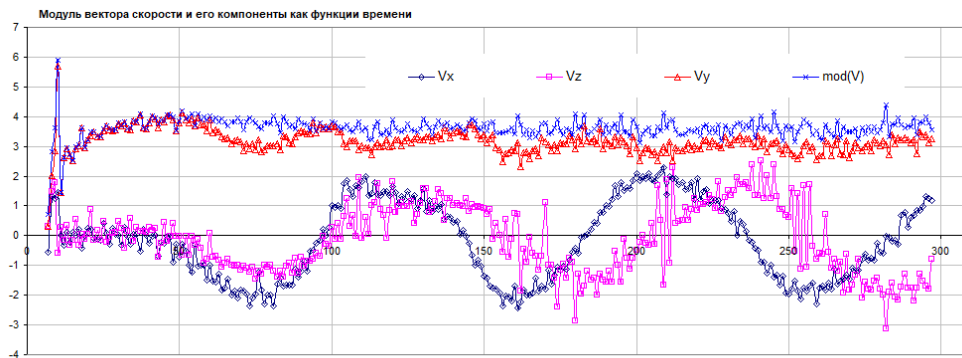


Рис. 9. Три компоненты вектора скорости для пузырька, всплывающего в объеме жидкости

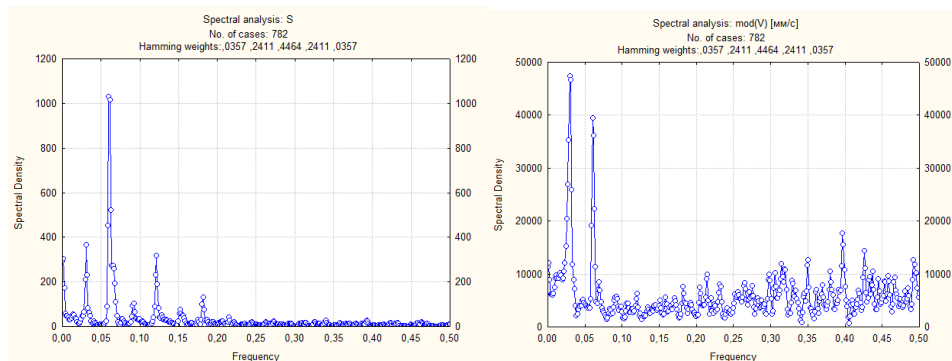


Рис. 10. Спектральная плотность пульсаций площади проекции пузырька на плоскость XY (слева) и модуля вектора скорости (справа)

Также была проведена демонстрация траекторий пузырька в цилиндрическом и кольцевом зазорах. На рис. 11 продемонстрирована траектория пузырька в объеме в цилиндрическом канале. Когда в таком канале есть развитая пузырьковая струя, то можно для любого сечения по высоте трубы вычислить пульсации трех компонент скорости и распределения газосодержания. На рис. 12 показаны пульсации компонент скорости для отдельно взятого пузырька в цилиндрическом канале.

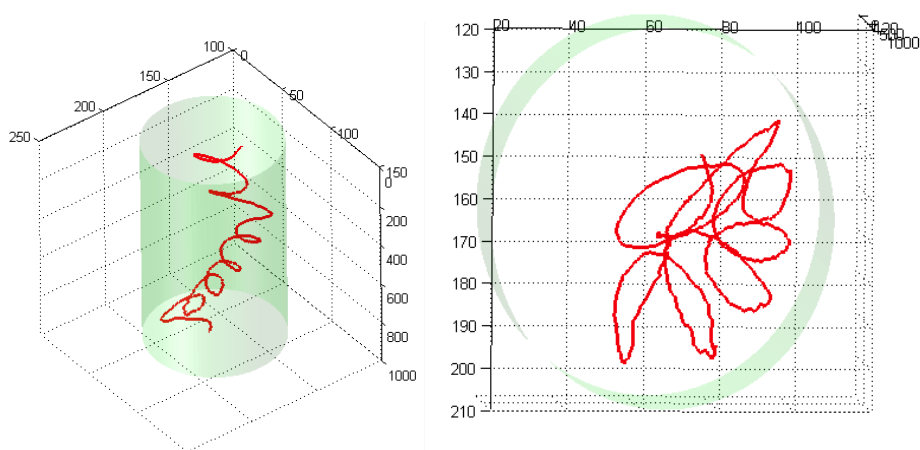


Рис. 11. Траектория одиночного пузырька, всплывающего в трубе с водой: в объеме (слева); вид сверху (справа)

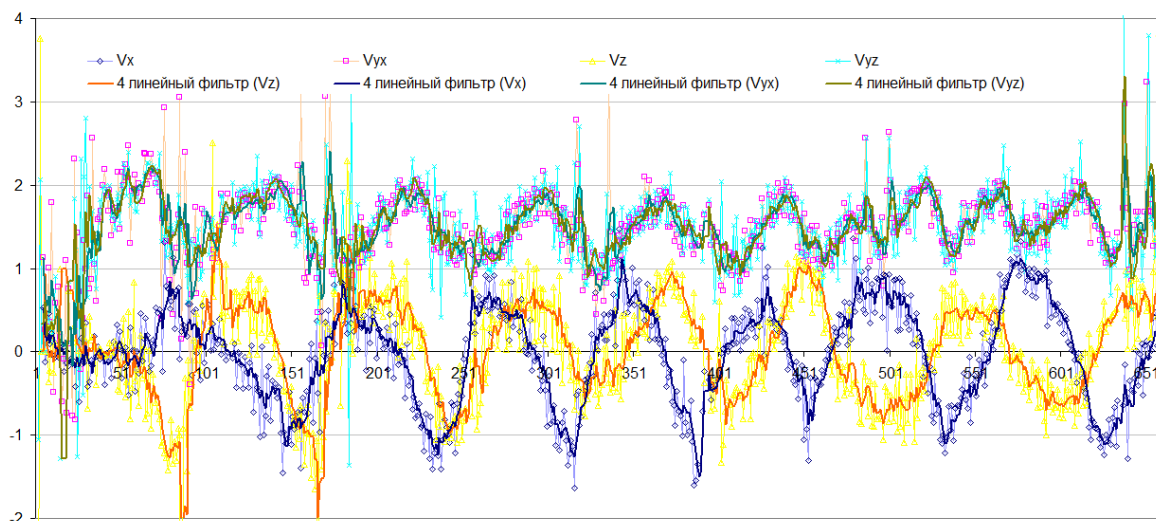


Рис. 12. Пульсации трех компонент вектора скорости и модуля скорости для пузырька в трубе

Траектория всплытия пузырька в кольцевом зазоре и проекции этой траектории на две вертикальных плоскости представлены на рис. 13. Из этих проекций можно определить и модуль скорости.

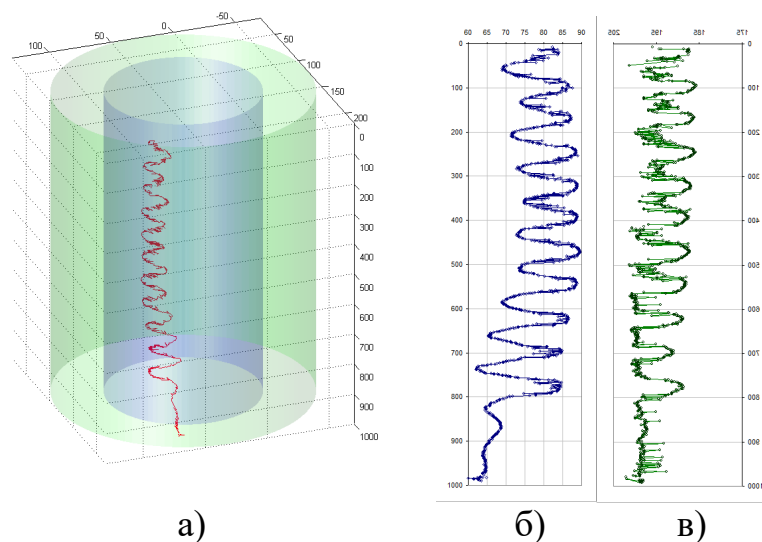


Рис. 13. 3D-траектория пузырька, всплывающего в кольцевом канале (а). Траектория движения в плоскости XY (б), траектория в плоскости ZY (в). Координаты в пикселях (1 пиксель = 0,284 мм)

Заключение

В ходе работы была разработана методика измерения различных характеристик пузырьковых течений с помощью скоростной камеры и последующей обработки изображений. Показано, что с помощью данной методики можно успешно получать данные о скоростях, траекториях пузырьков, их эволюции, а также оценивать газосодержание в любой точке объема. Работа данной методики была продемонстрирована для всплытия пузырьков в свободном объеме, а также в плоском, цилиндрическом и кольцевом каналах.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bröder D. and Sommerfeld M. 2000. A PIV/PTV system for analysing turbulent bubbly flows. Proc. of the 10th Intern. Symposium Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics Lisbon, Paper 10.1.
2. Buwa Vivek V. and Ranade Vivek V. Dynamics of gas-liquid flow in a rectangular bubble column: experiments and single/multi-group CFD simulations // Chemical Engineering Science. – 2002. – Vol. 57. – P. 4715–4736.
3. Cheng D.-C., and Burkhardt H. Bubble tracking in Image sequences // Int. J. of Thermal Sciences. – 2003. – Vol. 42, No. 7, - P. 647-655.
4. Меледин В.Г., Павлов В.А., Цвелодуб О.Ю., Яворский Н.И. Поверхностные волны в жидком диэлектрике. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2005. – 105 с.
5. Меледин В.Г., Павлов В.А., Цвелодуб О.Ю., Яворский Н.И. Поверхностные волны в жидком диэлектрике / ДАН. - 2005. - Т. 403, № 6. - С. 764-767.
6. Meledin V. G, Naumov I.V., Sotnikov V.V. Machine vision system for noncontact weighing // Proc. ISA 2001. IMEKO Special Millennium Sessions. – ISA Emerging Technologies Conference. – Houston, Texas. – USA. CD ISA. - 2001. – Vol. 415.

© М. Р. Гордиенко, Н. А. Прибатурин, В. Г. Меледин, П. Д. Лобанов, 2023