

## **МНОГОИНФОРМАЦИОННАЯ МЕТОДИКА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ДВУХФАЗНЫХ ПУЗЫРЬКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ**

### **АННОТАЦИЯ**

Описывается новая экспериментальная методика на основе скоростной фиксации изображения, позволяющая контролировать и описывать 2D и 3D эффекты пузырьковых течений. Разработанный алгоритм обработки сигнала позволяет получать многогранную информацию о поведении пузырька в двухфазных течениях: его трехмерную траекторию, пульсации трех компонент скорости, контур и объем пузырька, фиксировать его вращения и пульсации. Приводятся примеры использования разработанной методики для исследования двухфазных пузырьковых течений.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

На протяжении последних лет двухфазные пузырьковые течения активно изучаются, что обусловлено расширением их области применения в теплоэнергетике, металлургии, фармацевтике, химической промышленности. В последнее время для экспериментального изучения пузырьковых потоков предложено несколько новых методик [1,2], основанных на использовании оптических методов. Однако эти методы, обладая широкими возможностями, имеют высокую стоимость. Имея цифровую скоростную камеру и выполняя соответствующим образом цифровую обработку получаемого изображения, можно с успехом получать различную информацию о движении пузырьковых сред. Так, авторами [3,4] для определения траекторий и скорости была успешно применена скоростная камера с последующей обработкой изображения. Однако, к сожалению, используемые алгоритмы обработки не позволяют получать информацию о размере пузырька, его форме и эволюции, производить количественные двух- и трехмерные измерения. Основной целью данной работы была разработка методики получения достоверных 2D и 3D характеристик пузырьковых течений и тестирование этой методики на простых процессах.

### **2. ОПИСАНИЕ ОСНОВ МЕТОДИКИ**

Течение пузырьковых двухфазных сред характеризуется наличием газовых или паровых включений в объеме жидкости, движущихся с относительно небольшими скоростями. К таким объектам относятся всплывающие пузырьки в объеме неподвижной жидкости, газо- и парожидкостное течение в трубах и каналах разной геометрии, кипение жидкости, разрушение газовых или паровых образований и т.п. Жидкость и пузырьки обладают различной оптиче-

ской прозрачностью, поэтому при фиксации изображения среды всегда можно визуально определить контур пузырьков. Имея временную последовательность кадров одного и того же объекта, можно определять динамику изменения его формы и получать количественные данные о его скорости. В основу построения разработанной методики экспериментального исследования пузырьковых течений двухфазных сред положен метод фиксации движения среды на цифровую скоростную камеру с последующим распознаванием объектов изображения и их цифровой обработкой. Скорость фиксации объекта съемки выбирается исходя из скорости движущегося объекта и качества получаемого изображения и может достигать 2000 кадров в секунду. При этом метод позволяет не только получать простейшую информацию о линейной скорости объекта, но и выстроить двух- и трехмерную траекторию движения с определением как осредненных значений скорости, так и пульсационных 2D и 3D компонент вектора скорости, восстановить вектор скорости, вектор вращения объекта. Эти данные крайне важны при исследовании двухфазных потоков, измерении турбулентных характеристик, определении характерных частот пульсации формы и объема пузырьков. По существу разработанный метод экспериментального исследования является аналогом широко известной томографии. Так же как и в томографии, здесь возможно выделение любого сечения с последующим детальным его разложением и получением количественных характеристик по профилям скоростей и газосодержания.

Обработка полученного изображения осуществлялась по специально разработанному алгоритму на основе самых современных методов цифровой обработки изображений. В их числе: спектральная и адаптивная пространственная фильтрация, морфологический анализ и сегментация, а также нелинейные преобразования полей [4-7]. Алгоритм обработки изображений включает в себя следующие шаги.

Проводится спектральная фильтрация исходных кадров. Выделяется красный и зеленый слои в каждом кадре и усредняются их яркость.

Выполняется первое нелинейное преобразование.

Выполняются пространственные аффинные преобразования, компенсирующие геометрические искажения.

Формируется адаптивный пространственный фильтр. Для этого:

- выделяются попиксельно различия яркости в двух соседних по времени кадрах;
- рассчитываются значение оптимального порога;
- осуществляется пороговое преобразование;
- осуществляется фильтрация мелких элементов морфологическим фильтром.

Производится фильтрация спектрально усредненных кадров построенным адаптивным пространственным фильтром.

Выполняется второе нелинейное преобразование.

Компенсируется пространственная неравномерность яркости. Для этого:

- формируется новый пространственный фильтр, производящий морфологическую эрозию областей адаптивного пространственного фильтра;
- строится контурный адаптивный пространственный фильтр как модуль разности первого и второго фильтров;
- производится выборка уровня яркости окрестностей объектов контурным адаптивным пространственным фильтром;
- интерполируются результаты выборки с заполнением средних областей кольцевого фильтра выбранными уровнями яркости;
- производится нормирование пространственно фильтрованных адаптивным фильтром спектрально усредненных кадров на интерполированные выборки.

Выполняется третье нелинейное преобразование.

Повышается резкость. Для этого:

- моделируется функция размытия точки (PSF) полной оптической системы камера – пузырек (пузырек интерпретируется как отрицательная воздушная линза);
- производится обработка на основе алгоритма обратной свертки Люси-Ричардсона с построенной функцией размытия точки.

Выполняется четвертое нелинейное преобразование.

Осуществляется пороговая дискриминация и переход к бинарному образу. Для этого:

- рассчитывается значение оптимального порога;
- выполняется пороговое преобразование;
- осуществляется фильтрация мелких элементов морфологическим фильтром.

Производится дистантное преобразование результата и выполняется сегментация по морфологическим водоразделам.

Производится заливка построенных контуров.

Фильтруются усеченные краевые контуры.

Строится пространственная матрица газосодержания на основе операции пиксельного временного интегрирования.

Производится первичная классификация и присвоение уникальных меток распознанным объектам.

Записываются в базу данных свойства объектов (координаты центра, площадь, линейные размеры, эксцентриситет, угол наклона главной оси).

Осуществляются 2D и 3D визуализации, формируются анимации, данные сохраняются в файле.

Реконструируются траектории движения на основе анализа кластеров в полученных данных.

Использование непрерывных нелинейных преобразований изображений позволило существенно повысить пороговую чувствительность метода. В результате оказалась возможной динамическая фиксация слабоконтрастных и мелких пузырьков в поле с неравномерным освещением.

### 3. НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДИКИ

В этом разделе приводятся примеры применения методики к случаю всплытия воздушных пузырей в плоском зазоре, заполненном неподвижной жидкостью, всплытия пузырей в свободном объеме жидкости, всплытию пузырей в трубе и кольцевом зазоре с водой. Примеры приводятся без обсуждения физических результатов, потому как рамки данного доклада не позволяют это сделать.

Простейший пример использования методики связан с определением законов движения газового пузыря в плоском зазоре с жидкостью. На рис. 3.1 показан один произвольно выбранный кадр исходного изображения всплывающего пузырька и траектория его центра массы. Здесь же приведены все траектории пузырьков в случае линейной цепочки пузырей. На рис. 3.2 приведены вертикальная и горизонтальная составляющие пульсаций вектора скорости и его модуля для центра массы одиночного пузырька, всплывающего в покоящейся жидкости. Спектральный анализ этих пульсаций указывает на существование двух выделенных пиков на спектре пульсаций скоростей в области низких частот, которые коррелируют с пульсацией площади пузырька и пульсацией угла вращения пузырька вокруг главной оси. Соответствующие временные зависимости площади пузырька, эксцентриситета пузырька, угла между горизонталью и главной осью аппроксимирующего пузырек эллипса приведены на рис. 3.3.

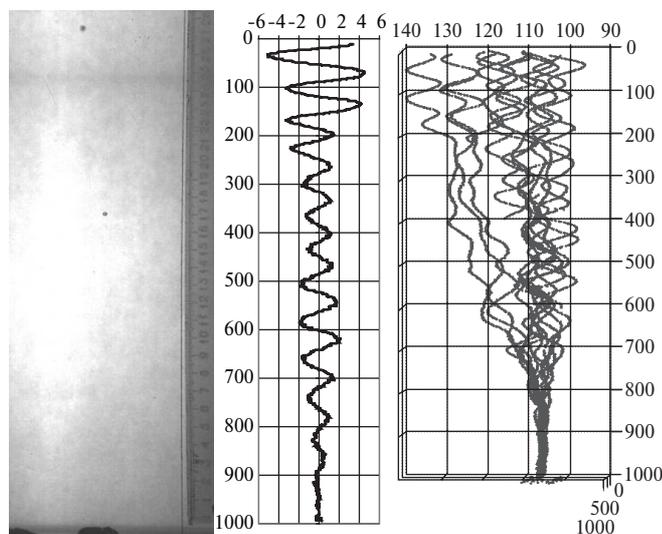


Рис. 3.1. Всплытие одиночного пузырька и цепочки пузырей в плоском канале

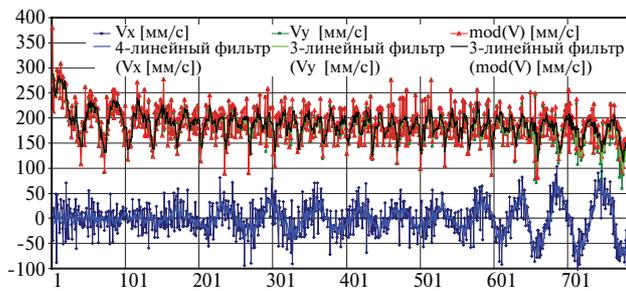


Рис. 3.2. Пульсации компонент и модуля скорости всплывающего одиночного пузырька

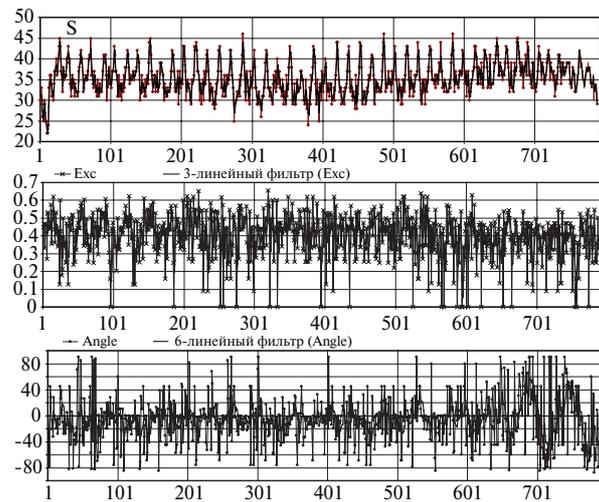


Рис. 3.3. Эволюция площади проекции пузырька на плоскость XY ( в квадратных пикселах, 1 кв.пиксел равен  $0.086 \text{ мм}^2$ ), эксцентриситета пузырька (пределы 0 – круг, 1 – отрезок), угла между горизонталью и главной осью аппроксимирующего пузырек эллипса (в градусах)

На рис. 3.4 (слева) приведено изображение начала формирования всплывания пузырей в жидкости из одного источника, а на рис. 3.4 (справа) показана временная развертка этого процесса. Каждая кривая соответствует каждому вновь появившемуся пузырьку на срезе источника. По вертикальной оси отложено время, по горизонтальной – высота всплывания. Угол наклона кривых есть скорость всплывания каждого пузырька. Интегральное по времени распределение газосодержания по высоте и ширине канала для развитой цепочки пузырей приведено на рис. 3.5. Отметим, что впервые экспериментально зафиксировано явление вертикальной стратификации газосодержания вблизи источника генерации пузырей.

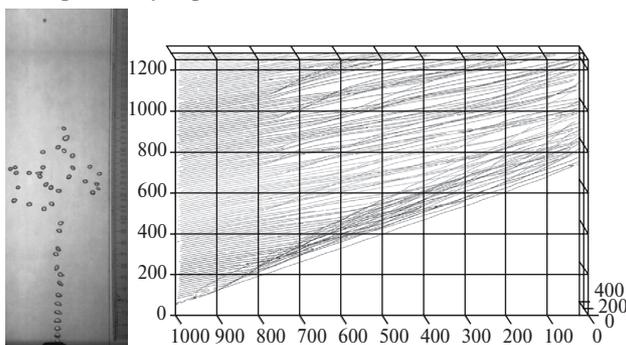


Рис. 3.4. Формирование «пузырьковой» струи

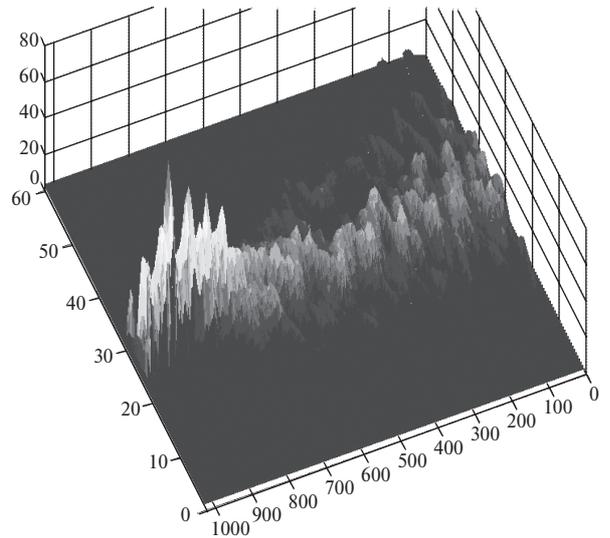


Рис. 3.5. Распределение газосодержания по высоте и ширине канала

На рис. 3.6а приведена траектория пузырька, всплывающего в свободном объеме жидкости, а на рис. 3.6б – траектории «пузырьковой» струи в свободном объеме жидкости. Каждая кривая соответствует отдельному пузырьку, движущемуся в генерируемой струе пузырей. На рис. 3.7 показан вид сверху на траекторию одиночного пузырька (слева) и траектории всех пузырей в случае генерации струи пузырей (справа). Соответствующие зависимости для трех компонент скорости для случайно выбранного из цепочки пузырька приведены на рис. 3.8. На рис. 3.9 как один из примеров приведен спектр пульсаций модуля скорости и спектр пульсаций площади проекции пузырька на одну из плоскостей.

Особой интерес вызывают случаи подъема пузырей в трубе и кольцевом канале. Так, на рис. 3.10 показана 3D траектория отдельно взятого пузырька, всплывающего в трубе. В случае развитой пузырьковой струи в трубе можно определить распределение газосодержания и вычислить пульсации трех компонент скорости с определением вектора скорости для любого выделенного по высоте трубы сечения. На рис. 3.11 показан один из примеров определения пульсаций трех компонент скорости одиночного пузырька, отдельно выделенного из множества пузырьков, всплывающих в трубе с жидкостью.

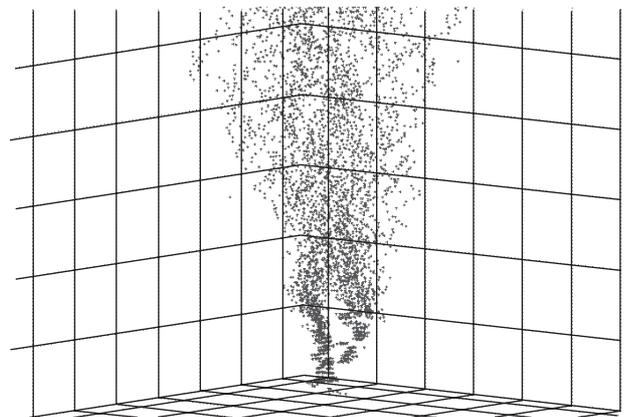


Рис. 3.6а. 3D траектории пузырей, свободно всплывающих из одного источника в объеме жидкости

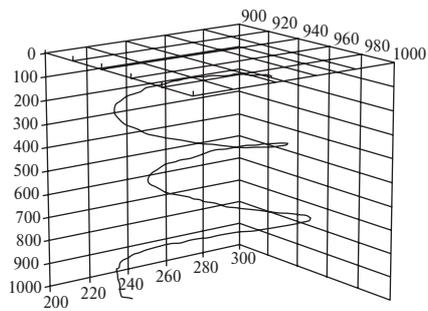


Рис. 3.6б. Объемная траектория всплывающего в свободном объеме жидкости пузырька

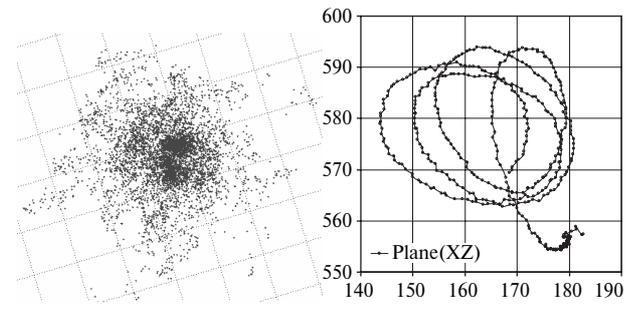


Рис. 3.7. Вид сверху на траекторию всплывающего одиночного пузырька (справа) и траекторию всех пузырей

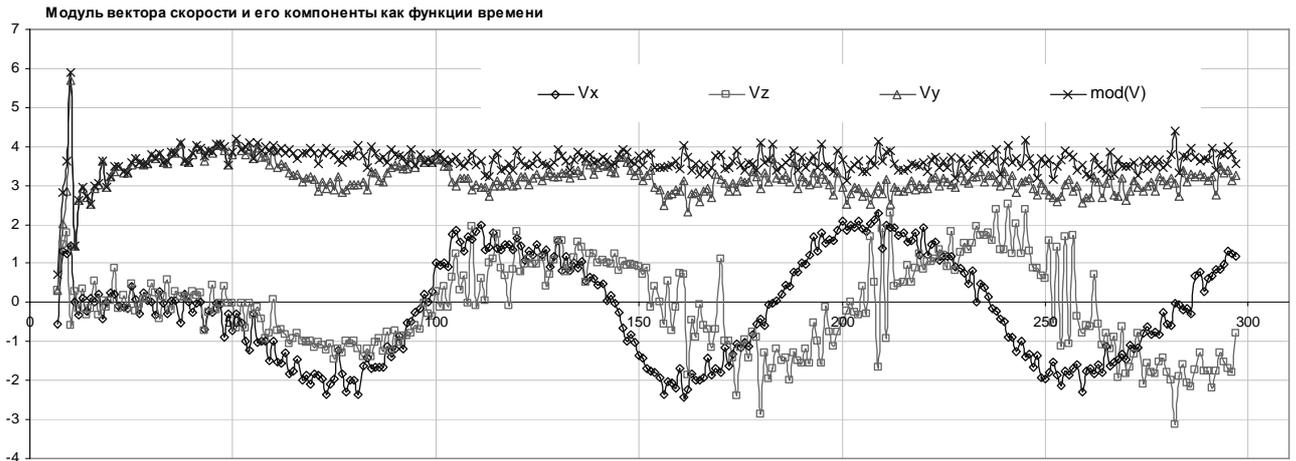


Рис. 3.8. Три компоненты вектора скорости для пузырька, всплывающего в объеме жидкости

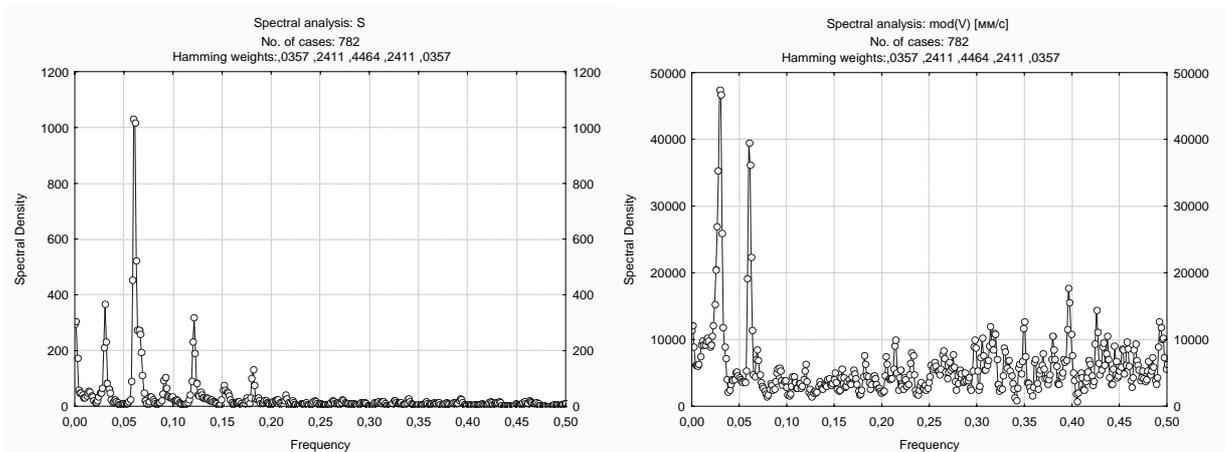


Рис. 3.9. Спектральная плотность пульсаций площади проекции пузырька на плоскость XY (слева) и модуля вектора скорости (справа)

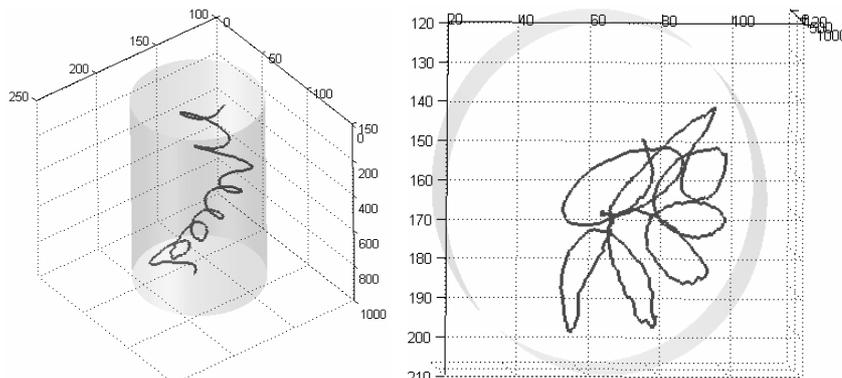


Рис. 3.10. 3D траектория одиночного пузырька, всплывающего в трубе с водой: изображение справа – вид сверху

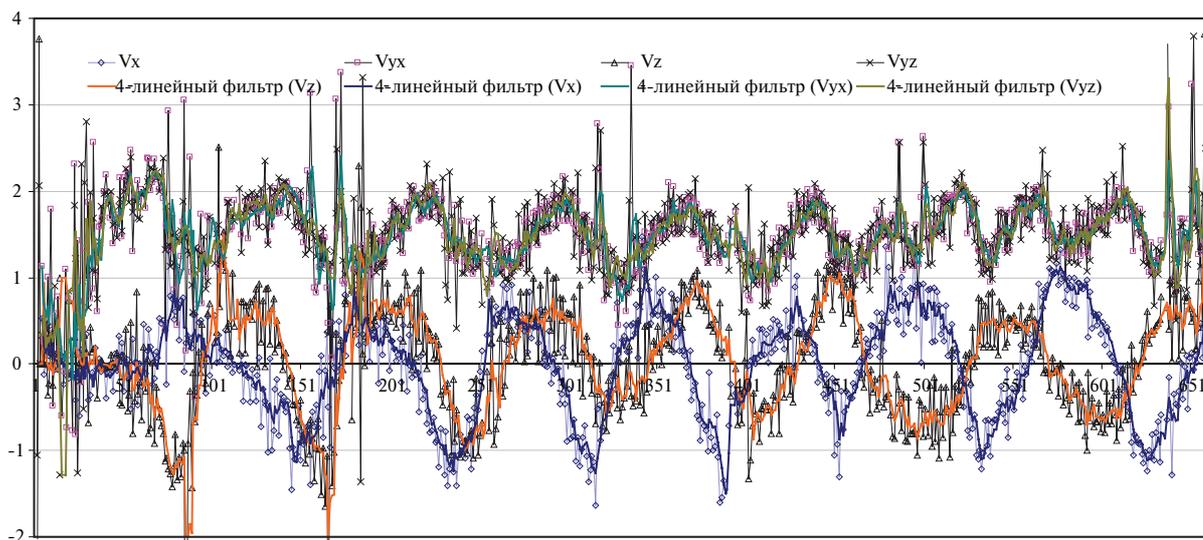


Рис. 3.11. Пульсации трех компонент вектора скорости и модуля скорости для пузырька в трубе

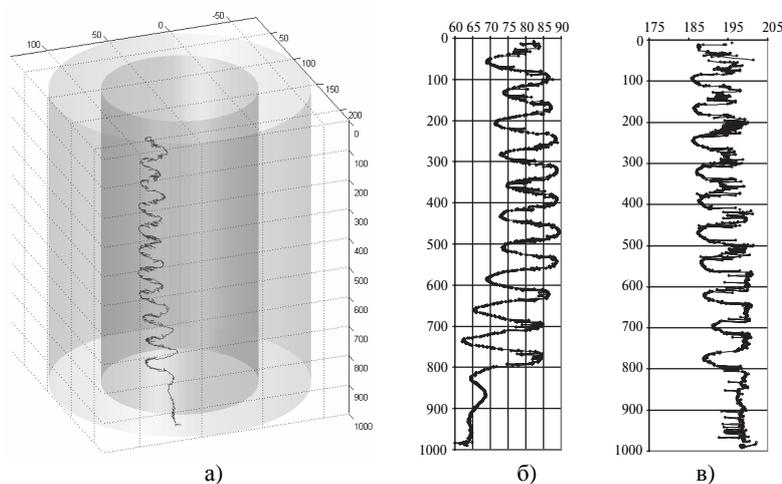


Рис. 3.12. Объемная траектория пузырька, всплывающего в кольцевом канале (а). Траектория движения в плоскости XY (б), траектория в плоскости ZY (в); координаты в пикселах (1 пиксел = 0.284 мм)

На рис. 3.12 приведена траектория всплытия пузырька в кольцевом зазоре и траектории движения пузырька в двух плоскостях, по которым можно определить три компоненты вектора скорости и модуль скорости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные примеры показывают лишь возможности метода и не претендуют на полное физическое описание картины процесса. Даже для этих примеров применение разработанного метода позволило не только увидеть ряд интересных явлений, в том числе и новых, но и получить количественное описание происходящих процессов. Детальное описание этих явлений есть цель последующих публикаций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bröder D. and Sommerfeld M.** A PIV/PTV system for analysing turbulent bubbly flows // Proc. of the 10th Intern. Symposium Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics Lisbon, 2000. 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. 57. 4715 – 4736.
3. **Cheng D.-C. and Burkhardt H.** Bubble tracking in Image sequences // Int. J. of Thermal Sciences. 2002. 42. 7. 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., Naumov I.V., Sotnikov 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.
7. **Real Time Machine Vision System for Non-contact Measurements of the Masses of Free Falling Hot Glass Drops / V. Meledin, G. Bakakin, I. Naumov et al // Current Research on Holography and Interferometric Methods for Measurement of Object Properties: Selected Paper of SPIE. 2000-2002. Vol. 5134. P. 139-149.**