

*А. В. Чинак*¹✉

Кластеризация монодисперсных пузырей в наклонной трубе

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

Аннотация. Проведено экспериментальное исследование процесса кластеризации пузырей в покоящейся жидкости в наклонной трубе с внутренним диаметром 33 мм. В экспериментах изучался процесс кластеризации пузырей, поведение кластеров в зависимости от их размеров (количества пузырей в кластере) и расхода газа. Измерения характеристик кластеров проводились на разных расстояниях от точки ввода газа (100-1000 мм). Исследование проводилось с помощью видеосъемки с последующей компьютерной обработкой данных. В экспериментах обнаружены режимы, когда пузыри выстраиваются в ряды, перпендикулярные направлению движения. Количество пузырей в ряду варьировалось от 2 до 5. При дальнейшем увеличении количества пузырей в ряду начиналось движение пузырей в пределах кластера. Для предотвращения слияния пузырей эксперименты проводились с дистиллированной водой с добавлением 3% этилового спирта

Ключевые слова: кластер, пузырь, измерение скорости

*A. V. Chinak*¹✉

Clustering of monodisperse bubbles in an inclined tube

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: chinak@mail.ru

Abstract. An experimental study of the process of bubble clustering in a liquid at rest in an inclined tube with internal diameter of 33 mm was conducted. The experiments studied the process of bubble clustering, the behavior of clusters depending on their size (the number of bubbles in a cluster) and gas flow rate. Measurements of cluster characteristics were carried out at different distances from the gas injection point of 100-1000 mm. The study was carried out using video filming with subsequent computer data processing. The experiments revealed modes when bubbles line up in rows perpendicular to the direction of movement. The number of bubbles in a row varied from 2 to 5. With a further increase in the number of bubbles in a row, bubbles began to move within the cluster. To prevent bubble fusion, experiments were conducted with distilled water with the addition of 3% ethyl alcohol.

Keywords: cluster, bubble, velocity measurement

Введение

Многофазные пузырьковые течения характеризуются сложным взаимодействием между газовой и жидкой фазами, а также сильной чувствительностью к микромасштабным эффектам, включая наличие поверхностно-активных веществ (ПАВ), геометрию канала и коллективное поведение пузырей. Особый интерес вызывает кластеризация пузырей – явление, при котором пузыри, несмотря на монодисперсность и одинаковую подъемную силу, стремятся к временной агрегации в

структуры. Это оказывает существенное влияние на характеристики псевдотурбулентности, перенос массы и импульса.

В работе [1] исследовано влияние поверхностно-активных веществ на структуру пузырьковых течений на разных масштабах. Авторы подчеркивают, что присутствие ПАВ изменяет поверхностное натяжение на границе пузыря, что, в свою очередь, влияет на форму, скорость и траекторию движения пузырей. Изменения, вызванные сорбцией ПАВ, проявляются не только на уровне отдельных пузырей, но и в глобальной структуре течения. Применение численного моделирования и теории многошкальных взаимодействий позволило авторам продемонстрировать, как локальные эффекты приводят к изменениям во всей гидродинамической структуре. Эти результаты особенно важны для точного моделирования пузырьковых течений в условиях реальных технологических процессов, где примеси и ПАВ часто присутствуют.

Figuerola-Espinoza и Zenit [2] сосредоточились на исследовании кластеризации пузырей в монодисперсных потоках при высоких числах Рейнольдса. Несмотря на кажущуюся упорядоченность потока, эксперименты показали ярко выраженную тенденцию пузырей к формированию кластеров. С помощью анализа пространственной корреляции авторы выявили, что пузыри образуют вертикально вытянутые структуры, ориентированные по направлению основного потока. Такое поведение обусловлено гидродинамическими взаимодействиями между пузырями, включая восходящие струи и сдвиговые поля. Полученные данные подчеркивают, что кластеризация возникает даже в условиях высокой монодисперсности и регулярного распределения пузырей на входе.

В исследовании Martínez Mercado и соавт. [3] представлены результаты комплексного изучения кластеризации пузырей и соответствующих спектров энергии в псевдотурбулентном режиме. Используя методы визуализации (PIV) и корреляционный анализ, авторы показали, что пузыри в вертикальных потоках не распределяются равномерно, а склонны к группировке в кластерные структуры. Особое внимание уделено анализу энергетических спектров: спектры демонстрируют отклонения от классической колмогоровской турбулентности. Работа подчеркивает важность учета кластеризации при разработке моделей псевдотурбулентности и при расчетах тепло- и массопереноса в двухфазных системах.

Результаты

В данной работе проведено экспериментальное исследование процесса кластеризации пузырей в покоящейся жидкости в наклонной трубе с внутренним диаметром 33 мм. (см. рис. 1). Угол наклона трубы был равен 45 градусов. Измерения характеристик кластеров проводились на разных расстояниях от точки ввода газа (100 – 1000 мм). Исследование проводилось с помощью видеосъемки с последующей компьютерной обработкой данных. Газ вводился через один капилляр.

Для сохранения монодисперсного состава пузырей и во избежание коалесценции (слияния) пузырей в воду, в качестве ПАВ, было добавлено 3% этилового спирта

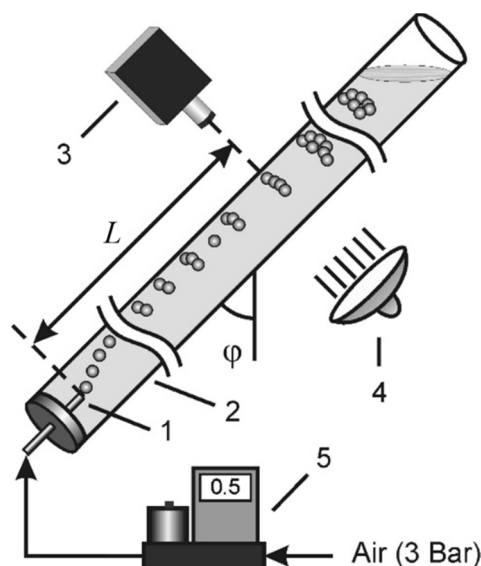


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – капилляр, 2 – стеклянная труба с внутренним диаметром $D = 33$ мм, 3 – скоростная камера Red Lake Motion Pro 2000, 4 – светодиодная лампа фронтального освещения, 5 – контроллер массового расхода воздуха “AALBORG”, L – расстояние между торцом капилляра и местом съемки

На рис. 2 приведены фотографии, сделанные через равные промежутки времени $dT = 0,083$ с. Снимки были сделаны на расстоянии $L = 250$ мм от места ввода газа при расходе газа $Q = 0,47$ мл/мин.

В экспериментах обнаружены режимы, когда пузыри, выстраиваются в ряды, перпендикулярные направлению движения. Количество пузырей в ряду варьировалось от 2 до 5. При дальнейшем увеличении количества пузырей в ряду, начиналось движение пузырей в пределах кластера.

По мере увеличения расхода газа, увеличивается скорость кластеризации пузырей.

Образование устойчивых пузырьковых кластеров происходит преимущественно в монодисперсной газожидкостной смеси с добавлением поверхностно-активного вещества (ПАВ). В случае большого разброса пузырей по размерам, скорость движения пузырей существенно отличается, что препятствует образованию устойчивых структур. При движении пузырей в чистой жидкости без добавления ПАВ, вероятность коалесценции пузырей возрастает, что затрудняет образование кластеров.

Скорость движения пузырей измерялась с помощью PIV методики. При минимальном расходе газа ($Q = 0,18$ мл/мин), когда пузыри можно было считать «одинокими», скорость всплытия пузырей была равна $0,106$ м/с.

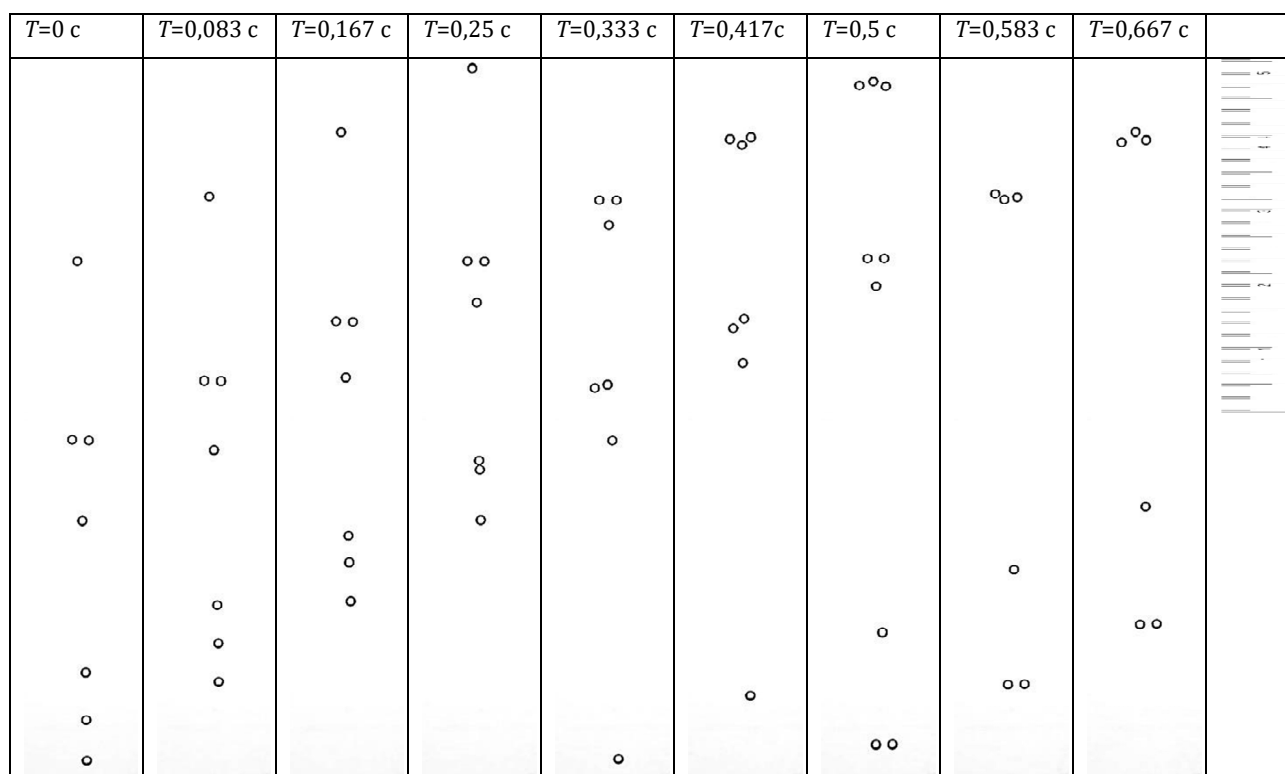


Рис. 2. Объединение пузырей в кластеры. Расход газа $Q=0,47$ мл/мин.
Расстояние от места ввода газа $L=250$ мм

На рис. 3 приведена гистограмма размеров пузырей. Видно, что размеры пузырей укладываются в узкий пик. Это подтверждает, что пузырьковое течение было монодисперсным.

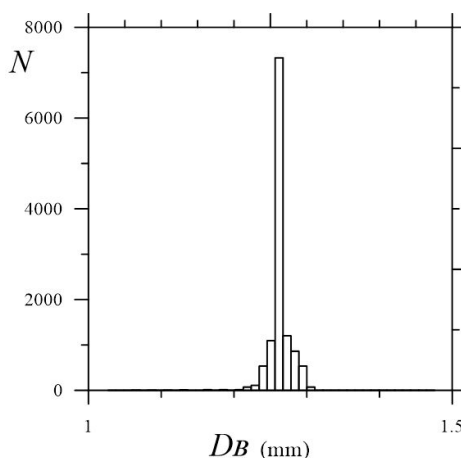


Рис. 3. Гистограмма диаметра пузырей. Расход газа $Q=0,2$ мл/мин. Расстояние от места ввода газа $L=560$ мм

На рис. 4 приведены снимки пузырьковых кластеров на разных расстояниях от места ввода газа. Видно, что по мере движения пузырей они объединяются в кластеры все больших размеров. Следует отметить, что отрыв пузырей происходит через равные промежутки времени. Вплоть до 4 – 5 пузырей в кластере дви-

жуются, выстроившись в одну линию. При дальнейшем увеличении кластера пузыри начинают активно двигаться внутри кластера.

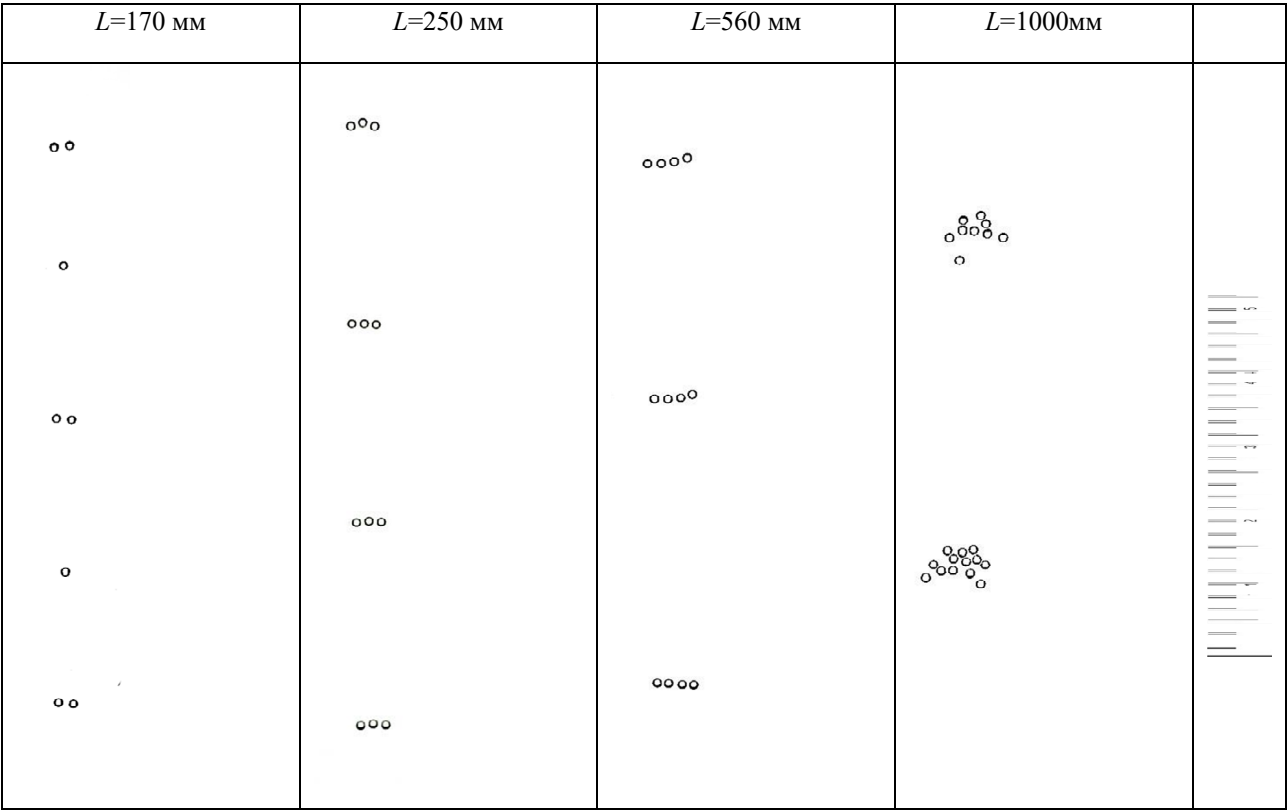


Рис. 4. Кластеризация пузырей по длине трубы. Расход газа 0,5 мл/мин

Заключение

Проведено экспериментальное исследование процесса кластеризации пузырей в покоящейся жидкости в наклонной трубе с внутренним диаметром 33 мм. В экспериментах изучался процесс кластеризации пузырей, поведение кластеров в зависимости от их размеров (количества пузырей в кластере) и расхода газа. Измерения характеристик кластеров проводились на разных расстояниях от точки ввода газа (100 – 1000) мм. Исследование проводилось с помощью видеосъемки с последующей компьютерной обработкой данных.

В экспериментах обнаружены режимы, когда пузыри, выстраиваются в ряды, перпендикулярные направлению движения. Количество пузырей в ряду варьировалось от 2 до 5.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Takagi S., Ogasawara T., Matsumoto Y. The effects of surfactant on the multiscale structure of bubbly flows //Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2008. – Т. 366. – №. 1873. – С. 2117–2129.
2. Figueroa-Espinoza B., Zenit R. Clustering in high Re monodispersed bubbly flows //Physics of Fluids. – 2005. – Т. 17. – №. 9.
3. Martínez Mercado, J., Chehata Gomez, D., van Gils, D.P.M., Sun, C., & Lohse, D. On bubble clustering and energy spectra in pseudo-turbulence. Journal of Fluid Mechanics, 2010, 650, pp. 287–306.

© А. В. Чинак, 2025