

И. А. Евдокименко¹✉, Д. Е. Легостаев¹, К. А. Филиппский¹

Движение пузырей в нисходящем потоке через пучок горизонтальных труб

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

Аннотация. Проведено экспериментальное исследование движения газовых пузырей в модели с горизонтальным пучком труб при нисходящем потоке жидкости. Установлено, что при скорости потока 0,3 м/с пузыри всплывают, при 0,35–0,4 м/с – зависают в равновесии, а при 0,45–0,5 м/с – увлекаются вниз. Результаты демонстрируют ключевые режимы взаимодействия фаз, определяемые соотношением скорости жидкости и всплытия пузырей. Полученные данные важны для оптимизации работы теплообменного оборудования, где требуется контроль за газожидкостными потоками. Исследование выполнено с использованием высокоскоростной видеосъемки (500 кадр/с), обеспечившей детальную визуализацию процесса.

Ключевые слова: отрывное течение, двухфазный пузырьковый поток, теневая съемка, пучок труб

I. A. Evdokimenko¹✉, D. E. Legostaev¹, K. A. Filippskii¹

The movement of bubbles in a downward flow through a bunch of horizontal tubes

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

Abstract. An experimental study of gas bubble motion in a model steam generator with a horizontal tube bundle under downward liquid flow was conducted. It was found that at a flow velocity of 0.3 m/s, bubbles rise upward; at 0.35–0.4 m/s, they remain suspended in equilibrium; and at 0.45–0.5 m/s, they are carried downward. The results reveal key two-phase flow regimes determined by the ratio of liquid velocity to bubble rise velocity. These findings are essential for optimizing heat exchanger performance where gas-liquid flow control is critical. The study employed high-speed videography (500,000 fps), enabling detailed visualization of the process.

Keywords: separation flow, two-phase bubble flow, shadow imaging, tube bundle

Введение

В настоящее время горизонтальные пучки труб используются в различных теплообменниках, например, испарителях, парогенераторах и др. Исследование двухфазного потока в моделях парогенератора необходимо для предотвращения аварийных ситуаций, которые могут возникнуть вследствие развития течения двухфазной среды. К примерам аварийной ситуации можно отнести разрыв трубки с последующим истечением дисперсной фазы, которая может попасть в тепловыделяющую сборку.

Изучение динамики пузырей, их распределения, скорости движения и взаимодействия с трубчатыми структурами важно для оптимизации тепломассообмена и предотвращения нежелательных эффектов, таких как колебания давления. Исследования показывают, что движение пузырей в горизонтальных пучках труб зависит от числа Рейнольдса, числа Вебера и физических свойств фаз. В работе [1] анализируется влияние вязкости жидкости на форму и скорость пузырей. В [2] выделены основные режимы течения: снарядный, эмульсионный и кольцевой. В [3] показано, что при увеличении скорости газа доминирующим становится снарядный режим. Работа [4] демонстрирует, что расстояние между трубами и их диаметр существенно влияют на динамику пузырей. В [5] предложена корреляция для расчета коэффициента трения в зависимости от шага труб. Исследования [6, 7] показывают, что наличие пузырей может как улучшать, так и ухудшать теплоотдачу в зависимости от режима течения. В [8] проведено CFD-моделирование движения пузырей в пучке труб, а в [9] представлены экспериментальные данные по визуализации потоков. Современные исследования фокусируются на применении машинного обучения для прогнозирования параметров двухфазных потоков [10], а также на разработке новых методов контроля и управления потоками [11].

Целью данной работы является определение закономерности движения пузырей через горизонтальный пучок труб при постоянном расходе и различных скоростях нисходящего потока.

Методы и материалы

Экспериментальная установка, изображенная на рис. 1, включает 55 горизонтальных стеклянных трубок, размещенных в три ряда и закрепленных прозрачными трубными досками из оргстекла. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода, которая подавалась центробежным насосом сверху вниз в канал с горизонтальным пучком труб. Скорость потока варьировалась от 0 до 0,7 м/с. Рабочий газ (азот) поступал в канал через одиночный капилляр с расходом 30 мл/мин.

Для визуализации процесса истечения газовых пузырей применялась высокоскоростная камера, обеспечивающая съемку со скоростью 500 кадров в секунду. Длительность записи составляла 6 секунд.

Результаты

Были получены данные визуализации пузырькового течения в диапазоне скоростей нисходящего потока от 0,3 до 0,5 м/с. Они представлены на рис. 2.

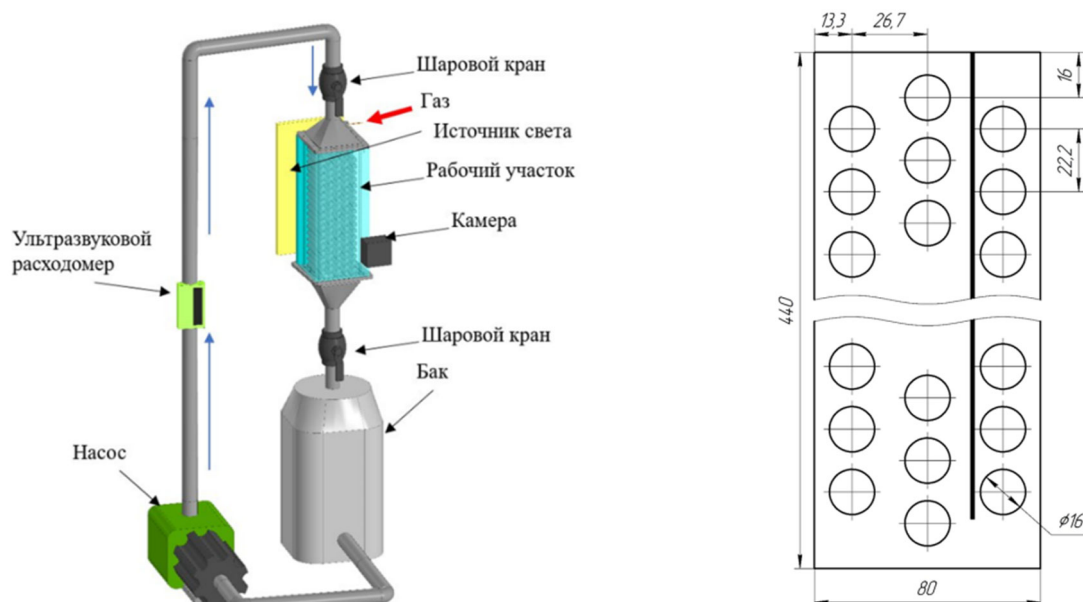


Рис. 1. Экспериментальная установка

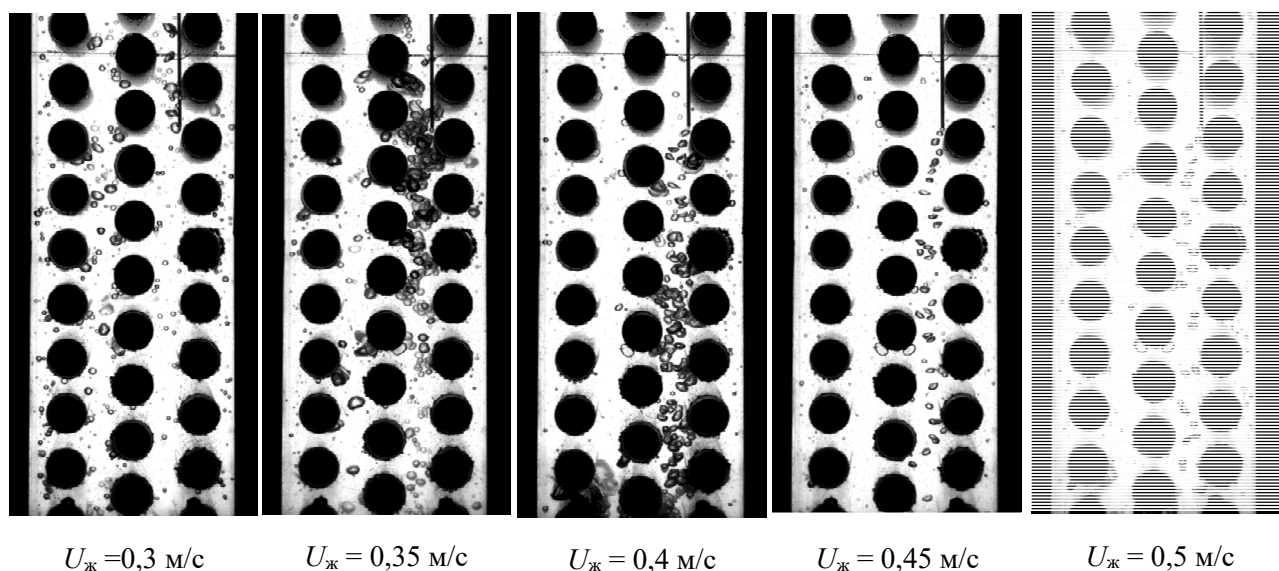


Рис. 2. Фотографии пузырькового течения при расходе газа 30 мл/мин и различных скоростях нисходящего потока

Обсуждение

В ходе экспериментального исследования изучено поведение газовой фазы в модели парогенератора с горизонтальным пучком труб при различных скоростях нисходящего потока жидкости и постоянном расходе газа (30 мл/мин). Полученные результаты демонстрируют зависимость направления движения газовых пузырей от скорости жидкой фазы.

При скорости потока $U_{ж} = 0,3$ м/с наблюдалось всплытие пузырей, что указывает на преобладание их собственной скорости всплытия над скоростью нисходя-

щего потока. В диапазоне $U_{\text{ж}} = 0,35\text{--}0,4$ м/с газовые пузыри находились в состоянии динамического равновесия («зависания»), поскольку их скорость всплытия оказалась сопоставимой со скоростью течения жидкости. При дальнейшем увеличении скорости потока ($U_{\text{ж}} = 0,45\text{--}0,5$ м/с) пузыри начинали двигаться вниз, что свидетельствует о преобладании скорости жидкости над их скоростью всплытия.

Эти данные позволяют сделать вывод о критических скоростях потока, при которых происходит смена режимов движения газовой фазы. Полученные результаты могут быть полезны для оптимизации работы парогенераторов и других теплообменных аппаратов, где важно контролировать распределение газожидкостных потоков.

Заключение

1. Проведено экспериментальное исследование движения газовой фазы в модели парогенератора с горизонтальным пуском труб при разных скоростях нисходящего потока при постоянном расходе газа.

2. Показано, что при $U_{\text{ж}}=0,3$ м/с пузыри двигаются вверх, т.к. их скорость всплытия больше скорости нисходящего потока.

3. Показано, что при $U_{\text{ж}}=0,35$ и $U_{\text{ж}}=0,4$ м/с пузыри зависают, т.к. их скорость всплытия примерно равна скорости нисходящего потока.

4. Показано, что при $U_{\text{ж}}=0,45$ и $U_{\text{ж}}=0,5$ м/с пузыри двигаются вниз, т.к. их скорость всплытия меньше скорости нисходящего потока.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhang H., Li W., Wang Q. Bubble dynamics in viscous liquids // International Journal of Multiphase Flow. 2018. Vol. 102. P. 123–135.
2. Wang L., Chen X., Yang Y. Flow patterns in horizontal tube bundles // Experimental Thermal and Fluid Science. 2019. Vol. 105. P. 109–120.
3. Chen Y., Zhang R., Liu P. Slug flow characteristics in tube arrays // Chemical Engineering Science. 2020. Vol. 220. Art. 115643.
4. Kim S., Lee J. Effect of tube spacing on bubble behavior // Nuclear Engineering and Design. 2017. Vol. 320. P. 45–56.
5. Mishima K., Hibiki T. Friction factor in two-phase flow // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 99. P. 718–730.
6. Kandlikar S.G. Heat transfer in bubbly flows // ASME Journal of Heat Transfer. 2015. Vol. 137, No. 5. Art. 051501.
7. Thome J.R. Boiling in tube bundles // Advances in Heat Transfer. 2016. Vol. 48. P. 255–290.
8. Lu J., Wang H., Zhang T. CFD simulation of bubble flow // Computers & Fluids. 2021. Vol. 214. Art. 104768.
9. Ozar B., Brooks C.S., Hibiki T. Experimental study of void fraction // International Journal of Multiphase Flow. 2013. Vol. 55. P. 28–39.
10. Zhou P., Li Y., Wang K. Machine learning for two-phase flow // AIChE Journal. 2022. Vol. 68, No. 3. Art. e17542.
11. Hibiki T., Ishii M. Control of two-phase flows // Annual Review of Fluid Mechanics. 2014. Vol. 46. P. 245–267.

© И. А. Евдокименко, Д. Е. Легостаев, К. А. Филиппский, 2025