

И. А. Евдокименко^{1✉}, Д. Е. Легостаев¹, К. А. Филиппский¹

Особенности истечения газового пузыря через горизонтальный пучок труб в фиксированном объеме жидкости

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

Аннотация. Возникновение двухфазных потоков в промышленных установках в некоторых случаях может приводить к аварийным сценариям. Наличие экспериментальной базы по движению таких потоков в различных системах позволяет создать протоколы безопасности для предотвращения таких ситуаций. Экспериментальная установка для исследования динамики газовых пузырей в нисходящем потоке включала канал с 55 горизонтальными стеклянными трубками, закрепленными между прозрачными трубными досками. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода, подаваемая сверху вниз со скоростью 0-0,7 м/с. Газ (азот) инжестировался через капилляр из цилиндра постоянного объема ($3 \cdot 10^{-5}$ - $7 \cdot 10^{-5}$ м³) при давлениях $202,65 \cdot 10^3$ - $1,216 \cdot 10^6$ Па. Процесс фиксировался высокоскоростной камерой (500 к/с). Визуализация подтвердила сложный характер взаимодействия пузырей с трубным пучком. Выяснено, что при высоких давлениях впрыска пузыри могут «зависать» на трубках. Показано, что влияние объема цилиндра незначительно оказывает влияние на динамику всплытия.

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

I. A. Evdokimenko^{1✉}, D. E. Legostaev¹, K. A. Filippskii¹

Features of the outflow of a gas bubble through a horizontal bundle of pipes in a fixed volume of liquid

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

Abstract. The occurrence of two-phase flows in industrial installations can in some cases lead to emergency scenarios. The availability of an experimental database on the movement of such flows in various systems makes it possible to create security protocols to prevent such situations. The experimental setup for studying the dynamics of gas bubbles in a downward flow included a channel with 55 horizontal glass tubes fixed between transparent pipe boards. Distilled water was used as the working fluid, supplied from top to bottom at velocities ranging from 0 to 0.7 m/s. Gas (nitrogen) was injected through a capillary from a constant-volume cylinder ($3 \cdot 10^{-5}$ to $7 \cdot 10^{-5}$ m³) at pressures of $202.65 \cdot 10^3$ to $1.216 \cdot 10^6$ Pa. The process was recorded using a high-speed camera (500,000 fps). Visualization confirmed the complex interaction between bubbles and the tube bundle. It was found that at high injection pressures, bubbles could "hang" on the tubes. Additionally, the study demonstrated that cylinder volume had negligible influence on bubble rise dynamics.

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

Введение

Промышленные установки с горизонтальными пучками труб нашли свое применение во многих отраслях производства: авиа- и машиностроении, хими-

ческой технологии, а также в различных энергетических установках. К таким установкам относятся теплообменники, испарители, парогенераторы. Последние имеют большое значение в процессе выработки электроэнергии на атомных станциях, где их надежность влияет на безопасность работы станций.

Изучение двухфазных потоков имеет особое значение для совершенствования парогенераторов. В определенных условиях образование и развитие двухфазных потоков может приводить к различным аварийным сценариям. Например, истечение дисперсной фазы во время разрыва трубок парогенератора.

В работах [1, 2] показано, что поведение пузырей зависит от числа Мортонa, числа Рейнольдса и свойств жидкости. В нисходящем потоке вязкость и поверхностное натяжение определяют форму и траекторию пузырей: в высоковязких средах пузыри сохраняют сферичность, а при низком поверхностном натяжении траектории становятся неустойчивыми [3]. Для горизонтальных пучков труб характерно сложное взаимодействие пузырей с ближайшими трубами, что приводит к их деформации и изменению скорости [4, 5]. В [6] рассмотрено влияние пузырей на теплообмен в теплообменных аппаратах с нисходящим потоком. Теплообмен в нисходящих потоках усиливается на 40–70% при объемной доле газа 5–15% за счет микроконвекции и обновления пограничного слоя.

Наличие экспериментальной базы о движении дисперсных структур в горизонтальном пучке труб позволит улучшить существующие протоколы безопасности, а также создать достоверные математические модели.

Целью данной работы является оценка влияния скорости потока, давления впрыска и объема цилиндра на динамику всплытия газового пузыря в нисходящем течении в канале с горизонтальным пучком труб.

Методы и материалы

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Стенд состоит из 55 горизонтальных стеклянных трубок, расположенных в 3 ряда, закрепленных с помощью прозрачных трубных досок, изготовленных из оргстекла. Рабочая жидкость (дистиллированная вода) с помощью центробежного насоса подавалась в канал с горизонтальным пучком труб сверху вниз со скоростью от 0 до 0,7 м/с. В рамках эксперимента использовался баллон с сжатым азотом, из которого газ набирался в цилиндрическую емкость постоянного объема ($3 \cdot 10^{-5}$ и $7 \cdot 10^{-5}$ м³) с заданным давлением от $202,65 \cdot 10^3$ до $1,216 \cdot 10^6$ Па. После заполнения цилиндра газ инжектировался в канал через капилляр, расположенный в центре модели парогенератора.

Визуализация истечения газового пузыря производилась при помощи высокоскоростной камеры со скоростью съемки 500 к/с и продолжительностью записи 6 секунд.

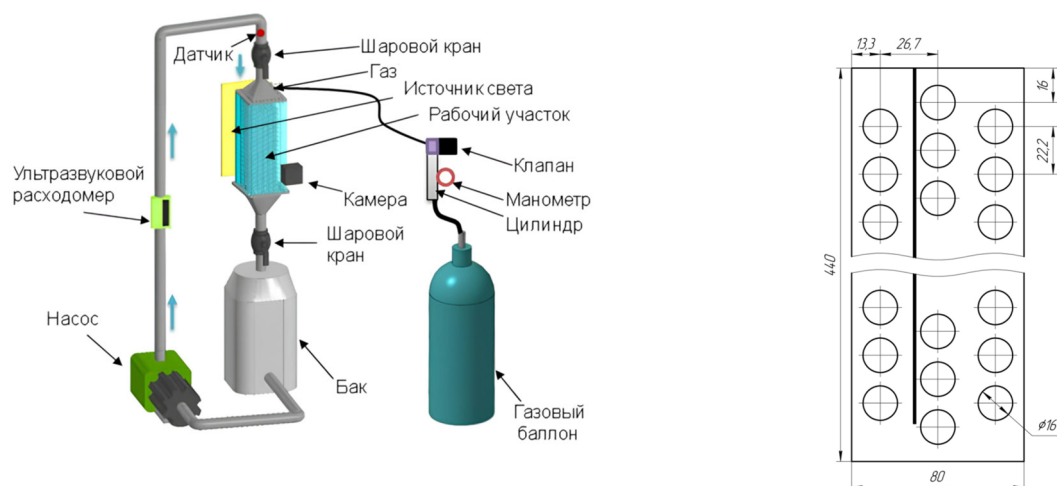


Рис. 1. Экспериментальная установка и схема рабочего участка

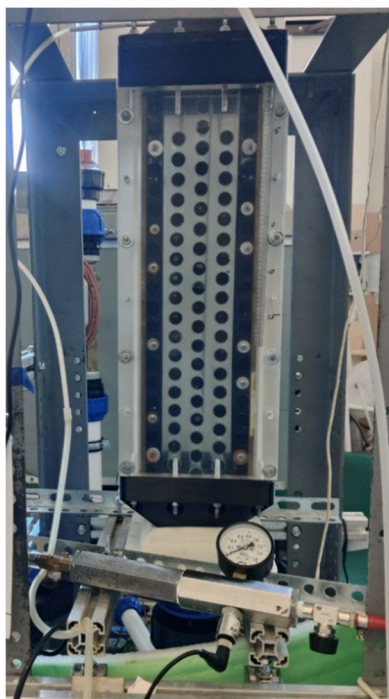


Рис. 2. Фотография модели парогенератора

Результаты

На рис. 3 представлены фотографии эволюции газового пузыря при его истечении из одиночного капилляра при скорости жидкости $U_L=0$ м/с при объеме цилиндра 30 мл и давлениях впрыска 2 атм , 7 атм и 12 атм.

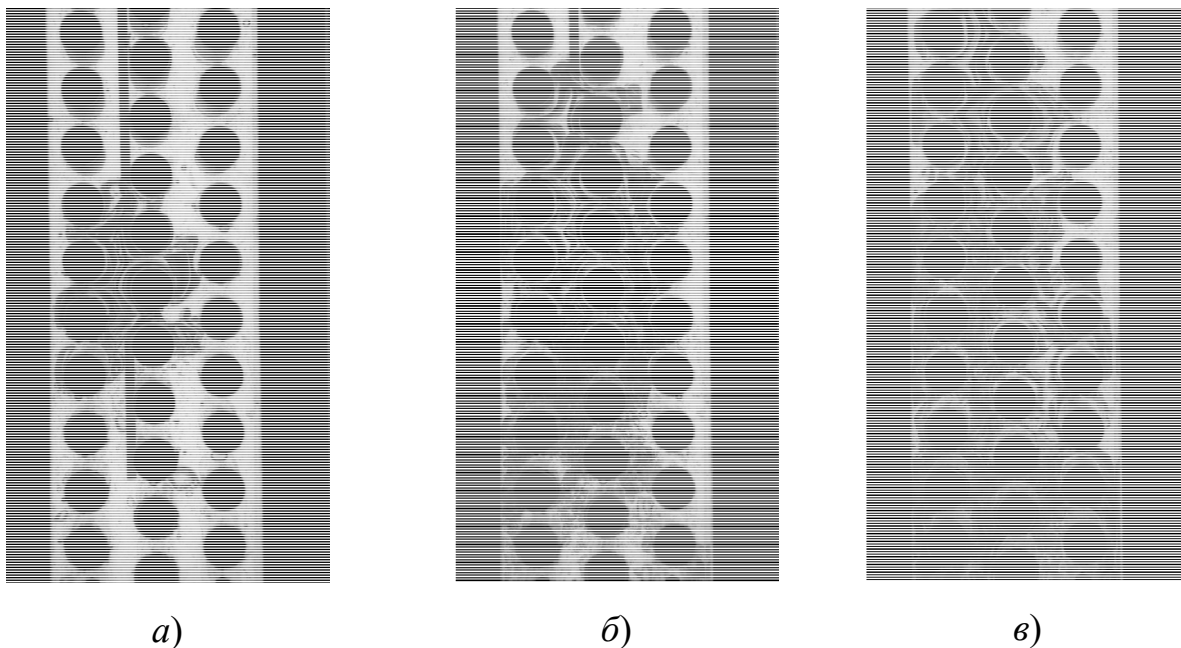


Рис. 3. Фотографии пузырей в стоячей воде при объеме цилиндра 30 мл и давлениях впрыска 2 атм (а), 7 атм (б), 12 атм (в)

На рис. 4 приведены теневые фотографии эволюции газового пузыря при его истечении из одиночного капилляра при скорости жидкости $U_L=0,3-0,7$ м/с при объеме цилиндра 30 мл и давлении впрыска 7 атм.

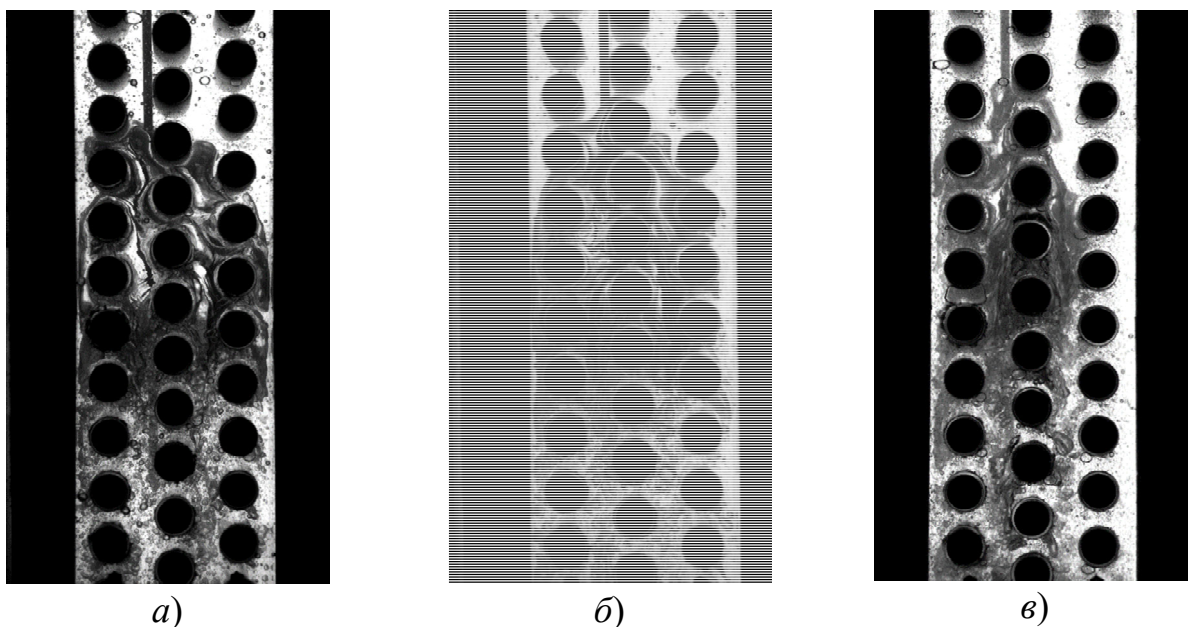


Рис. 4. Фотографии пузырей при объеме цилиндра 30 мл и давлении впрыска 7 атм при скоростях потока 0,3 м/с (а), 0,5 м/с (б), 0,7 м/с (в)

Влияние объема цилиндра на форму пузыря при скорости потока 0,5 м/с и давлении впрыска 12 атм показано на рис. 5.

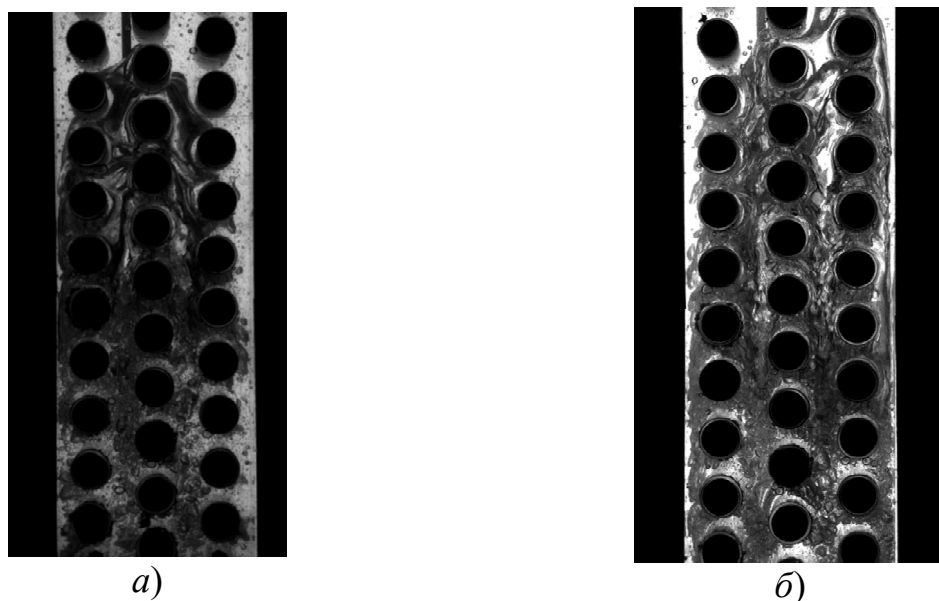


Рис. 5. Фотографии пузырей при скорости потока 0,5 м/с и давлении впрыска 12 атм при объемах цилиндра 30 мл (а), 70 мл (б)

Обсуждение

Экспериментальные исследования динамики газожидкостных потоков в каналах с горизонтальным пучком труб выявили следующие закономерности. При инъекции газовой фазы в жидкостной поток наблюдается существенное образование нестационарной картины.

Анализ полученных визуализационных данных позволяет установить ключевые этапы жизненного цикла газовых пузырей: начальное формирование пузыря на капилляре, его последующий отрыв и динамические изменение формы при движении в потоке.

Примечательно, что объем инжектируемого газа, в отличие от давления впрыска, не оказывает существенного влияния на максимальные значения динамического давления в системе. Во всех проведенных экспериментах наблюдалось устойчивое восходящее движение крупных газовых пузырей. При этом кинематические характеристики пузырей демонстрировали прямую зависимость от давления впрыска – с его увеличением отмечался рост скорости движения газовых включений.

Заключение

1. Проведено исследование влияния скорости нисходящего потока, давления впрыска, объема цилиндра на динамику газового пузыря в нисходящем течении в канале с горизонтальным пучком труб.

2. Показано, что увеличение давления впрыска приводит к увеличению длины пузыря.

3. Выяснено, что изменение скорости нисходящего потока оказывает влияние на структуру течения, вызывая отрывы пузырей и их «зависание» вблизи трубок с последующим срывом.

4. Выяснено, что изменение объема цилиндра не оказывает значительного влияния на динамику всплытия газового пузыря.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Clift R., Grace J.R., Weber M.E. Bubbles, Drops, and Particles. – New York: Academic Press, 1978. – 380 p.
2. Tomiyama A. [et al.] Drag and lift forces on a single bubble in a shear flow // Physics of Fluids. – 2002. – Vol. 14, № 2. – P. 69–79.
3. Bhaga D., Weber M.E. Bubbles in viscous liquids // Journal of Fluid Mechanics. – 1981. – Vol. 105. – P. 61–85.
4. Mougin G., Magnaudet J. Path instability of a rising bubble // Physical Review Letters. –
5. Zun I., Kljenak I. Bubble behavior in a horizontal tube bundle // Experimental Thermal and Fluid Science. – 1995. – Vol. 10, № 4. – P. 560–568.
6. Kandlikar S.G. Heat transfer mechanisms in bubbly flow // ASME Journal of Heat Transfer. – 2012. – Vol. 134, № 3. – P. 034001.

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