

УДК 532.529.6

Экспериментальное исследование движения и формы парового пузыря, всплывающего в кольцевом канале при субатмосферном давлении*

Р.А. Дехтярь, В.В. Овчинников

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: dekhtyar@itp.nsc.ru

Проведено экспериментальное исследование динамики парового пузыря, всплывающего в кольцевом канале при субатмосферном давлении. Образование парового пузыря происходит после вскипания перегретой дегазированной жидкости в кольцевом канале, состоящем из двух стеклянных трубок диаметрами 25 и 16 мм. Исследование показало, что динамика паровой полости при всплытии парового пузыря в кольцевом канале имеет качественное отличие от динамики указанного газового пузыря и при этом демонстрирует много общего с динамикой парового пузыря Тейлора, всплывающего в круглой трубке малого диаметра. Одной из особенностей поведения паровой полости в кольцевом канале является то, что в пульсационном режиме на стадии схлопывания паровая полость может распадаться на несколько частей.

Ключевые слова: паровой пузырь, вскипание, перегретая жидкость, кольцевой канал.

Введение

Пузырьки пара, обычно наблюдаемые в кипящей жидкости, представляют собой классический объект для изучения. Существующие в природе гейзеры, гидротермальные жерла и извержения вулканов — все эти явления тесно связаны с процессами образования пузырьков пара. Исследование подъема большого газового пузыря в трубе с жидкостью актуально для многих отраслей промышленности, энергетики и систем добычи нефти и газа [1–11]. Широкое распространение паровых пузырьков является сильной мотивацией для их изучения, но несмотря на кажущееся сходство, физические характеристики данных пузырьков могут отличаться от свойств пузырьков, содержащих газ, растворенный в жидкости. Пузырьки пара быстро реагируют даже на незначительные изменения давления окружающей среды или температуру жидкости, с которой они вступают в контакт. Газ, растворенный в жидкости, диффундирует в пузырьки пара, вызывая такие явления, как короткие и долгоживущие пузырьки, наблюдаемые в том же эксперименте в идентичных условиях. По этим причинам эксперименты с пузырьками пара сложны и менее эффективны, чем эксперименты с пузырьками газа [1].

* Работа выполнена в рамках госзадания ИТ СО РАН.

В работе [2] было систематизировано большое количество данных, опубликованных по вертикальному снарядному течению, характеризующемуся подъемом длинных снарядных пузырьков газа, диаметр которых почти соответствует диаметру трубки, — пузырьков Тейлора, с целью понять ограничения используемых методов. Основное внимание здесь уделялось одиночным пузырям и цепочкам тейлоровских пузырьков, поднимающихся через стоячие и прямоточные жидкости. В работе [3] подъем одиночного пузырька Тейлора через вертикальную стоячую ньютоновскую жидкость исследовался путем проведения полного безразмерного анализа с последующим выполнением анализа по порядку величин членов уравнений движения. На основе этого анализа был сделан вывод, что числа Фруда, Этвеша и Рейнольдса являются единственными физическими параметрами, влияющими на безразмерные уравнения снарядного течения, также были предложены корреляции для конечной скорости пузырька Тейлора и безразмерного напряжения сдвига стенки, показывающие значимость этих основных безразмерных параметров и подтверждающие данные других теоретических и экспериментальных работ, доступных в литературе. Авторами [4] были представлены результаты экспериментального исследования локальных профилей скорости, пульсаций и газосодержания в жидкостных пробках восходящего вертикального газожидкостного потока, а также распределения касательных напряжений стенки как под газовыми пробками, так и в жидкостных пробках. Было показано, что тороидальный вихрь, примыкающий к днищу газовой пробки, в значительной степени определяет развитие течения в жидкой пробке. В работе [5] с помощью PIV-метода исследовались характеристики кильватерных следов восходящих пузырьков воздуха и пара через стоячую и текущую деионизированную воду в вертикальном узком прямоугольном канале и было показано, что относительные конечные скорости пузырька воздуха при различных средних скоростях жидкости на входе почти равны конечной скорости в стоячей жидкости, а конечные скорости подъема одиночного пузырька воздуха и парового пузырька близки при адиабатических граничных условиях. В работе [6] было показано, что длинные пузырьки газа, поднимающиеся в вертикальной трубе, теряют осевую симметрию и становятся неустойчивыми в нисходящем потоке жидкости. Также было обнаружено, что при совместном действии силы тяжести и градиента давления, управляющего потоком жидкости, относительная скорость между пузырьком и жидкостью уменьшается с увеличением нисходящего потока, что снижает стабилизирующий эффект конвекции. В работе [7] исследовалась линейная устойчивость осесимметричного пузырька Тейлора, стационарно движущегося в текущей жидкости, заключенной в круглую трубу. Анализ полученных данных показал, что существуют области пространства, внутри которых пузырек нестабилен и принимает асимметричную форму.

Ранние исследования снарядного течения посвящены главным образом изучению характеристик газовой фазы [8, 9]. Скорость движения пузырей Тейлора в стационарной жидкости определялась с использованием формулы

$$U = C_1 (g \cdot D)^{0,5}, \quad (1)$$

где C_1 — коэффициент, g — ускорение свободного падения, D — внутренний диаметр трубы. В различных экспериментальных и теоретических исследованиях значение коэффициента C_1 варьируется от 0,328 до 0,361. Формула (1) дает хорошие результаты в установившихся потоках при постоянном расстоянии между пузырями. Однако было показано, что на скорости движения пузырей Тейлора влияют длины жидких пробок.

Это связано с взаимодействием между следом за «ведущим» пузырьем и носовой частью преследующего пузыря.

В последнее годы все большее распространение получают абсорберы пузырькового типа, например, на морских судах, где замена парового компрессионного холодильного оборудования на установку абсорбционного типа позволяет повысить эффективность использования отработанного тепла. Из-за сильных колебаний и тряски на таких судах условия эксплуатации абсорберов пленочного типа могут выходить за рамки режимных параметров. Абсорберы пузырькового типа более приспособлены для работы в описанных условиях, так как всегда в процессе абсорбции пузырьки пара хладагента находятся внутри раствора [10]. Коэффициенты тепло- и массопереноса в случае пузырькового абсорбера имеют более высокие значения, чем в случае пленочного [11]. Для повышения эффективности работы пузырьковых абсорберов очень важно моделирование процессов, происходящих при всплытии паровых пузырьков в растворе абсорбента. Нужно понять, какое влияние на форму и скорость восходящего парового пузырька в абсорбирующем растворе оказывают процессы тепломассопереноса между пузырьком пара и жидкостью. Необходимо учитывать тепловыделение при поглощении и изменение концентрации абсорбента в окрестности пузырька. Для моделирования процесса следует выбрать основные из множества влияющих параметров. Правильность выбора можно определить путем сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными. Однако если между ними есть несоответствие, то требуется проверка метода обработки первичных данных.

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование динамики парового пузыря, всплывающего в кольцевом канале при давлении насыщения паров жидкости над свободной поверхностью.

Экспериментальная установка и методика измерений

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Жидкость заливалась в калиброванную стеклянную трубку 1 внутренним диаметром 25 мм и длиной 700 мм. Для формирования кольцевого канала по оси трубки 1 устанавливались стеклянная трубка внешним диаметром 16 мм и цилиндрический электронагреватель 7 диаметром 16 мм. Верхняя часть трубки 1 через вакуумную ловушку соединялась с вакуумным насосом 3. Давление P_0 над жидкостью измерялось вакуумметром 2 (класс точности 0,5). Для перегрева жидкости использовался цилиндрический электронагреватель 7 с гальванической развязкой от раствора. В нержавеющей цилиндрический стакан, диаметр которого составлял 16 мм, а толщина стенки — 0,5 мм, помещался спиральный нагреватель из нихромовой проволоки (диаметр спирали 14 мм, длина 160 мм) с медными токоподводами (диаметр 3 мм). Пространство между спиралью и стенкой стакана заполнялось мелкодисперсным, электроизолирующим и хорошо теплопроводящим порошком. Высота заполнения трубки жидкостью над нагревателем (рис. 1) изменялась от 100 до 300 мм. Уровень тепловыделения на нагревателе задавался с помощью регулируемого источника постоянного тока 6 мощностью 1000 Вт (напряжение от 0 до 30 В, максимальный ток 100 А).

Для определения объема V_B , площади поверхности S_B , положений h_B и h_C , скорости движения U парового пузыря и уровня жидкости в трубке h_L проводилась видеосъемка рабочего участка двумя цифровыми видеокамерами 4 со скоростью до 1000 кадр/с. Поля кадров пересекались в области, расположенной вблизи уровня жидкости, который

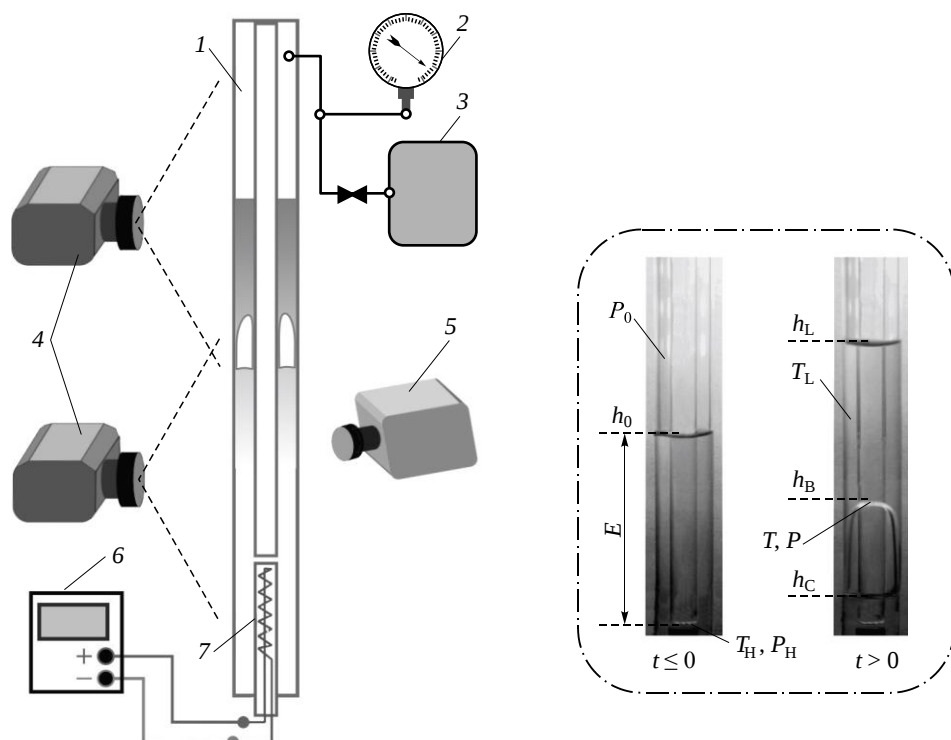


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — стеклянная трубка, 2 — вакуумный манометр, 3 — вакуумный насос, 4 — видеокамера, 5 — IR-камера, 6 — источник постоянного тока, 7 — электрический нагреватель.

использовался для согласования положения данных, получаемых при обработке кадров. Для синхронизации по времени кадров двух видеокамер использовалась фотовспышка с длительностью импульса 1,2 мс.

Перед проведением экспериментов жидкость дегазировалась, из кольцевого канала с помощью вакуумного насоса 3 откачивался воздух. Давление в паровой полости $P(t)$ рассчитывалось с учетом высоты столба жидкости над пузырем и давления паров в трубке P_0 по формуле

$$P(t) = P_0 + \rho_L(T) \cdot g \cdot [h_L(t) - h_B(t)], \quad (2)$$

где $h_L(t)$ — высота уровня жидкости в трубке, $h_B(t)$ — высота вершины пузыря, ρ_L — плотность жидкости при температуре T_L [12, 13], g — ускорение силы тяжести, t — время после вскипания. Объем $V(t)$ парового пузыря для различных моментов времени t можно оценить по изменению высоты уровня жидкости в трубке, видимой на видеокдрах, и вычислить по формуле

$$V(t) = [h_L(t) - h_0] \cdot \frac{\pi \cdot (D_1^2 - D_2^2)}{4}, \quad (3)$$

где D_1 , D_2 — внешний и внутренний диаметры кольцевого канала, $[h_L(t) - h_0]$ — изменение высоты уровня жидкости в трубке относительно уровня жидкости без пузырька h_0 . Масса пара в пузыре m рассчитывалась с использованием справочных данных для значения плотности пара ρ_v в зависимости от давления P и температуры пара T [13]:

$$m(t) = V(t) \cdot \rho_v(T, P). \quad (4)$$

Поле температуры жидкости T_L по высоте трубки перед вскипанием определялось по термограммам, полученным с помощью тепловизора 5. Тарировка термограмм тепловизора проводилась путем определения поправок, необходимых для определения температуры жидкости по данным температуры внешней поверхности стеклянной трубки, с учетом тепловой нагрузки и времени прогрева. Температура выше нагревателя $T(h)$ хорошо описывается экспоненциальной зависимостью

$$T(h) = T_0 + (T_H - T_0) \cdot \exp\left(-\frac{h - h_H}{\delta}\right), \quad (5)$$

где T_0 — начальная температура жидкости, T_H — температура жидкости перед вскипанием на уровне h_H верхней кромки нагревателя 7. При плотности стекла трубки $\rho = 2,2 \text{ г/см}^3$ данные тарировки соответствуют численному решению задачи о прогреве столба жидкости с учетом тепловых потерь через цилиндрическую стенку в окружающую среду с коэффициентом теплоотдачи $\alpha \sim 6 \div 8 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$, если принять, что для стекла трубки коэффициент теплопроводности стенки $\lambda \sim 0,74 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ и теплоемкость $c \sim 0,81 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$.

Экспериментальные результаты

Результат исследования показал, что существует несколько характерных режимов динамики паровой полости после вскипания жидкости в вертикальном кольцевом канале в зависимости от высоты начального уровня жидкости в канале и ее перегрева перед вскипанием. Высота столба жидкости определяет величину недогрева температуры жидкости до температуры насыщения около нагревателя. При увеличении перегрева так же растет объем перегретой жидкости над нагревателем. Существует два основных режима после вскипания — это полная конденсация парового пузыря после стадии роста и монотонный рост объема парового пузыря. При малых перегревах перед вскипанием и больших недогревах конденсация может происходить без отрыва пузыря от нагревателя. Аналогичные режимы наблюдаются в условиях большого объема (отличия только в форме парового пузыря). При значительных перегревах и малых недогревах на нагревателе может формироваться паровой пузырь, длина которого превышает длину рабочего участка канала.

Анализ данных по изменению объема парового пузыря показывает, что рост пузыря определяется диффузионным режимом. При этом наблюдается хорошее качественное соответствие с моделью, описанной автором [14], для роста сферического парового пузыря в жидкости, недогретой до температуры насыщения, при наличии перегретого слоя жидкости перед вскипанием.

На рис. 2 представлены кадры видеосъемки всплытия парового пузырька в кольцевом канале. Начальная высота уровня жидкости (воды) над нагревателем $E = 250 \text{ мм}$, давление в объеме $P_0 = 2727 \text{ Па}$, начальная температура жидкости $T_0 = 22,3 \text{ С}$, температура жидкости около нагревателя перед вскипанием $T_H = 37,5 \text{ С}$. Время t на кадрах отсчитывалось от момента вскипания. Профиль температуры по высоте выше нагревателя описывается зависимостью (5) с $\delta \sim 26 \text{ мм}$. На кадрах видно, что наблюдается немонотонное изменение размеров пузыря.

В работе [15] было показано, что важным параметром, определяющим характер движения и роста парового пузыря, является величина P/P_0 , равная отношению давления в жидкости около пузыря P к давлению над жидкостью P_0 . На рис. 3 показано, как меняются при всплытии одиночного пузыря в кольцевом канале со временем параметр P/P_0 ,

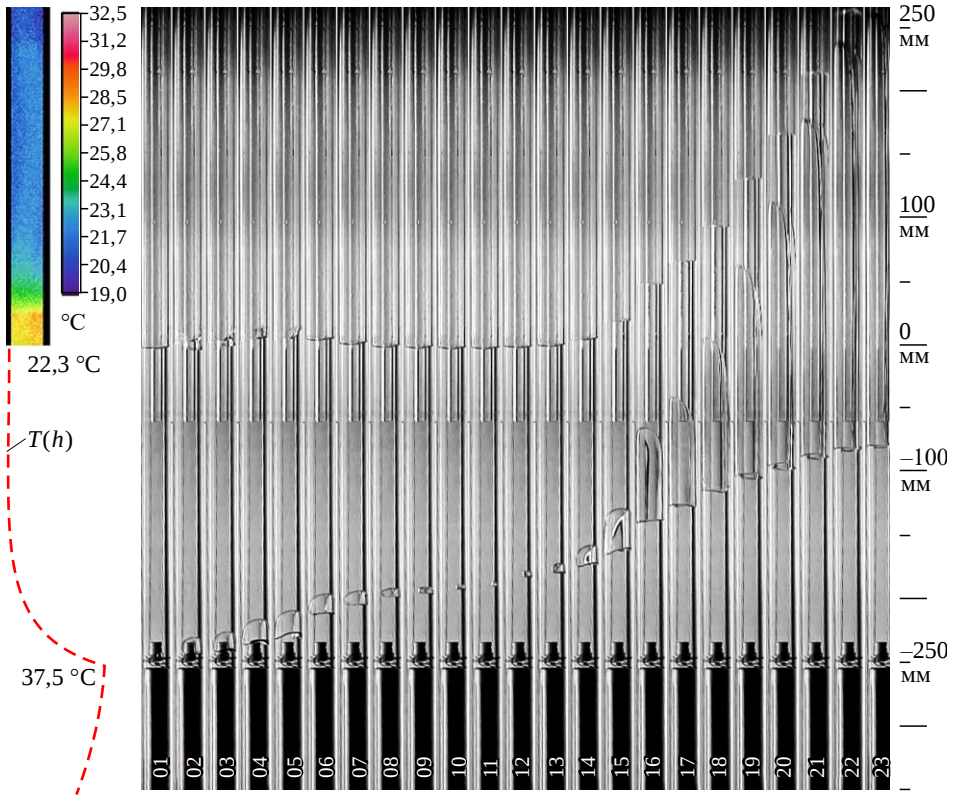


Рис. 2. Термограмма трубки перед вскипанием, профиль температуры воды по высоте канала $T(h)$ и кадры видеосъемки всплытия одиночного парового пузырька.

Режимные параметры: вода, $E = 250$ мм, $T_H = 37,5$ °C, $P_0 = 2727$ Па, $T_0 = 22,3$ °C, $\delta = 26$ мм.

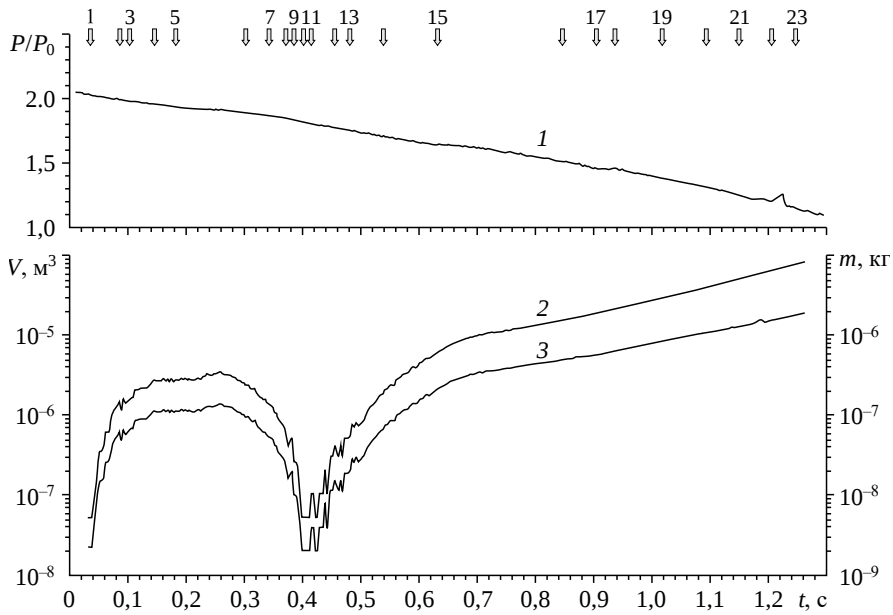


Рис. 3. Изменение параметра P/P_0 (1), объема V (2) и массы пара m (3) в пузырьке после вскипания.

Режимные параметры те же, что для рис. 2.

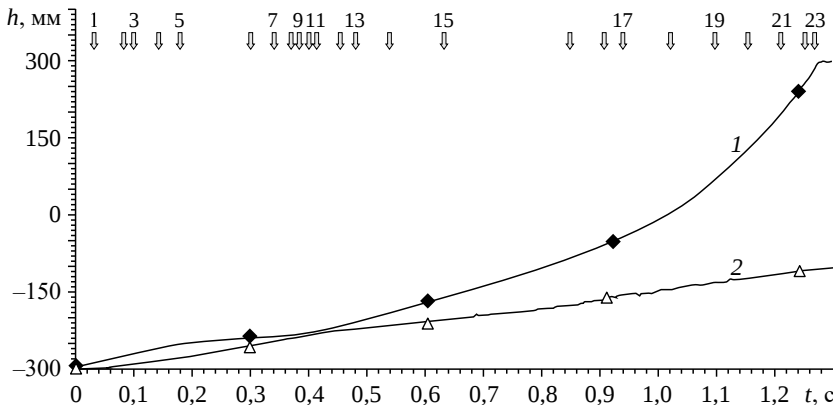


Рис. 4. Изменение положения вершины h_B (1) и дна h_C (2) пузырька при всплытии одиночного пузырька в кольцевом канале.

Режимные параметры те же, что для рис. 2.

объем и масса пара в пузырьке. Стрелки с цифрами указывают на моменты времени, соответствующие кадрам на рис. 2. На рис. 4 показан, как изменяется положение вершины h_B и дна h_C пузырька в канале. При этом скорость изменения дна пузырька h_C совпадает с расчетным значением для скорости всплытия газового пузырька, полученным в работе [16].

На рис. 5 показаны кадры видеосъемки всплытия нескольких паровых пузырьков в кольцевом канале. Начальная высота уровня жидкости над нагревателем $E = 250$ мм,

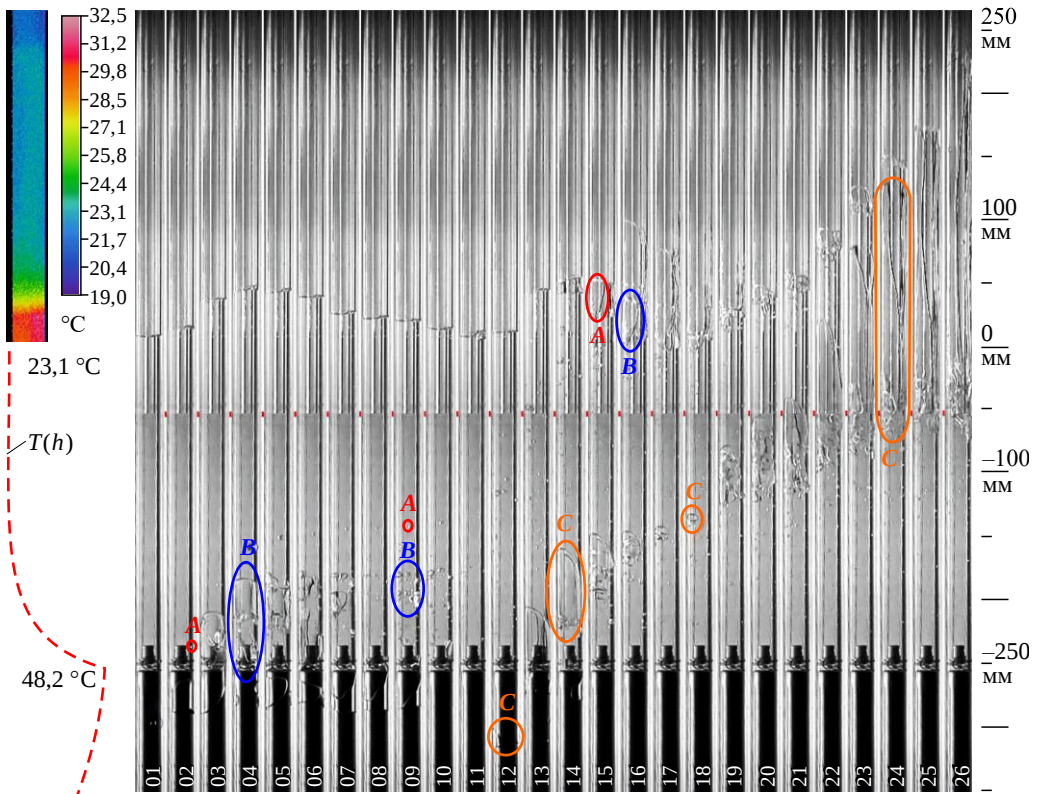


Рис. 5. Термограмма трубки перед вскипанием, профиль температуры воды по высоте канала $T(h)$ и кадры видеосъемки последовательного всплытия паровых пузырьков.

Режимные параметры: вода, $E = 250$ мм, $T_H = 48,2$ °C, $P_0 = 2900$ Па, $T_0 = 23,1$ °C, $\delta = 23$ мм.

давление в объеме $P_0 = 2900$ Па, начальная температура жидкости $T_0 = 23,1$ °С, температура жидкости около нагревателя перед вскипанием $T_H = 48,2$ °С. Профиль температуры по высоте выше нагревателя описывается зависимостью (5) с $\delta \sim 23$ мм.

Из рис. 6 видно, что для случаев всплытия нескольких пузырей и одиночного пузыря (см. рис. 3) наблюдается отличие, а именно: за счет присутствия нижнего пузыря увеличивается значение P/P_0 , что проявляется в длительности стадии «малого размера» верхнего пузыря в течение времени, когда нижний пузырь имеет «большой размер». Так, пузырь *A*, а затем и *B* выходят из стадии мелкого пузырька только вблизи свободной поверхности. Динамика изменения объема и массы пузыря *C* аналогична динамике изменения объема и массы одиночного пузыря, но отличается тем, что при конденсации пузыри *A* и *B* схлопываются и распадаются на несколько более мелких пузырьков. После выхода на поверхность пузырей *A* и *B* (при $t \sim 2,2$ с общий объем и масса пара резко уменьшились (см. рис. 6)) наблюдается резкий рост пузыря *C*, образовавшегося из многих мелких паровых частей, имеющих очень сложную форму и сильно волнистую поверхность. Из рис. 6 видно, что на интервале времен всплытия 2,2–2,6 с динамика роста объема и массы конгломерата *C* почти точно повторяет динамику роста одиночного пузырька на интервале времен всплытия 0,4–0,8 с (см. рис. 3).

Таким образом, в результате проведенных экспериментов можно отметить особенность всплытия нескольких паровых пузырей: существуют участки кольцевого канала, где скорость перемещения дна первого пузырька совпадает со скоростью всплытия газовых пузырьков, но есть также и другие участки, где эта скорость совпадает со скоростью перемещения вершины нижнего парового пузыря, то есть пузырек вовлекается в движение столбом жидкости, которое, в свою очередь, вызвано влиянием нижнего пузырька. В интервале времен всплытия от 0,9 до 1,3 с для пузырей *A* и *B* скорость газа и для пузыря *C* положение дна почти все время изменяются с постоянной скоростью (рис. 7).

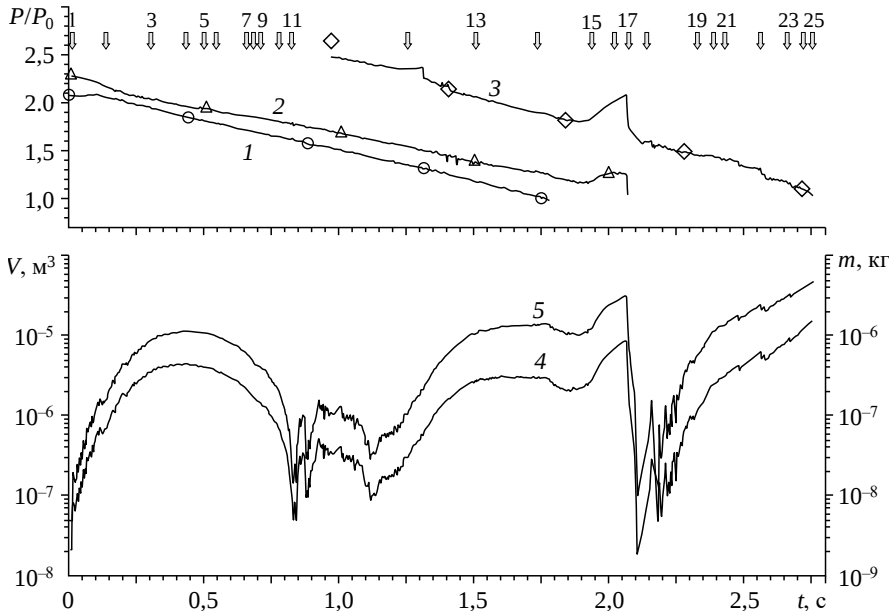


Рис. 6. Изменение параметра P/P_0 (1–3), массы пара m (4) и общего объема V (5) в пузырьках при последовательном всплытии паровых пузырьков.

Динамика изменения пузырей *A* (1), *B* (2), *C* (3); режимные параметры те же, что для рис. 5.

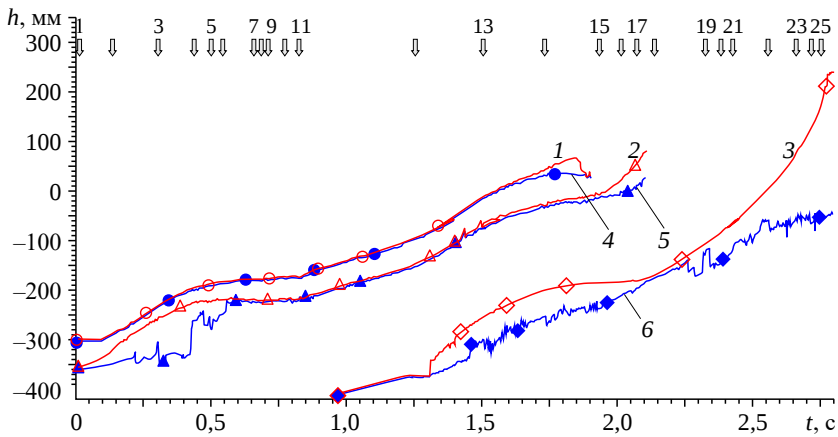


Рис. 7. Изменение положения вершины h_B и дна h_C пузырьков при всплытии в кольцевом канале.

h_B : пузырьки A (1), B (2), C (3), h_C : пузырьки A (4), B (5), C (6); режимные параметры те же, что для рис. 5.

В интервале времен всплытия от 0,3 до 0,8 с положение дна h_C пузыря A коррелирует с положением вершины h_B пузыря B. Аналогично при временах всплытия 1,3–1,8 с положение дна h_C пузырей A и B коррелирует с положением вершины h_B пузыря C.

Заключение

Исследование показало, что динамика паровой полости, всплывающей в дегазированной жидкости в зазоре кольцевого канала после вскипания на нагревателе в нижней части канала, соответствует динамике одиночного парового пузырька Тейлора, всплывающего в трубке малого диаметра [15]. Обнаружено, что при всплытии парового пузырька имеют место режимы с немонотонным изменением размеров пузыря, в том числе присутствуют режимы с пульсацией объема и массы пара в пузырьке. Для возникновения пульсационного режима необходимо, чтобы величина P/P_0 , равная отношению давления в пузыре к давлению над жидкостью P_0 превышала некоторое пороговое значение. Для воды пороговое значение равно 1,4. Особенность при конденсации в кольцевом канале в отличие от пузырька Тейлора в круглом канале состоит в том, что паровая полость может распадаться на несколько паровых пузырьков. В результате этого происходит дальнейший рост парового пузыря, который имеет при этом очень сложную форму и сильно волнистую поверхность.

Список обозначений

c — теплоемкость, Дж/(кг·К),
 D — диаметр трубы, м,
 h — высота столба жидкости, м,
 m — масса парового пузырька, кг,
 P — давление, Па,

t — время после вскипания, с,
 T — температура, °С,
 U — скорость движения парового пузырька, м/с,
 V — объем парового пузырька, м³.

Греческие символы

α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К),
 δ — константа в уравнении (5),

λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);
 ρ — плотность, кг/м³.

Индексы

0 — начальное значение,
 1 — внешний диаметр кольцевого канала,
 2 — внутренний диаметр кольцевого канала,
 B — положение вершины пузырька,

C — положение дна пузырька,
 H — положение верхней кромки нагревателя,
 L — уровень жидкости в трубке над пузырьком.

Список литературы

1. Prosperetti A. Vapor bubbles // Annual Review of Fluid Mechanics. 2017. Vol. 49, No. 1. P. 221–248.
2. Morgado A.O., Miranda J.M., Araujo J.D.P. and Campos J.B.L.M. Review on vertical gas–liquid slug flow // Intern. J. of Multiphase Flow. 2016. Vol. 85. P. 348–368.
3. Massoud E.Z., Xiao Q., El-Gamal H.A., Teamah M.A. Numerical study of an individual Taylor bubble rising through stagnant liquids under laminar flow regime // Ocean Engng. 2018. Vol. 162. P. 117–137.
4. Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Petukhov A.V., Gorelik R.S. Study of local hydrodynamic characteristics of upward slug flow // Experiments in Fluids. 1989. Vol. 7, No. 8. P. 560–566.
5. Song M., Huang Y., Zhang L., Wang J., Zan Y. Experimental observations on wake characteristics of a rising bubble in a vertical narrow rectangular channel // J. of Nuclear Engng and Radiation Sci. 2015. Vol. 1, Iss. 2. P. 021004-1–021004-12.
6. Lu X., Prosperetti A. Axial stability of Taylor bubbles // J. of Fluid Mechanics. 2006. Vol. 568. P. 173–192.
7. Abubakar H.A., Matar O.K. Taylor bubble motion in stagnant and owing liquids in vertical pipes. Part II: Linear stability analysis // J. of Fluid Mechanics. 2022. Vol. 941. P. 1–39.
8. Dumitrescu D.T. Strömung an einer luftblase im senkrechten rohr // Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. 1943. Vol. 23, No. 3. P. 139–149.
9. Нигматуллин Т.Р. Поверхность тейлоровского пузыря в вертикальных потоках в цилиндрических трубах // Докл. АН. 2001. Т. 381, № 1. С. 53–55.
10. Xu S.M., Jiang M.N., Hu J.Y., Wu X., Wang W. Visual experimental research on bubble absorption in a vertical tube with R124–DMAC working pair // Experimental Thermal and Fluid Sci. 2016. Vol. 74. P. 1–10.
11. Kang Y.T., Akisawa A., Kashiwagi T. Analytical investigation of two different absorption modes: falling film and bubble types // Intern. J. of Refrigeration. 2000. Vol. 23. P. 430–443.
12. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
13. Рывкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и пара. М: Энергия. 1980. 424 с.
14. Bankoff S.G. Diffusion-controlled bubble growth // Advances in Chemical Engng. 1966. Vol. 6. P. 1–60.
15. Slesareva E.Y., Dekhtyar R.A., Ovchinnikov V.V. Motion of a single vapor Taylor bubble in the vertical tube of small diameter // J. of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1359. P. 012128-1–012128-6.
16. White E.T., Beardmore R.H. The velocity of rise of single cylindrical air bubbles through liquids contained in vertical tubes // Chemical Engng Sci. 1962. Vol. 17, No. 5. P. 351–361.

*Статья поступила в редакцию 4 августа 2023 г.,
после доработки — 8 августа 2023 г.,
принята к публикации 17 августа 2023 г.*