

УДК 532.529.5

Экспериментальное исследование эволюции газовых пузырьков в жидком металле

**Н.А. Прибатурин¹, П.Д. Лобанов², А.И. Светоносков², А.С. Курдюмов²,
А.В. Чинак², С.М. Волков²**

¹*Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН,
Москва*

²*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

E-mail: nialp@mail.ru, lobanov@itp.nsc.ru

Приводятся результаты экспериментальных исследований структуры двухфазной среды «жидкий металл–газ» в вертикальных каналах в зависимости от расхода газовой фазы и диаметра канала. В качестве жидкой среды использовался свинцово-висмутовый расплав, находящийся при температуре 160 °С, в качестве газовой фазы — аргон. Получены данные по форме газовых пузырьков, временному изменению газосодержания в каналах, гистограммам распределения газосодержания, особенностям снарядного течения газовой фазы в расплаве металла.

Ключевые слова: эксперимент, жидкий металл, пузырек, двухфазное течение, температура.

Введение

Экспериментальному исследованию двухфазного газожидкостного течения посвящено большое количество работ, в которых приводятся данные о закономерностях распределения газосодержания, скоростей фаз, размеров пузырьков, режимов течения. Основная масса работ выполнена для совместного течения воды и газа. Анализ двухфазного течения, состоящего из жидкого свинца или свинцово-висмутового расплава и газовой фазы, актуален с точки зрения течения в циркуляционном контуре реакторных установок с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем. Такой теплоноситель гораздо тяжелее воды, в результате чего отношение плотности газа к плотности жидкого металла существенно меньше, чем для системы «вода–газ». Большая разница плотностей фаз приводит к увеличению плавучести газовой фазы и, следовательно, к изменению формы, размера и эволюции пузырьков газа в жидком металле.

Изучению двухфазного течения в жидком металле посвящен ряд работ [1–5]. В [1] приведен обзор экспериментальных исследований распределения скорости всплытия газовых включений в восходящем двухфазном потоке газ–жидкий металл в круглых трубах, прямоугольных каналах и узких зазорах, а также обзор существующих моделей

и сравнение их с экспериментальными данными для каналов различной геометрии. Представлены экспериментальные данные для потоков азот–ртуть, азот–свинец/висмут, азот–галлий, азот–натрий/калий в вертикальных, кольцевых и треугольных каналах для семи различных моделей. При сравнении моделей с экспериментальными данными не было найдено ни одной, способной хорошо описать эксперимент.

Визуальное наблюдение двухфазного течения в среде жидкого металла осложнено в силу его полной непрозрачности. В работах [2, 3] для преодоления этой трудности был использован метод нейтронной радиографии. С помощью такой техники осуществлено наблюдение за поведением газовых пузырей, измерены газосодержание, размер и скорость всплытия пузырьков. Измерения были проведены для течения двухфазной смеси азот–свинец/висмут в прямоугольном плоском канале шириной 0,1 м, высотой 0,53 м, глубиной 20 мм при атмосферном давлении 0,1 МПа и температуре расплавленного эвтектического сплава Pb/Bi 200 °С. Эксперименты проводились в условиях покоящейся жидкости при приведенных скоростях газа 0,00535–0,303 м/с. Газообразный азот вводили в расплавленный эвтектический сплав свинец–висмут через газовый инжектор, состоящий из 7 тонких трубок из нержавеющей стали (с внутренним диаметром 0,5 мм), расположенных вдоль прямой линии на дне бассейна.

В работе [4] проведены экспериментальные исследования двухфазного потока, состоящего из свинцово-висмутового расплава с азотными пузырьками, с использованием зондов проводимости и датчиков дифференциального давления в разных вертикальных трубах с внутренним диаметром 0,0693, 0,1063, 0,1552 м и высотой 1,124 м при атмосферном давлении и температуре 200 °С.

В работе [5] с целью верификации кода моделирования аварийной ситуации жидкометаллического ядерного реактора на быстрых нейтронах SIMMER-II выполнено экспериментальное исследование восходящего двухфазного течения азот–галлий в вертикальной круглой трубе большого диаметра с внутренним диаметром 0,1 м и высотой 1,0 м при атмосферном давлении 0,1 МПа и температуре галлия 70–80 °С.

Основное внимание в ранее выполненных работах уделялось пузырьковому режиму течения с определением размера пузырька, скорости его всплытия, газонаполнению столба жидкости.

Настоящая работа направлена на установление закономерностей эволюции газовых пузырей в свинцово-висмутовом расплаве при постепенном увеличении расхода газа и достижении снарядного режима течения, на определение влияния диаметра канала на этот процесс, детализацию гистограмм распределения газосодержания при пузырьковом и снарядном режимах течения.

Экспериментальный стенд и метод измерения

Эксперименты проводились на гидродинамическом контуре, схема которого приведена на рис. 1. Стенд содержит рабочий участок, бак с жидким металлом, переливной бак, циркуляционный насос, узел ввода газовой фазы, систему поддержания заданной температуры всех элементов стенда. Использованы три цилиндрических вертикальных рабочих участка с внутренним диаметром 8, 20 и 30 мм. В экспериментах применялся свинцово-висмутовый расплав, находящийся при температуре 160 °С.

Основное внимание было уделено созданию условий для наблюдения и фиксации режимов течения двухфазной среды. Поэтому рабочие участки были изготовлены из кварцевого стекла и имели высоту 1 м. Ранее [6] было показано, что использование каналов из кварцевого стекла позволяет добиться «прозрачности» двухфазного течения

Рис. 1. Схема двухфазного гидродинамического стенда (а) и вид рабочих участков (b).

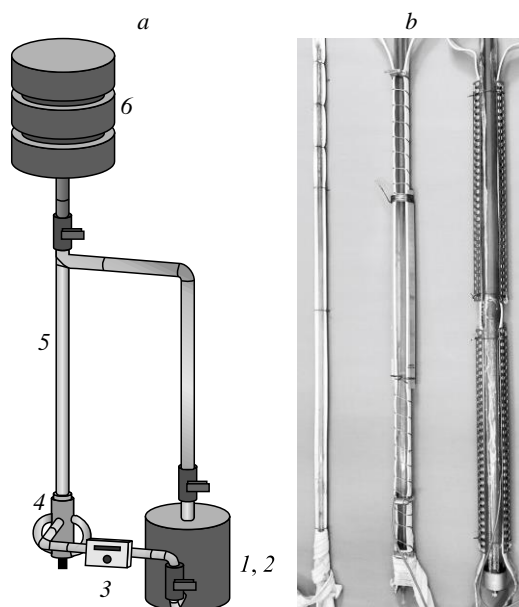
1, 2 — основной бак и насос, 3 — расходомер, 4 — входной коллектор, 5 — рабочий участок, 6 — расширительный бак.

в жидком металле. С помощью канала из кварцевого стекла можно не только визуально контролировать режим течения, но и наблюдать эволюцию отдельных пузырьков газа в жидком металле. Недавно подобный метод независимо был использован для изучения двухфазного потока газ – галинстан [7]. Рабочие участки были смонтированы в гидродинамический контур с применением унифицированных узлов крепления. Это позволяло легко менять рабочие участки в экспериментальном стенде.

Поскольку эксперименты выполнялись с расплавом жидкого металла, находящегося при высокой температуре, основной технической задачей работы гидродинамического контура было обеспечение однородности температуры всех конструктивных элементов контура для исключения областей «захолаживания» металла в контуре. Все элементы гидродинамического стенда разогревались до температуры жидкого металла и затем поддерживались при этой температуре. Для этого использовалась 16-канальная система, состоящая из электрических спиральных нагревателей, узла подвода и регулировки электрической мощности, термопар и измерителей-контроллеров температуры ТРМ-138. Кварцевые рабочие участки были оснащены индивидуальными нагревателями, которые подключались к терморегуляторам ТРМ-138, и с их помощью поддерживалась необходимая температура. Температура жидкого металла и элементов контура измерялась с помощью термопар хромель – алюмель (тип К). Для нагрева рабочих участков применялась нагревательная лента ЭНГЛ-1 длиной 2 м с удельной мощностью нагрева 100 Вт/м.

Двухфазная среда создавалась путем ввода в свинцово-висмутовый расплав инертного газа аргона. Для этого использовался металлический капилляр с внутренним диаметром 3 мм, установленный в нижней части рабочих участков. Начальная температура газа составляла 25 °С. Приведенный к нормальным условиям расход газа контролировался с помощью регуляторов-измерителей и находился в пределах 100 ÷ 3200 мл/мин. Неопределенность измерения расхода газа составляла $\pm 2\%$ от измеряемой величины. Расход газа варьировался от минимально возможного, при котором в теплоносителе начинают формироваться одиночные газовые пузырьки, до максимально возможного, при котором двухфазное течение становилось существенно неустойчивым.

Рабочие участки заполнялись жидким металлом так, чтобы его свободный уровень устанавливался на высотной отметке 0,5 м от места ввода газовой фазы. В ходе экспериментов контролировались следующие параметры: температура теплоносителя в рабочем участке; расход и температура газовой фазы; температуры различных элементов стенда, оснащенных индивидуальными нагревателями; мощность, подводимая к электрическим



нагревателям экспериментальной модели. Температура жидкометаллических теплоносителей, а также элементов конструкции поддерживалась на одном и том же уровне в ходе всех экспериментов с точностью до $\pm 1,5^\circ\text{C}$.

Для определения формы газовых пузырей и их эволюции использовался метод измерений на основе скоростной видеорегистрации. Применялась цифровая камера JET 19 (Капа Instruments, Израиль) с частотой съемки 960 кадров в секунду. Поле съемки охватывало как область движения газовой фазы в рабочих каналах, так и изменение свободного уровня теплоносителя. Это позволяло фиксировать форму, эволюцию пузырей газа и определять интегральное газосодержание $\langle\varphi\rangle$ по высоте рабочих участков.

Определение границ газовой фазы в кварцевой трубке с жидким металлом имеет свою специфику. В отличие от пузырьков в воде, жидкий металл непрозрачен, вследствие чего отсутствует возможность получения теневых изображений газовой фазы. Фотографии, полученные в отраженном свете, имеют ряд оптических дефектов, осложняющих последующую обработку. Металл дает сильные блики и затрудняет определение межфазной границы. Поэтому при обработке изображений вырезается сегмент трубки, который хорошо освещен и не подвержен сильным бликам. Для увеличения точности измерения этот сегмент должен иметь протяженность вдоль всего экспериментального участка. Разделение газовой фазы от жидкой по уровню освещенности также затруднительно в связи с тем, что внутренняя поверхность газового пузыря имеет зеркальную поверхность. В ходе обработки экспериментальных данных выявлено, что наиболее чувствительным алгоритмом отслеживания границ металла является «вычитание» последовательных кадров. С помощью компьютерной обработки изображений определялась форма границы свободной поверхности жидкометаллического теплоносителя для каждого кадра видеорегистрации. Это позволяло определять не только интегральное, но и мгновенные значения газосодержания φ по соотношению

$$\varphi = (h - h_0)/h_0,$$

где h — уровень столба в двухфазном течении, h_0 — начальный уровень жидкого металла. В проведенных ранее исследованиях взаимодействия инжектируемого газа аргона со свинцовым теплоносителем, выполненных с помощью резистивного датчика газосодержания [8] и поплавкового указателя уровня, было обнаружено хорошее соответствие величин газосодержания $\langle\varphi\rangle$, определяемого двумя методами. Таким образом, наблюдение за свободным уровнем теплоносителя позволяет качественно отслеживать эволюцию газонаполненности пузырьковой структуры с жидкометаллическим теплоносителем.

Результаты экспериментов

Основные измерения по определению эволюции газовых пузырей были проведены при неподвижной жидкой фазе. На рис. 2–4 приведена эволюция газовых пузырей в жидком металле при постепенном увеличении расхода газа (Q_g) от минимального до максимально возможного.

При минимальном расходе газа в жидком металле формируются маленькие пузырьки газа с формой, близкой к сфероидальной. На рис. 2 это показано на примере движения пузырька в трубе диаметром 8 мм, заполненной свинцово-висмутовым расплавом. По мере движения пузырька на межфазной границе развивается неустойчивость, пузырек теряет свою сферическую симметричность, но сохраняется как целый объект

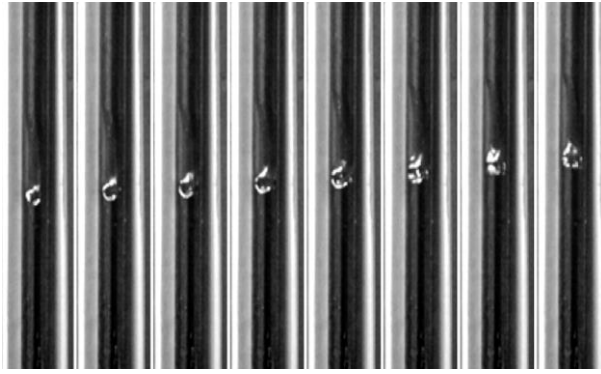


Рис. 2. Газовый пузырек, всплывающий в трубе диаметром 8 мм со свинцово-висмутовым расплавом.
 $T = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Q_g = 50\text{ мл/мин}$, время между кадрами 4,2 мс.

без распада на кластер более малых пузырьков. С увеличением расхода газа неустойчивость межфазной границы пузырька с жидким металлом прогрессирует, пузырек не только начинает изменять форму при своем движении, но и меняет траекторию движения. При повышении расхода газа в канале появляются пузыри большего размера в виде полусферического сегмента, заполняющего поперечное сечение канала (см. рис. 3). Межфазная граница пузырька нестабильна, на ней развиваются возмущения, которые в ходе эволюции существенно меняют форму пузырька. Одной из причин неустойчивости поверхности газовых пузырей в жидком металле является низкая смачиваемость жидкого металла со стенкой.

Изменение вертикальной координаты при всплытии пузырьков в неподвижном расплаве металла позволяет оценить скорость всплытия пузырька в жидком металле. Эта величина составляла $(0,33 \pm 0,3)\text{ м/с}$. Исследование движения пузырей в различных жидкостях производится в течение достаточно длительного времени. Например, в работе [9] на основании экспериментальных данных и численных расчетов проведен анализ влияния сил поверхностного натяжения и вязкости жидкости на скорость всплытия и форму одиночных пузырей. Оценка скорости всплытия «видимых» пузырей по предложенной в [9] диаграмме составляла $0,25 - 0,35\text{ м/с}$, что достаточно хорошо соответствует данным, полученным в настоящей работе.

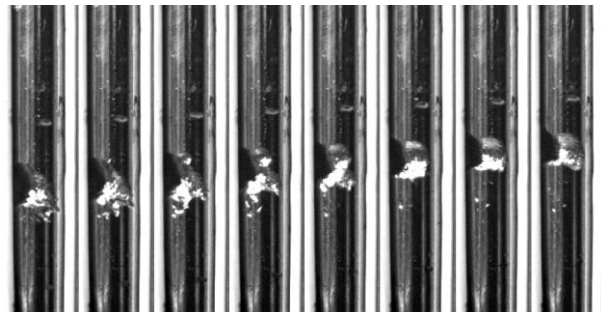


Рис. 3. Газовый пузырь, перекрывающий поперечное сечение трубы диаметром 20 мм со свинцово-висмутовым расплавом.
 $T = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Q_g = 200\text{ мл/мин}$, время между кадрами 4,2 мс.



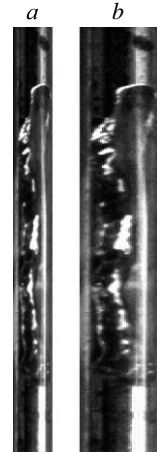
Рис. 4. Эволюция газового снаряда в трубе диаметром 20 мм со свинцово-висмутовым расплавом.
 $T = 160^\circ\text{C}$, $Q_g = 700$ мл/мин, время между кадрами 4,2 мс.

Дальнейшее увеличение расхода газа приводит к формированию в каналах с жидким металлом газовых снарядов. Однако их форма существенно отличается от классической формы пузыря Тейлора в круглой трубе [10], фиксируемой в двухфазных течениях с неметаллическими жидкостями. Типичная эволюция газового снаряда, всплывающего в расплаве жидкого металла, приведена на рис. 4. Измерения показали, что, в отличие от классического случая, не существует стабильной пленки жидкости между поверхностью снаряда и стенкой канала. Эта область газовой полости подвержена интенсивным возмущениям. В отличие от хорошо изученного снарядного режима течения в системе «вода – газ», эволюция газового снаряда в жидком металле нестабильна, что выражается в виде хаотического колебания границы раздела газ – жидкость и нерегулярности периодов формирования и следования снарядов в жидкости. Форма газового снаряда постоянно изменяется, их эволюция напоминает винтообразное движение. Подобное поведение газового снаряда было зафиксировано и в работе [11], где для регистрации был применен рентгенографический метод. Отметим также, что аналогичная нестационарность межфазной границы снаряда наблюдалась для кольцевого канала с водяным теплоносителем [12].

В результате измерений было установлено, что чем больше диаметр канала, тем больше межфазная граница газового снаряда подвержена возмущениям, стремящимся изменить его форму. Это связано с тем, что возникающие локальные течения вблизи поверхности раздела фаз, в отличие от основного восходящего течения, приводят к перераспределению скорости жидкости в радиальном направлении. Этот эффект усиливается с увеличением диаметра канала, вызывая случайные возмущения межфазной границы и переводя тем самым классическую форму газового снаряда в форму с хаотически изменяющейся межфазной поверхностью. Такая форма газового снаряда приведена на рис. 5 для двух размеров канала. При этом газовая полость все-таки сохраняется как целое, но возникают локальные изменения поперечного размера полости, перемещаемые случайным образом внутри сечения канала.

Нестабильная форма удлиненного пузыря препятствует определению его скорости, так как не ясно, в каких именно областях находятся его носик или центр донной области в текущий момент времени. Достаточной статистикой «видимых» газовых снарядов в покоящейся жидкости авторы, к сожалению, не обладают.

Рис. 5. Форма газового снаряда в каналах диаметром 8 мм (а) и 20 мм (b), заполненных свинцово-висмутовым расплавом.



На рис. 6 приведены формы изменения φ в двухфазном потоке, оцененные по эволюции свободной поверхности, и гистограммы распределения газосодержания для пузырькового и снарядного режимов, реализуемых в каналах разного диаметра (N — количество случаев попадания значений в выбранный диапазон). При переходе от пузырькового режима к снарядному колебания уровня смещаются в область более низких частот. В случае пузырькового режима выделяется формообразующее значение газосодержания на уровне 2,5–3,5 %. Снарядный режим течения начинает фиксироваться при газосодержании 20–30 %. Для этого режима гистограмма имеет широкополосный вид, свидетельствующий об отсутствии какой-либо определенности в выделении характерного линейного размера газового снаряда. Необходимо принимать в расчет средневесовое значение, определяемое по форме гистограммы.

Вследствие изменения ширины гистограммы при различных режимах двухфазного потока зависимость газосодержания от расхода газа целесообразно представить в виде графиков изменения не только среднего значения газосодержания, но и его минимального и максимального значений. На рис. 8 приведена такая типичная зависимость от удельного расхода газовой фазы. Как видно, с увеличением расхода газа происходит практически линейный рост газосодержания, что согласуется с известными литературными данными. Можно заметить, что при увеличении диаметра канала наклон прямой изменения газосодержания изменяется с увеличением расхода газовой фазы. Это наблюдается при скоростях газовой фазы $v_g = 40–60$ мм/с, что соответствует переходу от пузырькового течения к снарядному и хаотичному изменению межфазной границы газовых снарядов.

Измерения показали, что при дальнейшем увеличении расхода газовой фазы снарядный режим течения переходит в режим хаотического чередования фрагментов

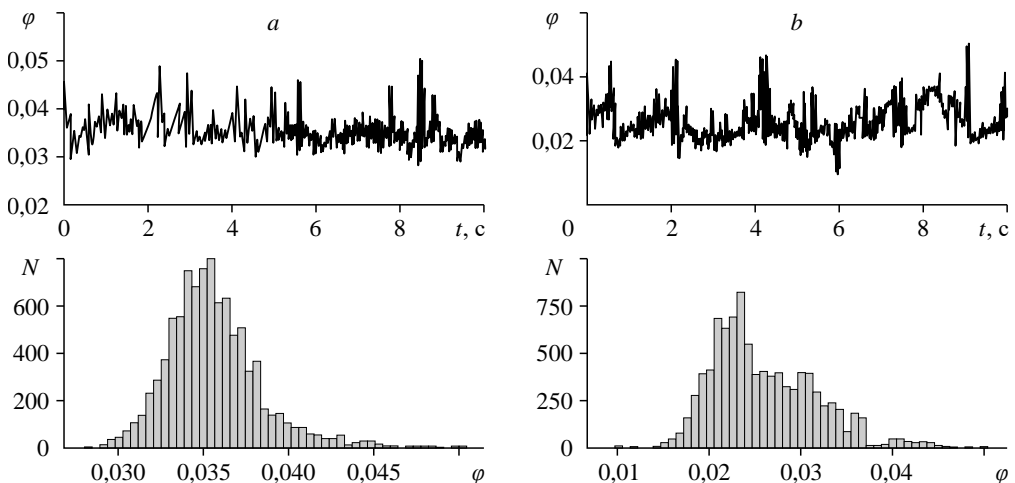


Рис. 6. Временной профиль и гистограмма газосодержания при пузырьковом режиме.

а — диаметр канала 8 мм, расход газа 20 мл/мин;

б — диаметр канала 30 мм, расход газа 200 мл/мин.

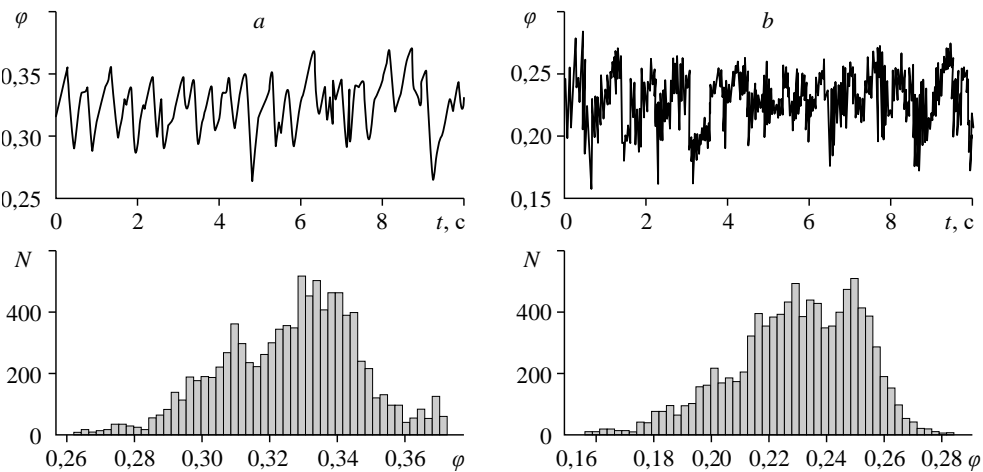


Рис. 7. Временной профиль и гистограмма газосодержания при пузырьковом режиме.

a — диаметр канала 8 мм, расход газа 200 мл/мин; *b* — диаметр канала 30 мм, расход газа 3000 мл/мин.

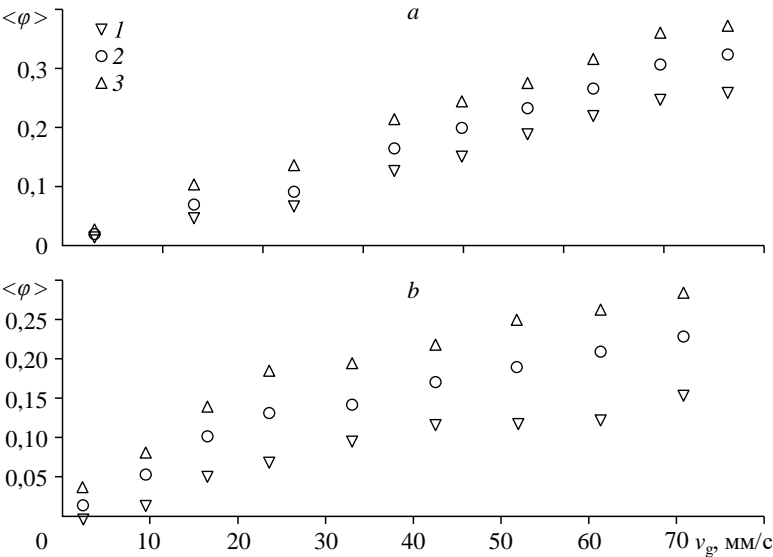


Рис. 8. Минимальное (1), среднее (2) и максимальное (3) значения газосодержания.

Диаметр канала 8 (*a*) и 30 (*b*) мм.

жидкого металла и газовой фазы с неопределенными случайными размерами и развитием ударно-волновых явлений.

Выводы

Определены закономерности эволюции газовой фазы в неподвижном свинцово-висмутовом теплоносителе, находящемся при температуре 160 °С в вертикальных каналах различного диаметра (8, 20, 30 мм), в зависимости от расхода газа. Для всех каналов при постепенном увеличении расхода газовой фазы зафиксирован переход от пузырькового к снарядному режиму течения. Получены данные по изменению формы пузырьков и газовых снарядов, закономерностям эволюции газосодержания. Показано, что классического снарядного течения с равномерной пленкой жидкости на цилиндрической части

газового снаряда в системе «жидкий металл – газ» не возникает, форма газового снаряда нестабильна. Снарядный режим течения всегда сопровождается развитием сильной неустойчивости на границе газовой полости жидкого металла, приводящей к случайному значению межфазной поверхности.

Список литературы

1. **Xiuzhong Sh., Takashi H.** Distribution parameter and drift velocity for upward gas-liquid metal two-phase flow // Appl. Thermal Engng, 2021. Vol. 184. P. 1–22.
2. **Hibiki T., Saito Y., Mishima K., Tobita Y., Konishi K., Matsubayashi M.** Study on flow characteristics in gas-molten metal mixture pool // Nucl. Engng. Des. 2000. Vol. 196. P. 233–245.
3. **Mishima K., Hibiki T., Saito Y., Nishihara H., Tobita Y., Konishi K., Matsubayashi M.** Visualization and measurement of gas-liquid metal two-phase flow with large density difference using thermal neutrons as microscopic probes // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A: Accelerat. Spectrom. Detect. Assoc. Equip. 1999. Vol. 424. P. 229–234.
4. **Nishi Y., Kinoshita I., Nishimura S.** Experimental study on the gas lift pump in lead-bismuth eutectic // Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, B Hen. 2004. Vol. 70. P. 715–722.
5. **Saito M., Sawada T., Teraoka Y., Netu A.** Dispersion characteristics of gas-liquid two-phase pools // Proc. of the 6th Intern. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-6). San Diego, USA. 1998. May, 10–14. 6 p.
6. **Mosunova N.A., Alipchenkov V.M., Pribaturin N.A. et al.** Lead coolant modeling in system thermal-hydraulic code HYDRA-IBRAE/LM and some validation results // Nucl. Engng and Design. 2020. Vol. 359. P. 110463–110463-11.
7. **Rosettani J., Ahmeda W., Geddis P., Wu L., Clements B.** Experimental and numerical investigation of gas-liquid metal two-phase flow pumping // Intern. J. Thermofluids. 2021. Vol 10. P. 100092-1–100092-16.
8. **Усов Э.В., Лобанов П.Д., Кутлиметов А.Э., Кудашов И.Г., Чухно В.И., Лежнин С.И., Прибатурин Н.А., Кашинский О.Н., Светоносков А.И., Мосунова Н.А.** Экспериментальное моделирование гидродинамики и теплообмена при пузырьковом и снарядном режимах течения газа в тяжелом жидком металле // Теплоэнергетика. 2018. Т. 65. С. 82–87.
9. **Волков П.К., Чиннов Е.А.** Стационарное всплытие одиночного пузыря в неограниченном объеме жидкости // Прикл. механика и технич. физика. 1989. № 1. С. 94–99.
10. **Уоллис Г.** Одномерные двухфазные течения. М.: Мир, 1972. 436 с.
11. **Saito Y., Mishima K., Tobita Y., Suzuki T., Matsubayashi M.** Measurements of liquid–metal two-phase flow by using neutron radiography and electrical conductivity probe // Exp. Therm. Fluid Sci. 2005. Vol. 29. P. 323–330.
12. **Кашинский О.Н., Курдюмов А.С.** Трение на стенке при движении газовых снарядов в кольцевом канале // Теплофизика и аэромеханика. 2021. Т. 28, № 2. С. 265–269.

*Статья поступила в редакцию 31 мая 2023 г.,
после доработки — 4 октября 2023 г.,
принята к публикации 21 ноября 2023 г.*