

П. Д. Лобанов¹✉, А. И. Светоносов¹, Н.А. Прибатурин¹

Визуализация движения пузырей в жидком металле

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

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

Ключевые слова: газовый пузырь, двухфазный поток, жидкий металл

P. D. Lobanov¹✉, A. I. Svetonosov¹, N. A. Pribaturin¹

Visualization of bubble motion in liquid metal

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

Abstract. The paper presents the results of experimental studies on the structure of a two-phase medium (liquid metal–gas) in vertical channels, depending on the gas flow rate and channel diameter. A lead-bismuth melt at a temperature of 160°C was used as the liquid, while argon served as the gas phase. Data were obtained on the shape of gas bubbles, temporal variations in gas holdup within the channels and the characteristics of slug flow of the gas phase in the metal melt.

Keywords: gas bubble, two-phase flow, liquid metal, hydrodynamics

Введение

Экспериментальным исследованиям двухфазного газожидкостного течения посвящено довольно много 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. Двухфазное течение, представляющее собой смесь жидкого свинца или свинцово-висмутового расплава и газовой фазы, является важным объектом изучения при моделировании и проектировании циркуляционных контуров ядерных реакторных установок с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем. Подобные теплоносители, обладают высокой плотностью и температурной устойчивостью. Но, в отличие от системы вода-газ, соотношение плотности газа и жидкого металла значительно ниже.

Большая разность плотностей фаз приводит к увеличению плавучести газовой фазы, и связанными с этим возможными изменениями формы, размера и эволюции пузырьков газа в жидком металле.

Исследованию 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 существующих моделей и сравнение их с экспериментальными данными для каналов различной геометрии. Представлены экспериментальные данные для потоков, в которых дисперсную фазу представлял азот, а несущую – ртуть, свинец/висмут, галлий, натрий, калий, в вертикальных, кольцевых и треугольных каналах и семи различных моделей. Совпадение моделей с экспериментальными данными было проверено, и не найдено ни одной модели, 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 было проведено 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 и температуре расплавленного эвтектического сплава Pb/Bi 200°C. Эксперименты проводились в условиях покоящейся жидкости при приведенных скоростях газа до 0,3 м/с. Подача газообразного азота в расплавленный эвтектический сплав свинец-висмут осуществлялась через газовый инжектор, который представлял собой 7 капилляров из нержавеющей стали с внутренним диаметром 0,5 мм, установленных 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 различных вертикальных трубах с внутренним диаметром 0,069 м, 0,106 м и 0,155 м и высотой более одного метра при атмосферном давлении и температуре 200 °C.

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 до 80°C.

Основное внимание в ранее выполненных работах уделялось пузырьковому режиму течения с определением размеров пузырька, скорости его всплытия.

Данная работа направлена на установление изменений закономерности эволюции газовых пузырей в свинцово-висмутовом расплаве при постепенном уве-

личении расхода газа и достижении снарядного режима течения, влияния диаметра канала на этот процесс, детализацию гистограмм распределения газосодержания при пузырьковом и снарядном режимах течения.

Методы и материалы

Эксперименты проводились на гидродинамическом контуре, схема которого приведена на рис. 1. Экспериментальная установка включает в себя рабочий участок, бак с жидким металлом, переливной бак, циркуляционный насос, узел подачи газовой фазы, систему поддержания заданной температуры всех элементов стенда. Были использованы 3 цилиндрических вертикальных рабочих участка с внутренним диаметром 8, 20 и 30 мм. Температура свинцово-висмутового расплава в эксперименте составила 160°C.

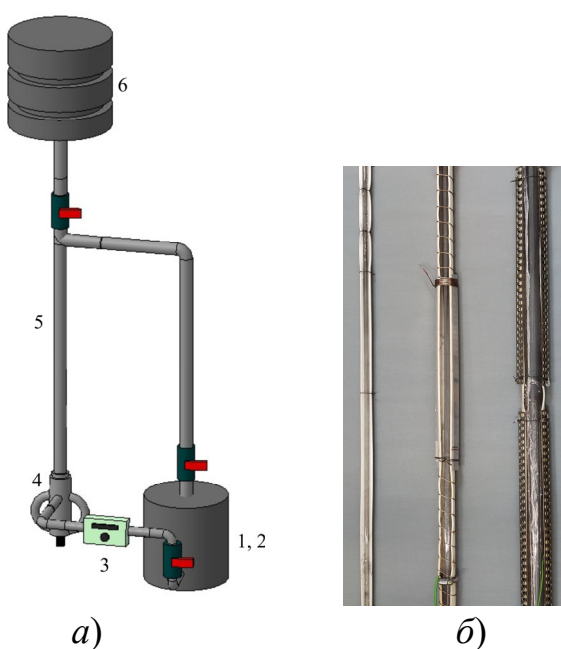


Рис.1. Схема двухфазного гидродинамического стенда – а) и вид рабочих участков – б): 1, 2 – основной бак и насос; 3 – расходомер; 4 – входной коллектор; 5 – рабочий участок; 6 – расширительный бак

Основное внимание в данной работе 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 в жидком металле. Использование канала из кварцевого стекла позволяет визуально контролировать не только режим течения, но и наблюдать эволюцию отдельных пузырьков газа в жидком металле. Недавно подобный метод независимо был использован для изучения двухфазного потока газ-галлистан [7]. Рабочие участки монтировались в гидродина-

мический контур, используя унифицированные узлы крепления. Это позволяло легко менять рабочие участки в экспериментальном стенде.

Во избежание «захолаживания» свинцового-висмутового расплава в контуре, все его конструктивные элементы нагревались до температуры расплава с последующим поддержанием с целью обеспечения ее однородности. Для этого использовалась 16 канальная система, состоящая из электрических спиральных нагревателей, узла подвода и регулировки электрической мощности, терморпар и измерителей-контроллеров температуры ТРМ-138. Кварцевые рабочие участки были оснащены индивидуальными нагревателями, которые подключались к терморегуляторам ТРМ-138 и с их помощью поддерживали необходимую температуру. Измерение температур жидкого металла и элементов контура производилось с помощью терморпар хромель-алюмель (тип К). Для нагрева рабочих участков применялась нагревательная лента ЭНГЛ-1.

Результаты

Результаты измерений по определению эволюции газовых пузырей были проведены при неподвижной жидкой фазе. Эволюция газовых пузырей в жидком металле при постепенном увеличении расхода газа от минимального до максимально возможного приведена на рис. 2 (а-в).

При минимальном расходе газа в жидком металле формируются маленькие пузырьки газа с формой, близкой к сфероидальной. Фотографии такого пузыря в расплаве жидкого металла в трубе диаметром 8 мм приведены на рис. 2 а. По мере движения пузырька на межфазной границе развивается неустойчивость, пузырек теряет свою сферическую симметричность, но сохраняется как целый объект без распада на кластер более малых пузырьков. С увеличением расхода газа неустойчивость межфазной границы пузырька с жидким металлом прогрессирует, пузырек начинает не только изменять форму при своем движении, но и меняет траекторию движения. Постепенно повышение расхода газа в канале приводит к образованию пузырей большего размера, которые принимают форму полусферического сегмента, заполняющего поперечное сечение канала (см рис. 2 б). Межфазная граница газового пузырька в жидком металле подвержена неустойчивости: на ней возникают и развиваются возмущения, которые по мере своего роста и взаимодействия с окружающей жидкостью значительно искажают исходную форму пузырька. Одним из ключевых факторов, способствующих такой неустойчивости, является слабое смачивание поверхности стенки канала жидким металлом.

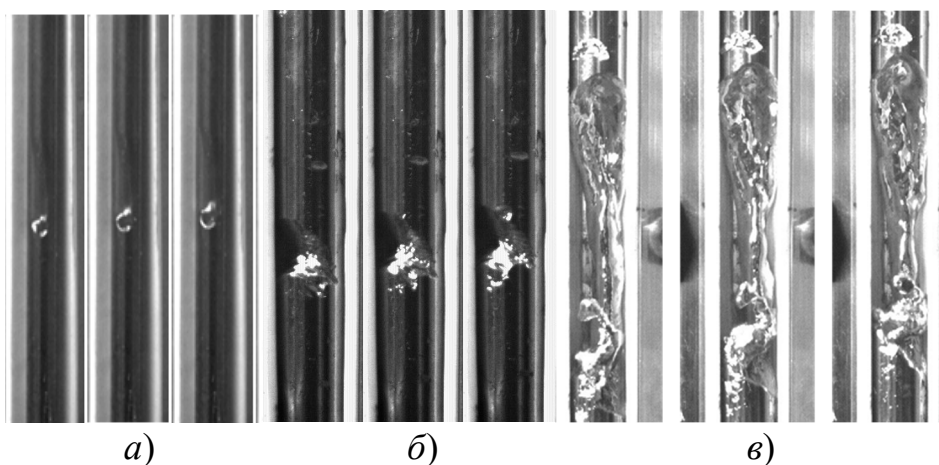


Рис. 2. Эллиптический газовый пузырек *а)*, полусферический газовый пузырек *б)* и газовый снаряд *в)*, всплывающие в трубе со свинцово – висмутовым расплавом, $T = 160^{\circ}\text{C}$, время между кадрами 4,2 мс.

Дальнейшее увеличение расхода газа приводит к формированию в каналах с жидким металлом газовых снарядов. Тем не менее, форма газовых пузырей в жидком металле заметно отличается от «классической» формы пузыря Тейлора, наблюдаемой в круглых каналах при двухфазных течениях [8]. На рис. 2в представлена типичная последовательность изменений формы газового пузыря (газового снаряда), всплывающего в расплаве жидкого металла. Экспериментальные данные показали, что, в отличие от классического случая, для жидкометаллической среды не формируется устойчивая жидкая пленка между поверхностью пузыря и стенкой канала. Вместо этого вблизи стенки образуется неустойчивая область, в которой постоянно развиваются возмущения, приводящие к флуктуациям формы и положения пузыря. 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 [9], где для регистрации был применен рентгенографический метод. Отметим также, что аналогичная нестационарность межфазной границы снаряда наблюдалась для кольцевого канала с водяным теплоносителем [11].

Заключение

Определены закономерности эволюции газовой фазы в неподвижном свинцово-висмутовом теплоносителе, находящегося при температуре 160°C 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Xiuzhong Shen, Takashi Hibiki. Distribution parameter and drift velocity for upward gas-liquid metal two-phase flow, *Applied Thermal Engineering*, 2021 Т. 184, pp. 1 – 22.
2. T. Hibiki, Y. Saito, K. Mishima, Y. Tobita, K. Konishi, M. Matsubayashi, Study on flow characteristics in gas-molten metal mixture pool, *Nucl. Eng. Des.* 196 (2000) 233–245.
3. K. Mishima, T. Hibiki, Y. Saito, H. Nishihara, Y. Tobita, K. Konishi, M. Matsubayashi, Visualization and measurement of gas-liquid metal two-phase flow with large density difference using thermal neutrons as microscopic probes, *Nucl. Inst. Methods Phys. Res. Sect. A: Accelerat. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.* 424 (1999) 229 – 234.
4. Y. Nishi, I. Kinoshita, S. Nishimura, Experimental study on the gas lift pump in lead-bismuth eutectic, *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, B Hen* 70 (2004) 715 – 722.
5. M. Saito, T. Sawada, Y. Teraoka, A. Netu, Dispersion characteristics of gas-liquid two-phase pools, in: *Proceedings of the 6th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-6)*, San Diego, USA, May 10–14, 1998.
6. Mosunova N. A. et al. Lead coolant modeling in system thermal-hydraulic code HY-DRA-IBRAE/LM and some validation results // *Nuclear Engineering and Design*. 2020. Т. 359. С. 110463.
7. Josh Rosettani, Wael Ahmeda, Philip Geddis, Lijun Wu, Bruce Clements Experimental and numerical investigation of gas-liquid metal two-phase flow pumping // *International Journal of Thermofluids* 10 (2021) 100092.
8. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. М.: Мир, 1972. – 436 с.
9. Saito, Y., Mishima, K., Tobita, Y., Suzuki, T., Matsubayashi, M., 2005. Measurements of liquid–metal two-phase flow by using neutron radiography and electrical conductivity probe. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 29, 323–330.
10. Усов, Э.В., Лобанов, П.Д., Кутлиметов, А.Э., Кудашов, И.Г., Чухно, В.И., Lezhnin, S.I., Pribaturin, N.A., Kashinsky, O.N., Svetonosov, A.I., Mosunova, N.A., 2018. Экспериментальное моделирование гидродинамики и теплообмена при пузырьковом и снарядном режимах течения газа в тяжелом жидком металле. *Теплоэнергетика* 65, 82–87.
11. Кашинский О.Н., Курдюмов А.С. Трение на стенке при движении газовых снарядов в кольцевом канале. *Теплофизика и аэромеханика*, 2021, № 2, с. 265–269.

© П. Д. Лобанов, А. И. Светоносков, Н. А. Прибатурин, 2025