

03

## О новом режиме пузырькового кипения в мезоструктурах микросфер (эффект прыгающих пузырей)

© А.С. Дмитриев<sup>1</sup>, П.Г. Макаров<sup>1</sup>, М.А. El Bouz<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет „МЭИ“, Москва, Россия

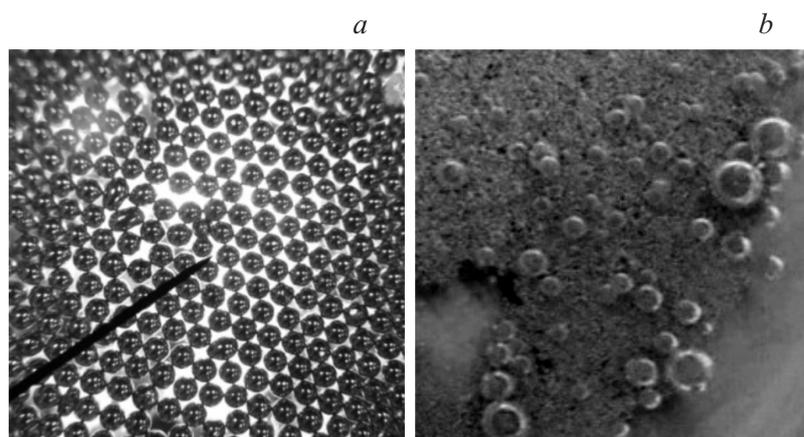
<sup>2</sup> Университет Мансура, Мансура, Египет

E-mail: asdmiriev@mail.ru

Поступило в Редакцию 3 октября 2014 г.

Исследован новый режим пузырькового кипения дистиллированной воды на подложке из мезоструктуры монодисперсных и/или полидисперсных микросфер различных материалов. Экспериментально обнаружено, что в отдельных режимах пузырькового кипения наблюдается возникновение режима „прыгающих пузырьков“ (jumping pool boiling), не достигающих поверхности недогретой жидкости. При этом пузырьки могут захватывать некоторое число микросфер и подниматься на некоторую высоту, но, не достигнув поверхности, опускаться вместе с микросферами на дно контейнера. В другом случае микросферы могут захватывать некоторое число пузырей, подниматься к поверхности зеркала испарения. А затем, не достигнув последней, опускаться на дно нагреваемого контейнера, в котором происходит пузырьковое кипение. Обнаружены также подрежимы такого механизма кипения для различных по плотности и размеру микросфер.

Поведение жидкости в режиме интенсивного теплообмена интересно как с научной, так и с прикладной точки зрения. Исследованные на сегодня процессы пузырькового кипения хорошо поняты для кипения на различных подложках (плоских, цилиндрических, гладких и шероховатых, с микроскопическими и наноразмерными неоднородностями, на гидрофильных и супергидрофобных подложках и т.д.) и для разных жидкостей [1–4]. Также хорошо изучены процессы кипения в пористой среде (как внутри пористой структуры, так и на ее поверхности). В последнем случае пористая среда выступает как пассивная, т.е. материал пористой среды всегда неподвижен относительно движущейся жидкости и пузырьков пара [5]. В данном исследовании впервые изучена активная среда, где в процессе кипения принимают участие три фазы —



**Рис. 1.** Микрофотографии микросфер, уложенных на дне чашки Петри: *a* — монослой монодисперсных микросфер (диаметр  $300\ \mu\text{m}$ ); *b* — изображение „прыгающих“ пузырей на мезоскопической поверхности в режиме пузырькового кипения.

жидкость, пар и твердые микросферы. Такая активная среда обнаруживает целый ряд особенностей даже в пузырьковом режиме кипения в свободном объеме недогретой жидкости. Более ранние исследования такой системы авторами не обнаружены.

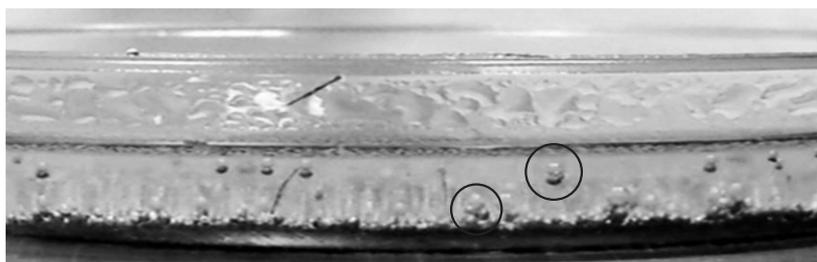
В качестве мезоскопической структуры применялся монослой микросфер диаметром  $150\text{--}300\ \mu\text{m}$  из металлов (или сплавов), изготовленных по технологии вынужденного капиллярного распада струй [6], которые находились на внутренней поверхности чашки Петри (рис. 1, показана также масштабная риска). Снизу чашки Петри находился электрический нагреватель с фиксированной и регулируемой температурой. В чашку наливалась дистиллированная вода, которая покрывала слой микросфер примерно высотой  $10\text{--}30$  их диаметров. Все эксперименты проводились в чашках Петри, изготовленных из стекла, диаметром  $93\ \text{mm}$ , толщина стенок  $3.5\ \text{mm}$ . Температура измерялась двумя способами: с помощью инфракрасного бесконтактного термометра и контактными термодарами (ТХК, ТХА). Для видеосъемки процессов применялись цифровой фотоаппарат и оптический микроскоп Motic.

Сначала внутрь чашки Петри помещались монодисперсные микросферы (например, сплава  $Pb95\% + Sb5\%$  или оксида алюминия). Затем наливалась дистиллированная вода. Чашка Петри ставилась на нагреватель, температура которого могла меняться в широких пределах. Поверхность жидкости была свободной и жидкость, следовательно, была недогретой и свободно испарялась в окружающее пространство. Хотя опыты проводились при различных температурах окружающей среды и ее влажности, это не влияло на основные результаты при изучении пузырькового кипения. При температуре от  $140\text{--}150^\circ\text{C}$  (жидкость недогрета и температура начала кипения выше, чем температура насыщения; кроме того, термическое сопротивление материала чашки Петри и микросфер приводило к перепаду температур между жидкостью и нагревателем около  $25^\circ\text{C}$ ) начиналось активное зарождение пузырей пара под микросферами. Следует особо подчеркнуть, что механизм роста пузырей отличался от классического [2], поскольку нагрев пара в пузыре происходил за счет не только теплоты от нагревателя, но и теплопереноса через боковые поверхности микросфер, что заметно изменяло скорость роста пузырей.

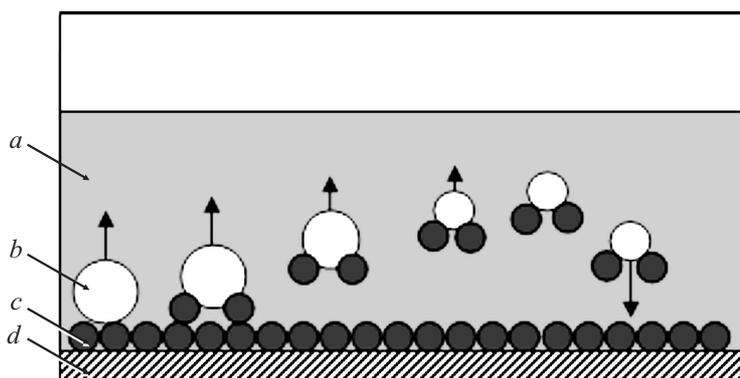
При достижении режима пузырькового кипения в недогретой жидкости наблюдалось несколько необычных режимов поведения пузырей, которые отрывались от мезоскопической поверхности микросфер. При этом опыты на сплаве  $Pb95\% + Sb5\%$  и на оксиде алюминия дали различные подрежимы кипения.

В первом режиме, когда микросферы представляли собой свинцовые монодисперсные гранулы, наблюдался эффект генерации пузырей, которые локально захватывали несколько микросфер и поднимались к поверхности жидкости. Однако, не дойдя до поверхности, они останавливались и начинали опускаться вниз до поверхности нагрева (на рис. 1 пузыри показаны сверху, а на рис. 2 — сбоку). Далее процесс повторялся периодически в избранных центрах кипения в течение длительного времени. Схема такого процесса (один цикл) представлена на рис. 3.

Во втором режиме кипения, когда микросферы представляли собой полидисперсные микрогранулы с разбросом более  $30\text{--}40\%$  от исходного диаметра (около  $200\ \mu\text{m}$ ) и были изготовлены из более легкого металла — алюминия, наблюдался совершенно иной процесс. В этом случае микросфера покрывалась несколькими пузырьками пара и также поднималась к поверхности, но, не дойдя до нее, опускалась и процесс



**Рис. 2.** Режим „прыгающих пузырей“ при пленочном кипении в недогретой жидкости в мезоструктуре микросфер.



**Рис. 3.** Схема движения пузырей в мезоструктуре микросфер в режиме пузырькового кипения (показан один цикл поднятия и опускания пузыря с микросферами): *a* — слой дистиллированной воды; *b* — „прыгающие пузыри“ с захваченными микросферами; *c* — слой микросфер; *d* — нагреватель.

„прыгающих“ пузырей с микросферами продолжался длительное время периодически.

Важно отметить, что как в первом, так и во втором случаях наблюдались устойчивые центры парообразования с захватом микросфер. Авторами разработаны модели описанных явлений и механизмы, которые основаны на специфическом механизме капиллярного и адгезионного взаимодействия пара с микросферами, а также учитывают неоднородность температуры пузырьков при всплытии в недогретой

жидкости. Основная идея состоит в том, что после генерации пузыря последний захватывает несколько микросфер, поскольку его граница имеет некомпенсированную энергию и поднимается вверх. При этом давление внутри пузыря и его температура соответствуют подъемной силе архимедова типа. Однако, когда пузырь с микросферами поднимается вверх в слой недогретой жидкости, давление в нем и его объем уменьшаются и подъемной силы не хватает, чтобы поднимать пузырь с микросферами. В некоторой точке вес микросфер точно компенсируется подъемной силой и пузырь начинает опускаться, при этом когезионная энергия на поверхности пузыря не позволяет микросферам от него оторваться. Наконец, достигнув дна, система пузырь + микросферы разрушается и процесс повторяется снова. Подробные термогидродинамические модели указанных процессов будут представлены авторами отдельно.

Следует сказать, что в описанных эффектах, по существу, наблюдается своеобразная бифуркация в режимах кипения — ответвление на „пузырьковой“ части кривой кипения нового режима теплообмена, который имеет либо более высокую теплоотдачу, либо более низкую, чем при кипении в чистой жидкости. В литературе нам не удалось найти аналогов описанного нами явления [1,2]. Процессу теплообмена в режиме кипения с „прыгающими“ пузырьками будет посвящено отдельное исследование. Как было показано в [7], применение пористых сред, состоящих из одинаковых слоев материала, является эффективным методом пассивного повышения коэффициента теплопередачи при испарении/кипении и критического теплового потока.

Таким образом, обнаружен новый режим пузырькового кипения в присутствии мезоскопической среды (микросфер), представляющий собой особый тип кипения, в котором активно участвует динамическая твердая фаза. Эксперименты показали, что кипение жидкости с засыпкой (монодисперсными микросферами) начинается быстрее, чем без нее. Кроме того, скорость зависит от размера и свойств металлических микросфер. Проведены модельные расчеты, частично подтверждающие данные выводы. Наблюдаемый эффект может стать новым способом интенсификации тепло- и массообмена в различных устройствах.

Авторы благодарят за полезные обсуждения Е.В. Аметистова, Ю.А. Зейгарника, В.В. Клименко, С.А. Ковалева, А.П. Крюкова и В.В. Ягова.

## Список литературы

- [1] *Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.* Теплоперенос. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
- [2] *Лабунцов Д.А., Ягов В.В.* Механика двухфазных систем. М.: МЭИ, 2000. 373 с.
- [3] *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
- [4] *Аметистов Е.В., Клименко В.В., Павлов Ю.М.* Кипение криогенных жидкостей. М.: Энергоатомиздат, 1995. 400 с.
- [5] *Ковалев С.А., Соловьев С.Л.* Испарение и кипение в тепловых трубах. М.: Наука, 1989. 111 с.
- [6] *Аметистов Е.В., Дмитриев А.С.* Монодисперсные системы и технологии. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 536 с.
- [7] *Chen Li, Peterson G., Wang Y.* // ASME Summer Heat Transfer Conference. San Francisco, CA. July 17–22 2005. P. 767–772.