

03

## **Видеосъемка вскипания перегретой жидкости на границе ее достижимого перегрева**

© Г.В. Ермаков, А.Л. Гурашкин, Е.В. Липнягов, С.А. Перминов

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург

E-mail: ermakov-german@mail.ru

Поступило в Редакцию 30 июня 2009 г.

С помощью видеосъемки впервые установлен факт гетерогенного вскипания перегретой жидкости на границе достижимого перегрева, где вскипание жидкости традиционно считается гомогенным. Таким образом, близость теоретической температуры перегрева к результатам измерений еще не является доказательством правильности теории, поскольку в опыте не выполняется одно из ее основополагающих положений — гомогенность вскипания перегретой жидкости.

PACS: 47.55.D, 64.70.fh

Перегретая жидкость — жидкость, находящаяся при температуре выше температуры кипения при заданном давлении, — встречается во многих практически важных технологиях. К числу подобных технологий относятся, например, ракетная техника и энергетика, в том числе и атомная, химические и другие технологии, связанные с быстрым нагревом жидкостей. Как правило, перегрев жидкостей играет в технике отрицательную роль. Резкое, взрывообразное, вскипание перегретой жидкости нарушает штатное течение процессов, может приводить к гидравлическим ударам в системе и даже к ее разрушению. В связи с этим необходимо ясно представлять причины перегрева, а также механизм вскипания перегретой жидкости.

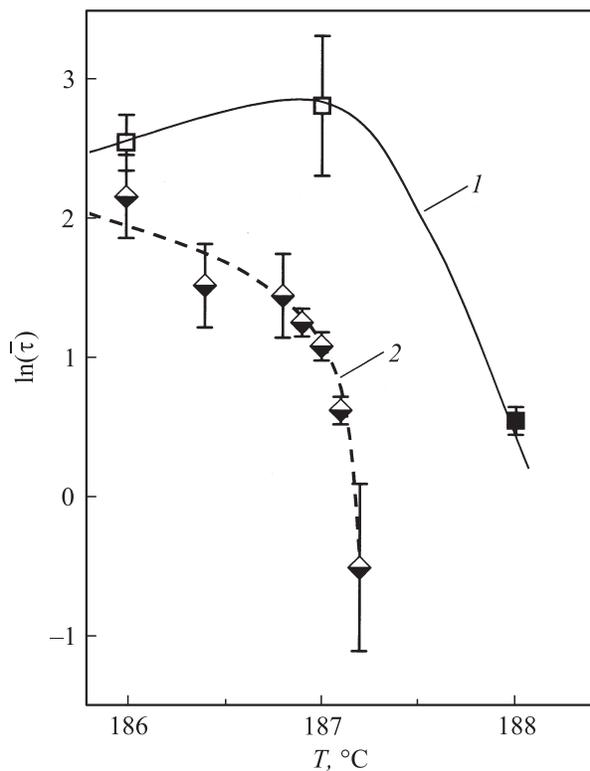
Состояния перегрева жидкостей являются метастабильными, т.е. имеющими ограниченное время существования. Их возникновение связано с существованием энергетического барьера, который равен работе образования микроскопического неустойчиво равновесного пузырька, появляющегося в системе благодаря флуктуациям. Классическая теория вскипания перегретых жидкостей [1–4], основанная на этой идее,

создана в 20–40 гг. прошлого столетия. Она предполагает единственный механизм изменения размера парового зародыша, который состоит в случайном присоединении или отдаче им отдельной молекулы. Никакие другие факторы, влияющие на эволюцию зародышей, например твердая стенка, ионизирующее излучение, случайные ультразвуковые импульсы и тому подобное, в этой теории не учитываются. Таким образом, в классической теории рассматривается исключительно гомогенное (объемное) флуктуационное зародышеобразование.

Экспериментальные результаты [5–10] по температуре достижимого перегрева очень хорошо согласуются с результатами расчетов по классической теории. Расхождения составляют обычно доли градуса и лишь в редких случаях достигают 1–3°C. Эти экспериментальные результаты дают авторам основание предполагать, что на границе достижимого перегрева имеет место гомогенное зародышеобразование, и считать, что классическая теория весьма хорошо работает.

Однако это утверждение, основанное на анализе только одного параметра, не может считаться достаточно надежным, тем более что по ряду других величин хорошее согласие теории и экспериментальных данных отсутствует. Это относится, прежде всего, к среднему времени жизни перегретой жидкости. Отношение его теоретического значения к экспериментальному составляет более порядка. Опыт не подтверждает также выполнимость известного условия гомогенности вскипания, выражающегося в обратной пропорциональности среднего времени жизни перегретой жидкости ее объему при постоянстве температуры и давления [11]. Отметим еще, что оценка работы образования критического зародыша по наклону экспериментальной границы достижимого перегрева дает значения существенно более низкие, чем значения, полученные по классической термодинамической формуле [12]. В сложившейся ситуации целесообразна постановка новых опытов, которые внесли бы ясность в вопрос о качестве экспериментальной проверки классической теории зародышеобразования, как отмечал автор одной из первых и известных монографий [5], посвященных этой теме.

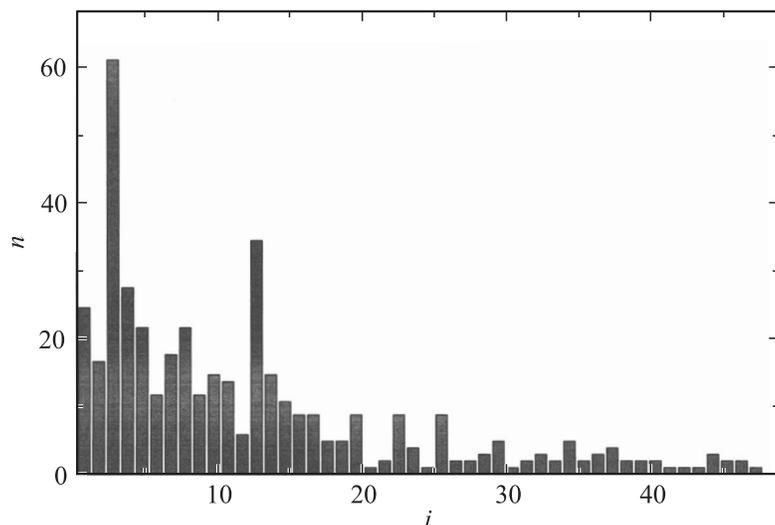
Решающим экспериментом для рассматриваемой проблемы являются визуальные наблюдения вскипания перегретой жидкости на границе достижимого перегрева с помощью скоростной видеокамеры. Мы проделали такие наблюдения. При этом в методику измерений были внесены изменения, состоящие в том, что отсчет времени начинался после установления в системе равновесия по давлению и температуре [11].



**Рис. 1.** Граница достижимого перегрева системы н-гексан–40 mass.% изомеров н-гептана при атмосферном давлении: 1 — объем ячейки  $V = 0.06 \text{ cm}^3$ , 2 —  $V = 0.03 \text{ cm}^3$ .

Наблюдения вскипания проводили с помощью скоростной видеокамеры FastVideo-250.

Опыты проведены при атмосферном давлении со смесью н-гексана и 40 mass.% изомеров н-гептана в стеклянных капиллярах, предварительно подвергнутых операции силилирования, т.е. химическим путем покрытых триалкилхлорсиланом, увеличивающим сродство поверхности к углеводородам. Эта операция приближала взаимодействие молекул изучаемой смеси с поверхностью капилляра к межмолекулярному



**Рис. 2.** Число вскипаний на флуктуационном центре ( $n$ ) в зависимости от номера центра ( $i$ ),  $T = 188.0^\circ\text{C}$ ,  $V = 0.03 \text{ cm}^3$ .

взаимодействию и частично сглаживала дефекты поверхности, которые могли бы служить центрами зарождения паровой фазы.

Исследования проводились с помощью пузырьковой камеры, подробно описанной в [5,6]. Изучаемой жидкостью, предварительно дегазированной по методике [11], заполняли стеклянный капилляр диаметром около 1 mm, соединенный через разделительный сильфон с системой давления, работа которой управлялась по специальной программе компьютером. Часть капилляра находилась в термостате, который имел окна для освещения и съемки процессов, происходящих в капилляре, мешалку для перемешивания теплоносителя, термопары для регулирования и измерения температуры ( $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ). Необходимое метастабильное состояние исследуемой жидкости достигалось понижением давления на жидкость при заданной температуре. Отсчет времени жизни перегретой жидкости начинался после установления заданной температуры и атмосферного давления. В этот же момент времени начинали видеосъемку. Частота съемки составляла около 5000 кадров в



**Рис. 3.** Видеокадры (первые 4 кадра) появления и развития пузырька на стенке капилляра из разных видеофильмов, для разных флуктуационных центров при  $T = 188.0^\circ\text{C}$ .

секунду. Перед видеосъемкой при атмосферном давлении измеряли границу достижимого перегрева исследуемой жидкости — крутой участок зависимости логарифма среднего времени ожидания вскипания исследуемой жидкости от температуры, который близок к теоретической кривой и на котором вскипание считается гомогенным. После этого

Характеристики наиболее активных флуктуационных поверхностных центров вскипания

Номер центра	1	3	4	5	7	8	13	Для 7 центров	Для 48 центров
$\bar{\tau}, s$	1.6	2.2	2.4	1.6	1.6	2.0	1.8	2.0	1.7
$n$ , число вскипаний	25	62	28	22	18	22	35	212	300
$n/N$	0.083	0.206	0.093	0.073	0.060	0.073	0.117	0.707	1.0

измерения времени жизни жидкости в состоянии перегрева повторили при температурах 146.0 и 147.0°C без видеосъемки и с видеосъемкой при температуре 188.0°C и атмосферном давлении. Было снято 300 видеофильмов. Результаты описанных измерений показаны на рис. 1. Вскипание перегретой жидкости является обычно результатом роста одного пузырька, который возникает на стенке капилляра. В редких случаях вскипание бывает связано с ростом от двух до пяти пузырьков, которые возникают также на стенке капилляра последовательно и, возможно, инициируются первым. Места возникновения пузырьков, содержащие флуктуационные центры вскипания, воспроизводятся от двух раз и более с погрешностью по высоте около 0.5 mm. Этот факт является важным свидетельством гетерогенности вскипания перегретой жидкости. Повторяемость результатов показана на рис. 2 в виде зависимости числа возникновений пузырька на данном центре от его номера, а соответствующие видеокадры представлены на рис. 3. Всего в анализируемой точке зафиксировано 48 флуктуационных центров вскипания. Однако, как видно из рис. 2, они вовсе не равноценны для процесса вскипания. Среди них можно выделить 7 центров, которые и определяют границу достижимого перегрева. Именно на них происходит подавляющее большинство вскипаний перегретой жидкости. Это хорошо видно из таблицы.

Таким образом, граница достижимого перегрева жидкости в стеклянном капилляре определяется небольшим количеством отдельных поверхностных флуктуационных центров зародышеобразования, а вовсе не объемным флуктуационным вскипанием жидкости. Близость теоретической температуры перегрева к результатам измерений еще

не является доказательством правильности теории, поскольку в опыте не выполняется одно из основополагающих положений теории — гомогенность вскипания перегретой жидкости.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 07-08-00575 и гранта президента РФ „Ведущие научные школы“ № НШ-4429.2006.8.

## Список литературы

- [1] *Фольмер М.* Кинетика образования новой фазы. М.: Наука, 1986. (*Volmer M.* Kinetic der Phasenbildung. Dresden, Leipzig, 1939).
- [2] *Döring W.* // *Z. Phys. Chem.* 1937. В. V. 36. P. 371386.
- [3] *Зельдович Я.Б.* // *ЖЭТФ.* 1942. Т. 12. С. 525–538.
- [4] *Каган Ю.М.* // *ЖФХ.* 1960. Т. 34. С. 92101.
- [5] *Скрипов В.П.* Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972. (*Skripov V.P.* Metastable Liquids. New York: Halsted Press, 1974).
- [6] *Скрипов В.П., Синицын Е.Н., Павлов П.А., Ермаков Г.В.* и др. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии. М.: Атомиздат, 1980. (*Skripov V.P., Sinitsyn E.N., Pavlov P.A., Ermakov G.V.* et al. Thermophysical Properties of Liquids in the Metastable (Superheated) State. Gordon and Breach Science Publishers, New York, London, Paris, Montreux, Tokyo, Melbourne, 1988).
- [7] *Павлов П.А.* Динамика вскипания сильно перегретых жидкостей. Свердловск: УрО АН СССР, 1988.
- [8] *Байдаков В.Г.* Перегрев криогенных жидкостей. Екатеринбург: УрО РАН, 1995.
- [9] *Debenedetti P.G.* Metastable Liquids: Concepts and Principles. Princeton University Press: Princeton, New Jersey, 1996.
- [10] *Ермаков Г.В.* Термодинамические свойства и кинетика вскипания перегретых жидкостей. Екатеринбург: УрО РАН, 2003.
- [11] *Ермаков Г.В., Липнягов Е.В., Перминов С.А.* // *ТВТ.* 2001. Т. 39. С. 889.
- [12] *Ермаков Г.В., Липнягов Е.В.* // *Теплофизика и аэромеханика.* 2008. Т. 15. С. 667.