

И. А. Козулин, В. В. Кузнецов, Г. В. Барткус

*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия*

*Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

germanbartkus@gmail.com, vladkuz@itp.nsc.ru, igornt@yandex.ru

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ
ВЗРЫВНОГО ВСКИПАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ
МЕТОДОМ ИЗМЕНЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ РАССЕЯНИИ НА МИКРОПУЗЫРЬКАХ ***

Проведено экспериментальное изучение закономерностей взрывного кипения органических жидкостей при импульсном нагреве. С помощью оптического метода регистрации интенсивности отраженного луча от поверхности микронагревателя экспериментально получены закономерности взрывного кипения этиленгликоля и октана. В качестве микронагревателя использован многослойный тонкопленочный резистор с размером 100×110 мкм. Данные по динамике вскипания показали, что высокие плотности теплового потока обеспечивают условия для начала фазового взрыва и образования сплошной пленки пара на поверхности нагревателя. Получены экспериментальные данные по динамике заполнения поверхности нагревателя паровыми пузырями, определено время кипения и время жизни основного пузыря.

Ключевые слова: МЭМС технологии, взрывное кипение жидкости, микронагреватель.

Введение

Взрывное кипение жидкости – это физический процесс, при котором паровая фаза образуется с максимальной скоростью. Взрывное кипение в микромасштабе генерируется путем быстрого нагрева жидкости на микронагревателе до температуры, близкой к границе термодинамической устойчивости жидкости. Данный вид взрывного кипения достаточно легко управляем и может использоваться в качестве локализованного источника энергии в развивающихся технологиях, связанных с микромеханическими электронными системами (МЭМС техноло-

гии). Хорошим примером успеха МЭМС технологий является струйная печать [1]. Взрывное кипение жидкости может применяться и в других приложениях, например, в лазерной хирургии, микрозатворах и выключателях, микронасосах.

Ранее были получены экспериментальные данные по взрывному кипению на тонких проволочках в режиме импульсного разогрева [2], исследованию взрывного кипения на плоских микронагревателях посвящены работы [3; 4]. Хотя эти исследования были направлены на различные аспекты взрывного кипения, начальная стадия фазового перехода жидкость-пар и характери-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 15-08-06870а) и Интеграционного проекта СО РАН № 74.

стики пузырькового распада слоев жидкости при высоких скоростях наброса тепловой мощности остаются слабоизученными.

В данной работе экспериментально исследовано взрывное кипение органических жидкостей этиленгликоля и октана при импульсном нагреве в неоднородном поле температур на поверхности плоского микронагревателя, покрытого субмикронным карбидокремниевым слоем. С использованием оптического метода исследована начальная стадия фазового перехода жидкость-пар и получены характеристики пузырькового распада жидкости при высоких скоростях наброса тепловой мощности.

Схема экспериментальной установки

Для исследования динамики взрывного кипения в микромасштабе была использована экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 1.

В опытах в качестве микронагревателя использовался многослойный тонкопленочный нагреватель-резистор [5] с размером 100×110 мкм. Микронагреватель представляет собой четырехслойную пленку, последовательно напыленную методом PECVD на плоской подложке из стекла. Первый слой толщиной 1,1 мкм выполнен из окиси кремния, затем расположен тепловыделяющий слой сплава TaAl, который имеет слабую зависимость электрической проводимости от температуры, слой N_3O_4 толщиной 0,5 мкм и слой SiC толщиной 0,25 мкм. Сэндвичевая структура нагревателя обеспечивает высокие скорости роста температуры слоя жидкости при импульсном нагреве. Опыты проводились при атмосферном давлении. Начальная температура жидкости равна 20 °C.

В экспериментах микрочип с нагревателем (1) погружался в кювету с рабочей жидкостью (2) на глубину до 2 мм, находящуюся при атмосферном давлении (см. рис. 1, а). Одиночные прямоугольные импульсы тока подавались на микронагреватель для его нагрева. Каждый импульс имел длительность, достаточную для обеспечения взрывного вскипания на поверхности нагревателя. Для изучения фазового взрыва была использована оптическая методика регистрации зародышеобразования, основанная на измерении интенсивности лазерного пучка (3), зеркально отраженного от поверхности на-

гревателя. После отражения от нагревателя лазерный луч попадал в микроскоп (4). С помощью диафрагмы (5) вырезалась только область исследуемого микронагревателя. Далее интенсивность лазерного излучения с микронагревателя регистрировалась фотодиодом (6), сигнал с которого обрабатывался на компьютере (7). При возникновении микропузырьков интегральный коэффициент зеркального отражения начинает падать, и сигнал с фотоприемника дает динамику заполнения поверхности нагревателя паровыми пузырьками. На рис. 1, б приведен принцип оптического метода регистрации взрывного вскипания жидкости, основанный на том, что при возникновении микропузырьков на поверхности микронагревателя интегральный коэффициент зеркального отражения начинает падать.

Данная методика позволяет проследить динамику заполнения паром поверхности микронагревателя в зависимости от эффективного теплового потока q_{eff} на микронагревателе. Эффективный тепловой поток q_{eff} определяется как полное количество тепла, выделяемого в единицу времени на нагревателе, деленное на его площадь.

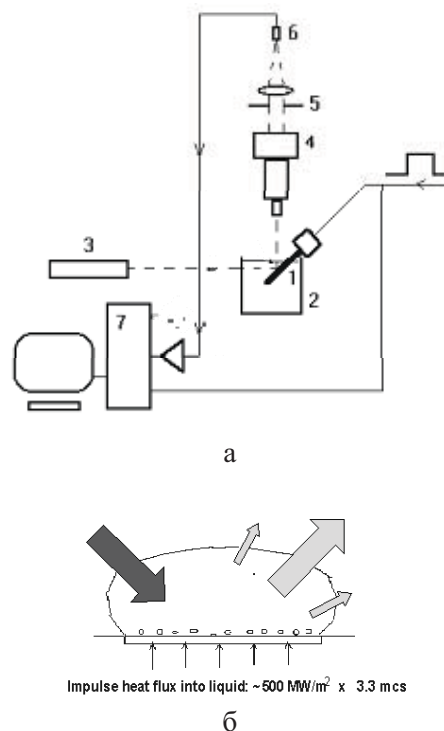


Рис. 1. Схема экспериментального стенда (а) и принцип изучения взрывного кипения жидкости (б)

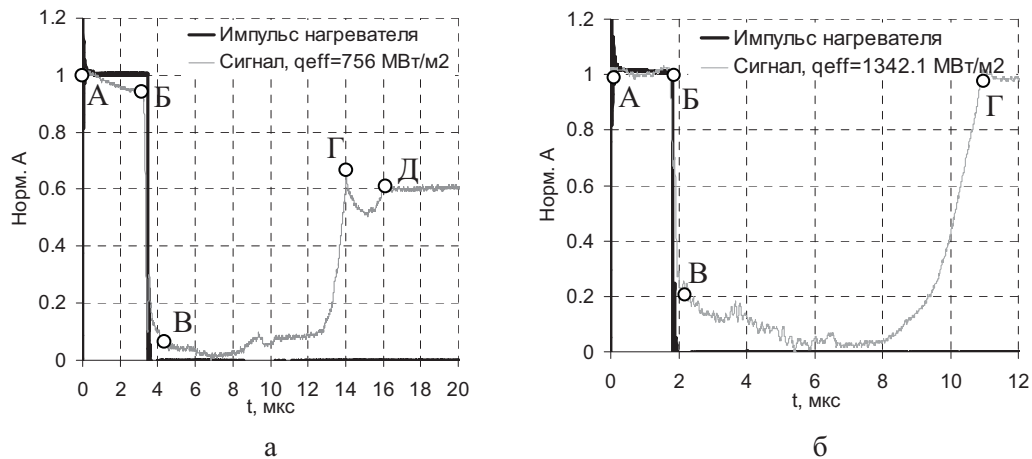


Рис. 2. Зависимость интенсивности света лазерного излучения от времени для этиленгликоля при приведенной плотности тепловыделения q_{eff} и длительности нагревающего импульса с генератора $t_{\text{имп}}$: а – $q_{\text{eff}} = 756 \text{ MBt/m}^2$, $t_{\text{имп}} = 3,472 \text{ мкс}$; б – $q_{\text{eff}} = 1342,1 \text{ MBt/m}^2$, $t_{\text{имп}} = 1,92 \text{ мкс}$

Динамика взрывного кипения этиленгликоля и октана

На рис. 2 (серая линия) представлена зависимость интенсивности отраженного света от микронагревателя в зависимости от времени для этиленгликоля при эффективной плотности теплового потока $q_{\text{eff}} = 756 \text{ MBt/m}^2$ (рис. 2, а) и при плотности теплового потока $q_{\text{eff}} = 1342,1 \text{ MBt/m}^2$ (рис. 2, б). Темной линией на рис. 2 представлен импульс с генератора, нагревающий микронагреватель. Сигналы с фотодиода и генератора нормированы на единицу. Можно выделить четыре основных стадии взрывного кипения жидкости на микронагревателе.

Первая стадия – от точки А до точки Б – соответствует нагреву жидкости при подаче нагревающего импульса с генератора на микронагреватель.

Вторая стадия начинается от точки Б, которая соответствует первому появлению пузырьков на поверхности микронагревателя, и продолжается до точки В. Она соответствует взрывному росту числа пузырьков на нагревателе. В точке В наблюдается резкое уменьшение интенсивности сигнала с фотодиода, вызванное рассеянием лазерного излучения на первых пузырьках. С этой точки сигнал с фотодиода экспоненциально падает. Экспоненциальный рост количества пузырьков на поверхности микронагревателя определяется частотой гомогенного зародышеобразования [6], которая определяется соотношением

$$J = N \cdot B \cdot \exp(-G). \quad (1)$$

Здесь число Гиббса $G = \Psi W_* / kT$; N – число молекул жидкости в единице объема; множитель B характеризует скорость перехода зародыша через критический размер; Ψ – степень воздействия поверхности; T – абсолютная температура; k – постоянная Больцмана. Работа образования критического зародыша W_* , определенная в классической гомогенной модели зародышеобразования на тепловых флуктуациях [7],

$$W_* = 16\pi\sigma^3 / 3(P_s - P_{\text{liq}})^2(1 - \rho_v / \rho_{\text{liq}}),$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения; P_{liq} – давление жидкости; P_s , ρ_{liq} и ρ_v – давление насыщения, плотности жидкости и пара соответственно. Из выражения (1) видно, что рост числа пузырьков происходит экспоненциально.

Следующая стадия от точки В до точки Г характеризует область объединения микропузырьков и образование основного пузыря и продолжается до момента схлопывания основного пузыря (точка Г). После схлопывания пузыря наблюдается дальнейшее изменение интенсивности сигнала на оптическом датчике, связанное с тем, что энергии нагрева достаточно, чтобы появился еще один пузырь-сателлит (точка Д).

Время между точкой начала взрывного вскипания (точка Б) и моментом схлопывания первого газового пузыря (точка Г) определено как время кипения $t_{\text{кип}}$. Время от на-

чала импульса с генератора (точка А) до момента появления первых пузырьков на микронагревателе (точка Б) определено как время начало вскипания жидкости $t_{\text{ини}}$. Необходимо отметить, что основная погрешность метода заключается в определении момента начала кипения или момента резкого изменения интенсивности сигнала с фотодиода (точка Б). В большинстве случаев это довольно сложная задача, так как сигнал должен быть «чистым», с минимальным уровнем шумов. При оцифровке сигналов в экспериментах использовалась плата АЦП ЛА-n4USB, в которой используется 2 канала с максимальной частотой дискретизации 250 МГц, что позволяет измерять время с точностью до 4 нс. Общая погрешность измерения начала кипения не превышала 5 %.

В экспериментах по изучению взрывного вскипания этиленгликоля время импульса с генератора варьировалось от 4 до 0,6 мкс, при этом приведенная плотность тепловыделения менялась от $q_{\text{eff}} = 250 \text{ МВт/м}^2$ до $q_{\text{eff}} = 3\,500 \text{ МВт/м}^2$. Длительность и мощность импульса генератора определялась таким образом, чтобы время от момента подачи импульса до момента вскипания было больше или равно длительности импульса с генератора, в противном случае вложенной энергии на микронагревателе было недостаточно, чтобы микронагреватель сгорел.

В экспериментах было отмечено, что при длительности нагревающего импульса от 2 до 4 мкс от момента подачи напряжения (точка А) до момента вскипания (точка Б) наблюдается уменьшение интенсивности отраженного света, вызванного изменением оптических свойств микронагревателя при нагреве (см. рис. 2, а). Данный эффект уменьшался с уменьшением длительности нагревающего импульса и при $t_{\text{имп}} < 2 \text{ мкс}$ не наблюдался (см. рис. 2, б).

При плотностях тепловыделения q_{eff} более $2\,000 \text{ МВт/м}^2$ режим вскипания этиленгликоля на микронагревателе менялся (рис. 3). Новый режим вскипания характеризовался тем, что в момент появления первых пузырьков (точка Б) сигнал с фотодиода не уменьшался, а увеличивался. Кроме того, с развитием кипения на микронагревателе наблюдалась интерференционная картина, амплитуда колебаний которой увеличивалась с ростом приведенной плотности тепловыделения q_{eff} на нагревателе.

Смена режима вскипания связана, скорее всего, со сменой механизма взрывного кипения жидкости. При эффективной плотности тепловыделения q_{eff} менее 2 ГВт/м^2 на микронагревателе реализуется процесс вскипания, который начинается с появления пузырьков, рост которых экспоненциально растет, тогда как при плотности тепловыделения q_{eff} более 2 ГВт/м^2 на микронагревателе реализуется пленочный режим кипения, и в начальный момент времени на микронагревателе образуется паровая пленка, которая вызывает интерференционную картину.

На рис. 4 представлено изменение интерференционной картины, наблюдаемой на микронагревателе в зависимости от эффективной плотности тепловыделения q_{eff} . Темной сплошной линией здесь представлена картина интерференции для плотности тепловыделения $q_{\text{eff}} = 3552,2 \text{ МВт/м}^2$, темной пунктирной линией представлены данные с фотодиода для плотности тепловыделения $q_{\text{eff}} = 2698,6 \text{ МВт/м}^2$ и светлой тонкой линией данные для плотности тепловыделения $q_{\text{eff}} = 1983,6 \text{ МВт/м}^2$.

В целях получения закономерности взрывного вскипания для различных органических жидкостей в работе проведены эксперименты с октаном. На рис. 5 для октана тонкой линией представлена зависимость интенсивности отраженного света от микронагревателя в зависимости от времени. Динамика кипения получена с использованием оптического метода регистрации при плотности теплового потока $q_{\text{eff}} = 810,5 \text{ МВт/м}^2$.

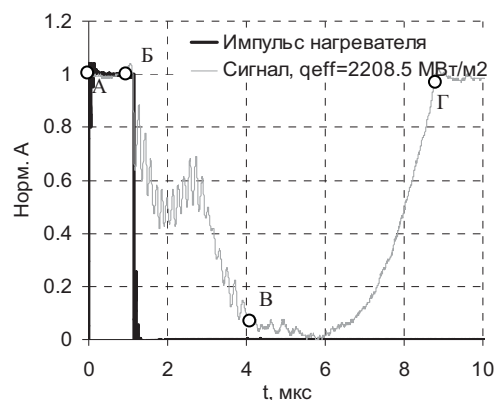


Рис. 3. Зависимость интенсивности света лазерного излучения от времени для этиленгликоля при приведенной плотности тепловыделения q_{eff} и длительности нагревающего импульса с генератора $t_{\text{имп}}$: $q_{\text{eff}} = 2208,5 \text{ МВт/м}^2$, $t_{\text{имп}} = 1,148 \text{ мкс}$

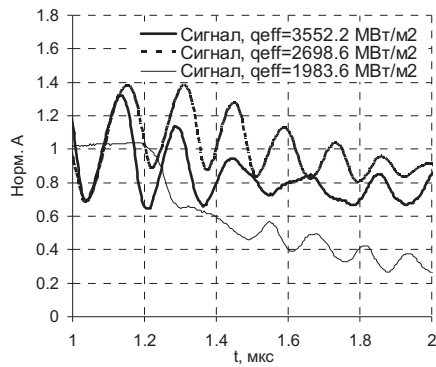


Рис. 4. Изменение интерференционной картины в зависимости от приложенной мощности к микронагревателю

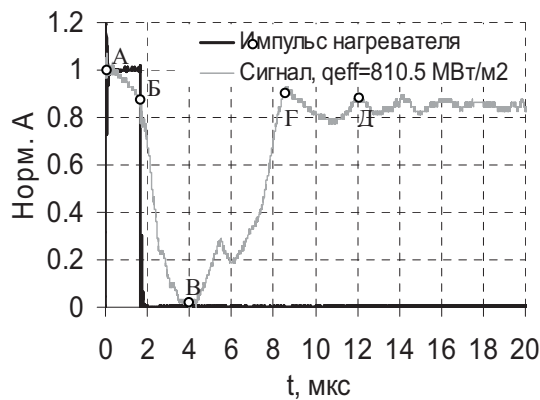
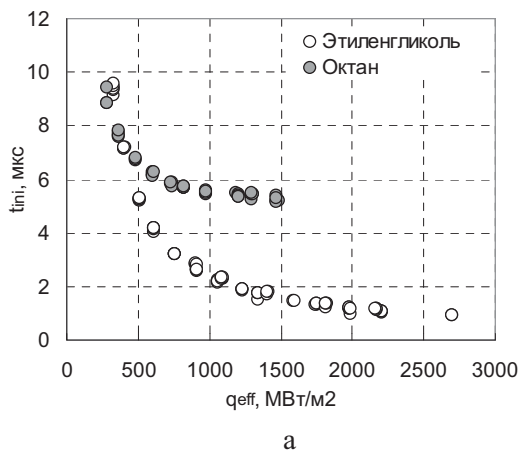


Рис. 5. Зависимость интенсивности света лазерного излучения от времени для октана при приведенной плотности тепловыделения q_{eff} и длительности нагревающего импульса с генератора $t_{\text{имп}}$: $q_{\text{eff}} = 810,5 \text{ МВт/м}^2$, $t_{\text{имп}} = 1,676 \text{ мкс}$



Из рис. 5 видно, что процесс кипения включает в себя все основные этапы кипения, отмеченные для этиленгликоля. Этап подачи импульса на микронагреватель (точка А), момент зарождения первых пузырьков (точка Б), этап максимально развитой кипящей поверхности (точка В), который продолжается до момента схлопывания пузыря (точка Г) и этап схлопывания пузыря сателлита (точка Д).

Длительность взрывного кипения

В экспериментах определено время инициации взрывного кипения для этиленгликоля и октана. Время инициализации кипения $t_{\text{ини}}$ определено как отрезок времени между началом нагревающего импульса на микронагреватель (точка А) до момента вскипания жидкости (точка Б). На рис. 6, а представлена зависимость времени инициализации кипения от теплового потока на микронагревателе, на рис. 6, б – время кипения жидкостей (разница между этапами кипения Г и Б) в зависимости от теплового потока.

Свойства этиленгликоля при 20°C приведены в таблице (см. ниже), где $k_{\text{лиq}}$ – коэффициент теплопроводности, $\rho_{\text{лиq}}$ – плотность жидкости, C_p – удельная теплоемкость. Коэффициент температуропроводности определялся как $D_{\text{лиq}} = k_{\text{лиq}} / \rho_{\text{лиq}} C_p$.

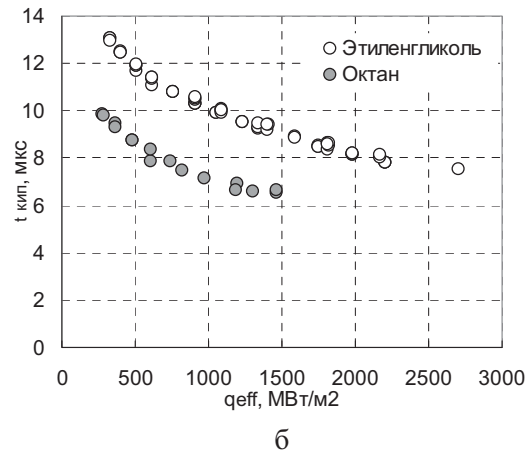
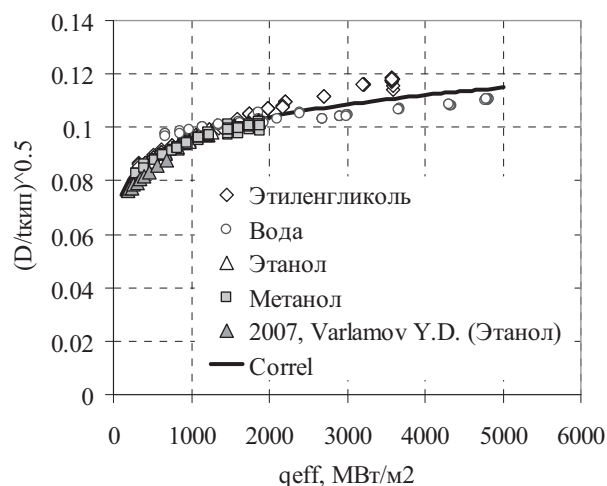


Рис. 6. Временя инициализации кипения для этиленгликоля и октана в зависимости от теплового потока (а). Зависимость времени кипения от теплового потока для этиленгликоля и октана (б)

Исследуемая жидкость	k_{liq} , Вт/м·К	ρ_{liq} , кг/м ³	C_p , Дж/кг·К	D_{liq} , м ² /с
Этиленгликоль	0,249	1116,1	2 382	$9,37 \cdot 10^{-8}$
Вода	0,602	998,3	4 182	$1,44 \cdot 10^{-7}$
Этанол	0,168	807,6	2 400	$8,67 \cdot 10^{-8}$
Метанол	0,2	791,5	2 460	$1,03 \cdot 10^{-7}$

Рис. 7. Время взрывного кипения жидкостей в зависимости от эффективной плотности теплового потока



Было выявлено, что величина $\sqrt{D_{\text{liq}} / t_{\text{кип}}}$ при изменении эффективной плотности теплового потока имеет общую зависимость для этиленгликоля и жидкостей, которые были получены в работе [8] (вода, этанол и метанол). Свойства жидкостей при 20 °С приведены в таблице.

На рис. 7 представлена зависимость параметра $\sqrt{D_{\text{liq}} / t_{\text{кип}}}$ от эффективной плотности теплового потока, в том числе темными треугольниками нанесены экспериментальные данные из работы [9]. Величина $\sqrt{D_{\text{liq}} / t_{\text{кип}}}$ имеет размерность скорости и может характеризовать скорость развития взрывного кипения на микронагревателе. Темной сплошной линией приведена зависимость $\sqrt{D_{\text{liq}} / t_{\text{кип}}} = 0,045 \cdot q_{\text{eff}}^{0,11}$, которая достаточно хорошо обобщает экспериментальные данные для этиленгликоля, воды, этанола и метанола при плотности теплового потока менее 2 ГВт/м² и может служить для оценки времени кипения на микронагревателе для этих жидкостей.

Заключение

В работе представлен детальный анализ динамики взрывного кипения органических

жидкостей этиленгликоля и октана на микронагревателе с размерами 100 × 110 мкм. Применение оптического метода, основанного на изменении интенсивности лазерного пучка, зеркально отраженного от поверхности микронагревателя, позволило изучить динамику начальной стадии взрывного кипения жидкости. С помощью этого метода определены данные по динамике заполнения поверхности нагревателя пузырьками пара, зависимость времени кипения и времени жизни основного пузыря от эффективной плотности теплового потока. Установлено, что для этиленгликоля при плотности теплового потока q_{eff} больше 1,4 ГВт/м² наблюдается смена режима генерации паровой фазы, что приводит к возникновению сплошной паровой пленки на стадии вскипания. Предложено уравнение для зависимости времени кипения от эффективной плотности теплового потока, которое может быть использовано для оценки времени взрывного кипения жидкости на микронагревателе.

Принятые обозначения

q – плотность теплового потока, МВт/м²
 t – время, с
 J – частота гомогенного зародышеобразования, м⁻³с⁻¹

N – число молекул в единице объема, м^{-3}
 B – кинетический коэффициент, м/с
 W_* – работа образования критического зародыша, Дж
 k – постоянная Больцмана, Дж/К
 P – давление жидкости, Па
 k – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К
 C_p – удельная теплоемкость, Дж/кг·К
 D – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$
Безразмерные постоянные
 G – число Гиббса
 Ψ – степенью воздействия поверхности
Греческие символы
 ρ – плотность жидкости, кг/м^3
 σ – поверхностное натяжение, Н/м
 μ – динамическая вязкость, $\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м})$
Индексы
 eff – эффективная величина, нормированная на площадь
 имп – импульс
 кип – кипение
 ini – начало процесса
 liq – жидкость
 v – пар

Список литературы

1. Allen R. R., Meyer J. D., Knight W. R. Thermodynamics and Hydrodynamics of Thermal Ink Jets // Hewlett-Packard J. 1985. Vol. 36. P. 21–27.
2. Павлов П. А., Никитин Е. Д. Кинетика зародышеобразования в перегретой воде //

Теплофизика высоких температур. 1980. Т. 18, № 2. С. 354–358.

3. Zhao Z., Glod S., Poulikakos D. Pressure and Power Generation during Explosive Vaporization on a Thin-Film Microheater // Int. J. Heat Mass Transfer. 2000. Vol. 43. P. 281–296.

4. Kuznetsov V. V., Vasserman E. S. Explosive vaporization dynamics on a flat microheater // Proc. 3rd International Symposium on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation. Pisa, 2004. Paper ven 04.

5. Bhaskar E. V., Aden J. S. Development of the thin-film structure for the ThinkJet printhead // Hewlett-Packard Journal. 1985. Vol. 36. No. 5. P. 27–33.

6. Kuznetsov V. V., Kozulin I. A. Explosive vaporization of a water layer on a flat microheater // Journal of Engineering Thermophysics. 2010. Vol. 19 (2). P. 102–109.

7. Скрипов В. П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972. 312 с.

8. Кузнецов В. В., Козулин И. А., Витовский О. В. Метастабильные состояния и их распад при высокой внешней и запасенной плотности энергии // Тр. XIV Минского международного форума по теплообмену. Минск, 2012. Доклад 7–16. 8 с.

9. Varlamov Y. D., Meshcheryakov Y. P. et al. Evolution of a vapor cavity during explosive boiling on a film microheater: experiment and numerical simulation // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2007. Vol. 48. No. 4. P. 534–541.

Материал поступил в редколлегию 16.11.2015

I. A. Kozulin, V. V. Kuznetsov, G. V. Bartkus

*Institute of Thermal Physics of SB RAS
1 Acad. Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

*Novosibirsk State University
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

germanbartkus@gmail.com, vladkuz@itp.nsc.ru, igornt@yandex.ru

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF EXPLOSIVE BOILING ORGANIC LIQUIDS BY MEASURING THE LASER INTENSITY REFLECTED ON MICROBUBBLES

In this paper the experimental study was made for explosive boiling of liquids under pulsed heating. Experimentally obtained patterns for explosive boiling of organic liquids (ethylene glycol, octane) with the help of optical method measuring the laser intensity reflected from the microheater surface. A multi-layered thin film heater was used in experiments as microheater manufactured by Hewlett Packard technology, with size 100×110 mcm. The data of dynamics boiling shown that high heat flux density provide the conditions for the phase explosion whose properties was studied experimentally, including the history of surface vapor covering, nucleation time and the lifetime of the main bubble.

Keywords: MEMS technology, explosive boiling of liquid.