

ДИНАМИКА ВЗРЫВНОГО ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В МЕТАСТАБИЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРЕВЕ

И.А. Козулин, В.В. Кузнецов

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук
630090, Новосибирск, Россия*

Микрожидкостные электронные механические системы (МЭМС) являются важнейшей областью приложения. МЭМС системы могут активно применяться для проведения различных химических и физических процессов с малыми объемами жидких реагентов. Это способствует развитию исследований в области процессов теплообмена в микрожидкостных системах с фазовыми превращениями. Взрывное вскипание жидкости применяется в технологии струйной печати [1], лазерной хирургии [2] и связано с изучением зарождения паровой фазы, динамики пузырьков. Известны экспериментальные работы по взрывному вскипанию на тонких проволочках в режиме импульсного разогрева [3] и на плоском микро-нагревателе [4]. В данной работе проведено экспериментальное исследование вскипания жидкости (пропанола-1, н-нонана) на плоском микронагревателе при высокой внешней плотности энергии. В работе для исследования взрывного вскипания жидкости на микронагревателе использовался оптический метод, основанный на измерении интенсивности лазерного излучения, отражённого от поверхности микронагревателя [5]. Схема экспериментальной установки для исследования динамики взрывного кипения на микронагревателе показана на рис. 1 (а).

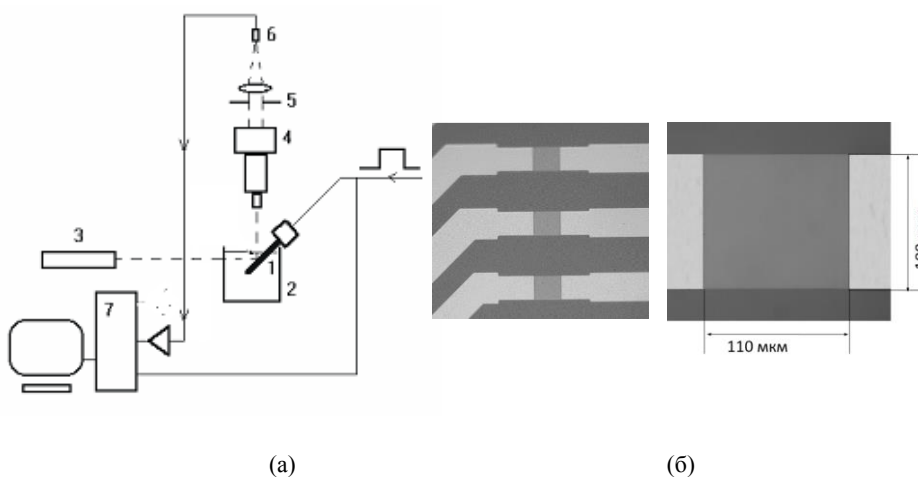


Рис. 1. (а) Схема экспериментального стенда. (б) микрочип с нагревателями и размеры одного из резисторов.

В качестве микронагревателя был использован многослойный тонко-плёночный резистор прямоугольной формы, с размером 100×110 мкм печатающей головки струйного принтера Hewlett Packard ThinkJet [6], представленный на рис. 1 (б).

В экспериментах микрочип с нагревателем (1) погружался в кювету с рабочей жидкостью (2). Температура жидкости варьировалась от 18 до 21⁰С. Одиночные прямоугольные импульсы тока подавались на микронагреватель (1) для его нагрева. Для изучения фазового взрыва использована оптическая методика регистрации зародышеобразования, основанная на измерении интенсивности лазерного пучка (3), зеркально отражённого от поверхности нагревателя (1). После отражения от нагревателя лазерный луч попадал в микроскоп (4). С помощью диафрагмы (5) вырезалась область с исследуемым микронагревателем. Интенсивность лазерного излучения регистрировалась фотодиодом (6), сигнал с которого обрабатывался на компьютере (7). При возникновении микропузырьков интегральный коэффициент зеркального отражения падает, и сигнал с фотоприёмника дает динамику заполнения поверхности нагревателя паровыми пузырьками.

На рис. 2 (а) тонкой линией представлен импульс с генератора, нормированный на единицу. Темной линией рис. 2 (а) представлена зависимость интенсивности отраженного света от микронагревателя в зависимости от времени для пропанола-1 при скорости роста температуры $dT/dt=40.48$ МК/с. Приведенная плотность тепловыделения составляла $q_{\text{eff}}=320.5$ МВт/м², длительность нагревающего импульса с генератора $t_{\text{имп}}=3.89$ мкс. На рис. 2 (б) тонкой линией представлен импульс с генератора, нормированный на единицу. Темной линией рис. 2 (б) представлена зависимость интенсивности отраженного света от микронагревателя в зависимости от времени для н-нонана при скорости роста температуры $dT/dt=40.84$ МК/с. Приведенная плотность тепловыделения составляла $q_{\text{eff}}=311.8$ МВт/м², длительность нагревающего импульса с генератора $t_{\text{имп}}=4.992$ мкс.

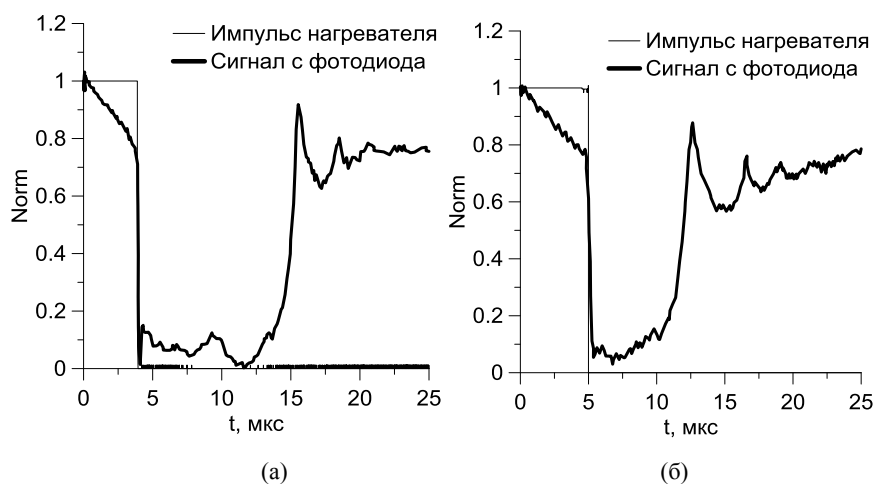


Рис. 2. Интенсивность отраженного от поверхности нагревателя светового пучка в зависимости от времени при взрывном кипении (а) пропанола-1. $q_{\text{eff}}=320.5$ МВт/м², $dT/dt=40.48$ МК/с, $t_{\text{имп}}=3.89$ мкс (б) н-нонана: $q_{\text{eff}}=311.8$ МВт/м², $dT/dt=40.84$ МК/с, $t_{\text{имп}}=4.992$ мкс

Тепловой поток от нагревателя в жидкость определялся при численном решении уравнения теплопроводности для многослойного микронагревателя с учетом выделяемого тепла в токопроводящем слое и толщин слоев. В расчетах определялась скорость роста температуры жидкости на нагревателе, достигнутая температура и передаваемый в жидкость тепловой поток в зависимости от выделяемой на нагревающем слое тепловой мощности. Теплопроводность и теплоемкость слоев микронагревателя брались по литературным данным. Взрывное вскипание жидкости характеризуется временем пузырькового распада, временем жизни основного парового пузыря, получаемого при расширении па-

ровой пленки, и временем жизни пузыря-сателлита, образующегося после схлопывания основного парового пузыря. Все эти стадии хорошо видны на рисунке 2.

На рис. 3 (а, б) приведена зависимость температуры начала вскипания пропанола-1 и н-нонана в зависимости от скорости роста температуры на микронагревателе. Пунктирной линией здесь приведено уравнение В.П. Скрипова [7]. Сплошной линией отмечены линии спинодали, рассчитанная по модели Е.Н. Сеницына [8].

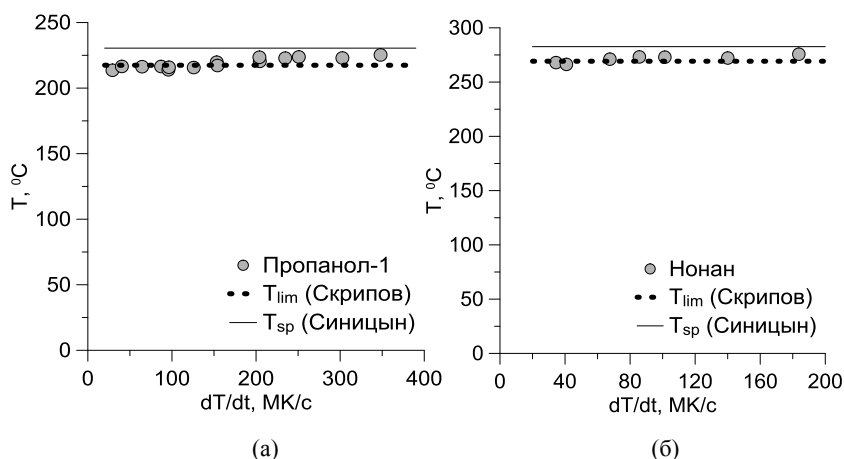


Рис. 3. (а) Температуры начала распада жидкости в зависимости от скорости роста температуры жидкости перед началом распада (а) пропанола-1, (б) н-нонана.

Применение оптического метода, основанного на изменении интенсивности лазерного пучка, зеркально отражённого от поверхности микронагревателя, показало, что данный метод имеет высокую чувствительность и позволяет изучить динамику начальной стадии взрывного кипения метастабильной жидкости. Полученные данные по динамике заполнения поверхности нагревателя паровой фазой, динамике вскипания основного парового пузыря и температуры начала кипения жидкости.

Исследование выполнено в ИТ СО РАН при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10519).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Allen R.R., Meyer J.D., Knight W.R. Thermodynamics and Hydrodynamics of Thermal Ink Jets // Hewlett-Packard J, 1985. V. 36. P. 21-27.
2. Neumann J., Brinkmann R. Boiling nucleation on melanosomes and microbeads transiently heated by nanosecond and microsecond laser pulses // J. Biomed. Opt., 2005. V. 10 (2). P. 024001 (1-12).
3. Павлов П.А., Никитин Е.Д. Кинетика зародышеобразования в перегретой воде // Теплофизика высоких температур, 1980. Т.18, №2. С. 354-358.
4. Hong J., Ashgriz N., Andrews J. Experimental study of bubble dynamics on a micro heater induced by pulse heating // J. Heat Transfer. 2004. V. 126. P. 259-271.
5. Козулин И. А., Кузнецов В. В., Барткус Г. В. Экспериментальное изучение взрывного вскипания органических жидкостей методом изменения интенсивности лазерного излучения при рассеянии на микропузырьках // Журнал Вестник НГУ. Серия Физика. 2016. Т. 11 (1). С. 66 – 72.
6. Bhaskar E.V. and Aden J.S. Development of the thin-film structure for the ThinkJet printhead // Hewlett-Packard Journal. 1985. Vol. 36. N5. P. 27-33.
7. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972. 312 с.
8. Сеницын Е.Н., Виноградов В.Е. Термодинамическое подобие и простая аппроксимация спинодали // Фазовые превращения и неравновесные процессы. Научные труды Института теплофизики УРО РАН. 1980. С.77-80.