

МЕТАСТАБИЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ И ИХ РАСПАД ПРИ ВЫСОКОЙ ВНЕШНЕЙ И ЗАПАСЕННОЙ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ

В. В. Кузнецов^{1,2}, И. А. Козулин², О. В. Витовский¹

¹*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

²*Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия*

vladkuz@itp.nsc.ru

Резюме

В работе изучены закономерности образования метастабильных состояний и их распада при импульсном нагреве жидкости. При высокой плотности потока энергии фазовые переходы происходят в условиях высокой интенсивности потоков тепла и массы, приводящих к спонтанной генерации новой фазы и фазовому взрыву. Экспериментально установлены закономерности пузырькового распада неоднородно-перегретых слоев воды и спиртов на микронагревателе. Проведено экспериментальное исследование распространение адиабатных волн испарения, возникающих при быстром переводе хладонов R-11 в метастабильное состояние сбросом давления в волне разрежения. Установлено, что фазовый переход в метастабильной жидкости проходит в условиях развития многомасштабной турбулентности в жидкой и паровой фазе при динамическом воздействии потока пара на межфазную поверхность и конвективным подводом тепла к зоне высокоинтенсивного фазового перехода.

1. Введение

Метастабильное состояние вещества возникает при его быстром нагреве до температур выше температуры фазового перехода в условиях подавления зародышей новой фазы. Управляемый распад метастабильной жидкости широко используется для быстрого изменения фазового состава жидкостей, заполняющих МЭМС системы управления, такие как оптические переключатели и затворы, пузырьковые принтеры, при лазерной очистке поверхностей.

Существует два основных механизма пузырькового распада метастабильной жидкости при ее быстром нагреве. Один из них обусловлен гетерогенным зародышеобразованием, которое происходит на центрах с низкой энергией активации, например во впадинах поверхности. Другой механизм определяется гомогенным зародышеобразованием при экспоненциальном росте тепловых флуктуаций в окрестности спинодали. Гомогенный механизм зародышеобразования наблюдается в жидкости при высокой скорости роста

температуры. Обычно для пузырькового распада жидкости оба механизма важны, но степень их проявления зависит от многих факторов. Взрывное вскипание на плоских микронагревателях исследовано в [1,2], в [1,3] было измерено акустическое излучение при пузырьковом распаде воды на микронагревателе. Хотя все отмеченные исследования были направлены на различные аспекты пузырькового распада жидкости, начальная стадия фазового перехода жидкость-пар и характеристики пузырькового распада жидкости при высоких скоростях наброса тепловой мощности остаются слабо изученными.

При наличии поверхности раздела фаз распад метастабильной жидкости может проходить в виде волны поверхностного испарения. Адиабатные волны испарения в термодинамически неравновесной среде, возникают при быстром переводе вещества в метастабильное состояние под воздействием волны разрежения. Распространение адиабатных волн интенсивного фазового перехода при быстрой разгерметизации цилиндрического канала рассмотрено в работах [4,5]. В этих работах показано, что характерной особенностью развития динамических процессов в перегретой жидкости при наличии свободной поверхности жидкость-пар является возникновение волны испарения, которая перемещается с постоянной скоростью, зависящей от начального перегрева. Обнаружено, что фронт испарения является неустойчивым и имеет пузырьковую структуру. В работе [6] проведено исследование влияния степени открытия выпускного клапана (и, соответственно, скорости понижения давления) на скорость и характер распространения волны испарения. Показано, что определяющими параметрами в таком процессе являются начальный перегрев, определяемый температурой жидкости и внешним давлением, и скорость снижения давления в системе.

Целью данной работы является экспериментальное исследование начальной стадии пузырькового распада неоднородно-перегретых слоев воды и спиртов на микронагревателе и характеристик пузырькового распада жидкости при скорости роста температуры до 182 МК/с. Другой решаемой задачей является экспериментальное исследование спонтанного распада метастабильных хладонов R-11 под действием высокоинтенсивных волн разрежения в прозрачном цилиндрическом канале. Изучена динамика распада метастабильной жидкости в виде волны поверхностного испарения и исследован механизм подвода тепла к межфазной поверхности при высокоинтенсивном испарении.

2. Экспериментальное оборудование и методы измерений.

Схема экспериментальной установки для исследования пузырькового распада слоя воды и изопропанола при нагреве на поверхности микронагревателя представлена на рис. 1. В опытах был использован многослойный тонко-плёночный нагреватель, изготовленный по технологии компании Hewlett Packard [7]. Резистор представляет собой четырехслойную

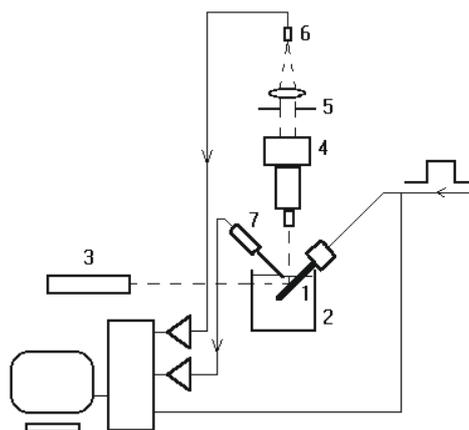


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

пленку, последовательно напыленную методом PECVD на плоской подложке из стекла. Тепловыделяющий элемент размером $100 \times 110 \text{ мкм}^2$ и $50 \times 60 \text{ мкм}^2$ представляет собой тонкую плёнку сплава TaAl толщиной 500 нм, который имеет слабую зависимость электрической проводимости от температуры. Нагреватель изолирован от воды тонкими слоями Si_3N_4 и SiC (внешний слой). Использовались также нагреватели, покрытые наноструктурным слоем тантала, который содержал большое количество центров кипения с малой энергией активации. Сэндвичевая структура нагревателя обеспечивает возможность получения экстремально высоких скоростей роста температуры слоя жидкости при импульсном нагреве. Микрочип погружался в рабочую жидкость (2), на глубину от 0.3 до 2 мм. Плотность теплового потока в жидкость достигала 400 МВт/м^2 , что дает время нагрева до температуры пузырькового распада воды меньше 1.4 мкс. Соответствующая скорость роста температуры поверхности микронагревателя составляла около 182 МК/с. Опыты проводились при атмосферном давлении.

Для изучения взрывного кипения была использована оптическая методика регистрации зародышеобразования, вскипания и динамики образующейся паровой полости, основанная на измерении интенсивности лазерного пучка, зеркально отражённого от поверхности нагревателя. При возникновении микропузырьков с диаметром, близким к длине световой волны лазера (0,6 мкм), интегральный коэффициент зеркального отражения начинает падать и инвертированный сигнал с фотоприёмника дает динамику заполнения поверхности нагревателя паровыми пузырьками. Тепловой поток от нагревателя в жидкость и скорость роста ее температуры определялись при численном решении уравнения теплопроводности для многослойного нагревателя с учетом выделяемого тепла в токопроводящем слое. Теплопроводность и теплоемкость слоев брались по литературным данным. Для фотографирования стадий фазового взрыва использовался импульсный твердотельный лазер с длительностью светового импульса до 8 нс.

Исследование распространения волн испарения в метастабильной жидкости проведено на экспериментальном стенде, схема которого показана на рис. 2. Стенд включал в себя камеру

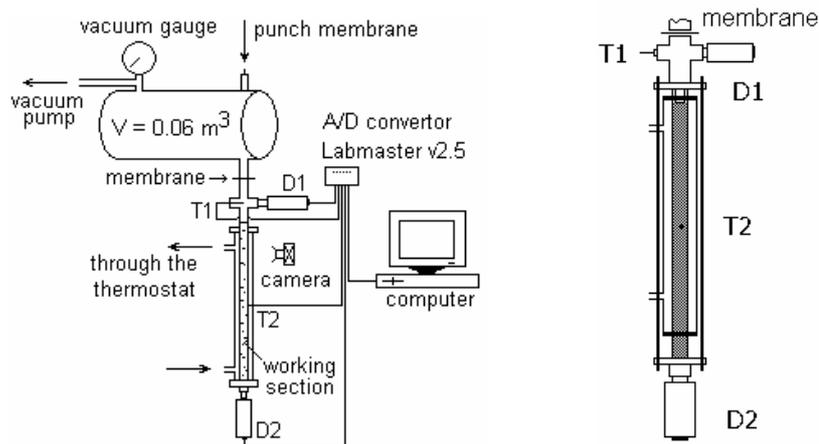


Рис. 2. Схема экспериментального стенда для исследования распространения волн испарения в метастабильной жидкости: Т – термопары и Д – датчики давления.

низкого давления объёмом 60 литров и рабочий участок с перегретой жидкостью под давлением, разделённые мембраной, разрываемой пробойником по заданной программе. В качестве рабочих жидкостей использовался хладон R-11. В качестве рабочего участка использовались цилиндрические стеклянные каналы внутренним диаметром 18 мм и 16 мм, длиной от 120 до 400 мм с толщиной стенки 1 мм. Рабочий участок располагался вертикально и имел термостатированную рубашку, в которой прокачивалась вода от термостата, что позволило нагревать хладон до заданной начальной температуры T_0 . Диапазон начальных температур фреона в рабочем участке составлял 18-80 °С и измерялся с точностью 0.3 °С. Перед опытом в камере низкого давления с помощью вакуумного насоса создавалось разрежение, которое измерялось с помощью образцового вакуумметра с точностью 0.005 бар. Диапазон давлений, создаваемых в камере низкого давления, составлял $P_{\text{res}} = 0.5 - 0.03$ бар.

Камера низкого давления соединялась с рабочим участком цилиндрическим каналом длиной 0.46 м и внутренним диаметром 16 мм. Сапфировый датчик давления D1 МИДА-ДА-13П с собственной частотой 1 кГц был расположен в верхней части рабочего участка. Для исключения конденсации паров хладона мембранный узел и датчик давления нагревались до температуры, превышающей температуру хладона, на 2-3 °С. В отдельных опытах датчик давления D2 располагался в нижней части рабочего участка. Для определения продолжительности разрыва диафрагмы индуктивный датчик давления заменялся на пьезодатчик давления ЛХ-610 с собственной частотой 10 кГц. Было установлено, что время выхода давления на значение, при котором начинается распад, не превышает 2 мсек.

В верхней части рабочего участка в потоке пара и в средней части рабочего участка заподлицо со стенкой рабочего участка размещались медь-константановые термопары T1 и T2 с постоянной времени меньше 10 мсек, смотри рис. 2. Для установки термопары T2 в стенке рабочего участка было просверлено отверстие диаметром 1 мм. Термопара с толщиной

королька 300 мкм была установлена заподлицо с внутренней стенкой, отверстие было заполнено эпоксидной смолой и проведена ее полимеризация. В ходе опыта данные с датчиков через АЦП и коммутатор Labmaster V2.5 обрабатывались на ПК. Регистрация распада проводилась с помощью высокоскоростной цифровой видеокамеры Phantom v7.0 с разрешением 800x600 пикселей и разрядностью 12 бит, позволяющей получать 4800 кадров в секунду.

3. Динамика пузырькового распада жидкости при высокой внешней плотности энергии.

Типичные фотографии взрывного кипения воды и изопропанола на микронагревателе с танталовым покрытием показаны на рис. 2. На рисунке 2 (а) приведена фотография поверхности нагревателя, погруженного в воду, после 2.24 мкс от начала нагрева. Пузырьковый распад воды имеет взрывной характер и происходит за время меньше 350 нс. На начальной стадии распада пузырьки неравномерно распределены по поверхности нагревателя, их число мало и в момент зарождения пузырьков наблюдается излучение расходящихся волн давления. По мере роста температуры нагревателя число пузырьков растет, они объединяются и формируют сплошную паровую пленку.

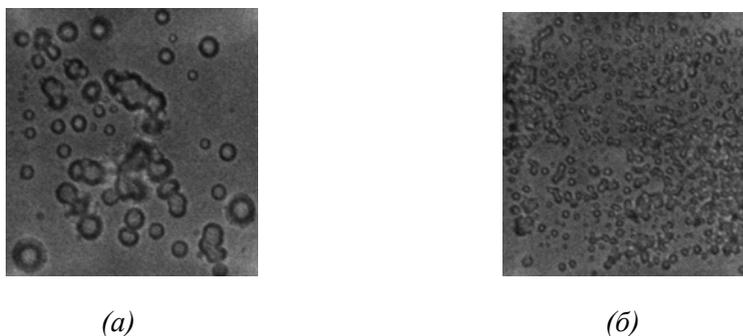


Рис. 2. Структура пузырькового слоя на микронагревателе 50x60 мкм при плотности теплового потока (а) $q_w = 31 \text{ кВт/см}^2$ (вода) и (б) $q_w = 21 \text{ кВт/см}^2$ (изопропанол).

Вскипание изопропилового спирта происходит при меньших тепловых потоках, чем для воды. Число пузырьков для спирта существенно больше, и их размер существенно меньше, чем для воды, что показывает существенное влияние физических свойств жидкостей за закономерности ее пузырькового распада. На начальной стадии пузырькового распада пузырьки неравномерно распределены по поверхности нагревателя, их число мало и в момент зарождения пузырьков наблюдается излучение расходящихся волн давления. По мере роста температуры число пузырьков растет и на заключительной стадии пузырькового распада поверхность нагревателя равномерно покрыта облаком пузырьков, которые в дальнейшем объединяются, формируя сплошную паровую пленку.

С помощью оптического метода получены экспериментальные данные по влиянию скорости роста температуры жидкости и внешней плотности теплового потока на динамику заполнения поверхности пузырьками, температуры начала пузырькового распада и его длительности. Измерение амплитуды излучаемой волны давления в зависимости от внешней плотности энергии позволило экспериментально доказать волновой механизм фазового взрыва неравновесной системы, обусловленный взаимосвязью гидродинамических, тепловых и акустических явлений при интенсивном фазовом переходе.

4. Динамика поверхностного распада метастабильной жидкости.

Волна поверхностного фазового перехода инициировалась при сбросе давления, вызванного разрывом мембраны и воздействием волны разрежения на перегретую жидкость с переводом ее в метастабильное состояние. После установления давления в метастабильной жидкости, в термодинамически неравновесной системе перегретая жидкость-пар в приповерхностном слое инициируются микровзрывы пузырьков и происходит формирование пульсирующей волны интенсивного фазового перехода с ячеистой структурой межфазной поверхности. На рис. 4 (а, б, в) показаны характерные стадии поверхностного распада хладона R-11 при $T_0 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_{\text{res}} = 0.043 \text{ бар}$. Они включают стадию интенсивного испарения при

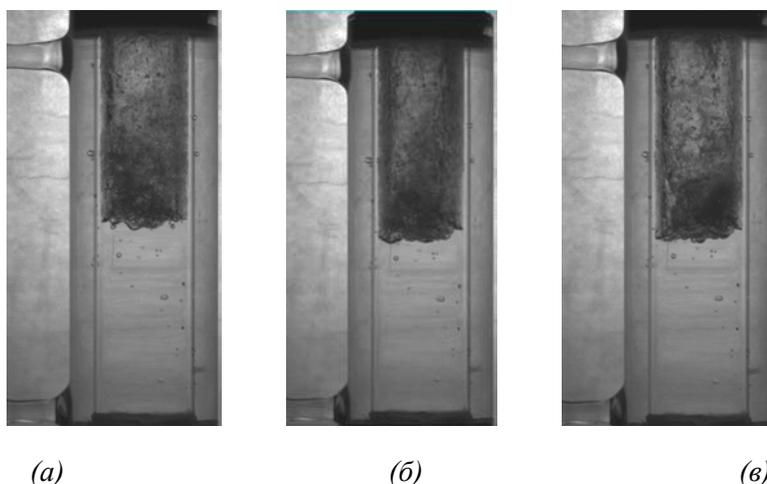


Рис. 4. Стадии поверхностного фазового перехода при $T_0 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$: (б) начало выброса пересыщенного пара и перемещения границы, (в) конец выброса и остановка границы, (г) начало нового выброса пересыщенного пара.

выбросе пересыщенного пара и перемещении границы (а), стадию конец выброса и остановки границы (б), начало нового выброса пересыщенного пара (в). Съемка проведена в проходящем свете с использованием высокоскоростной видеокамеры. Стационарные пузырьки воздуха, наблюдаемые на рис. 4, расположены в охлаждающей рубашке, а не в исследуемом объеме. Как видно на рис. 4 (б), на стадии задержки испарения, волна распада существенно неустойчива, и

наблюдается турбулизация жидкости из-за неоднородного в сечении канала динамического давления пара.

Пульсирующее движение волны фазового перехода вызывает значительные ускорения потока. На рис. 5 (а) показана зависимость расстояния, пройденного волной испарения, от времени. Изменение локальной скорости волны в процессе ее распространения показано на рис. 5 (б) при $T_0 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Локальная скорость волны была определена по данным видеосъемки

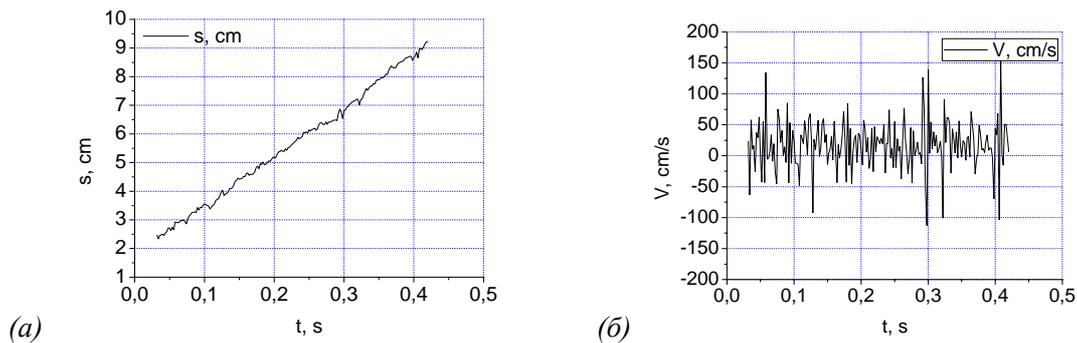


Рис. 5. Зависимость расстояния, пройденного фронтом испарения (а) и локальной скорости фронта от времени (б) при $T_0 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$.

вдоль образующей в пределах «смотрового» окна размером 30 px на 50 px. Наблюдаются значительные пульсации скорости волны при сравнимых скоростях движения межфазной поверхности вверх и вниз по потоку, которые значительно превосходят ее среднее значение. Стадия активного парообразования и перемещения фронта сменяется остановкой волны распада, но средняя скорость волны (исключая начальный участок длительностью 0.01 – 0.015 сек) постоянна в течение всего процесса фазового перехода. Средняя скорость волны слабо зависит от давления в камере низкого давления и определяется, в основном, начальной температурой жидкости. При перегревах меньше $18 \text{ }^\circ\text{C}$ волны испарения не наблюдались. Вблизи порогового перегрева значительно возрастал разброс экспериментальных данных, что показывает нестабильность волны фазового перехода в окрестности порогового перегрева.

Быстрое перемещение волны фазового перехода, сопровождающееся интенсивным испарением жидкости и выбросом пересыщенного пара, чередуется с периодом замедления движения фронта, в течение которого происходит подвод тепла к межфазной границе в условиях высокой степени межфазной турбулентности в окрестности фронта волны. Число Якоба в экспериментах изменялось от 0.107 до 0.21 и накопленного в жидкости тепла недостаточно для полного испарения жидкости. В условиях наведенной фронтом испарения межфазной турбулентности с широким диапазоном характерных масштабов подвод тепла к межфазной поверхности происходит крайне нерегулярно. Это показывают пульсации степени черноты потока при выбросе переохлажденного пара, показанные на рис. 6 (а). Здесь приведена зависимость изменения степени черноты потока от времени для подвижного и неподвижного

«смотровых» окон (минимум дает затемнение) и соответствующий вид потока. Установлено, что частота смены режимов испарения возрастает с ростом начальной температуры жидкости. На рис. 6 (б) приведены Фурье спектры пульсаций давления и температуры при распространении волны испарения в R-11, $T_0 = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{res}} = 0.04\text{ бар}$. В спектрах выделяются характерные частоты, например частоты 15 и 27 Гц, что показывает взаимосвязь выброса пересыщенного пара в поток с пульсациями температуры и давления.

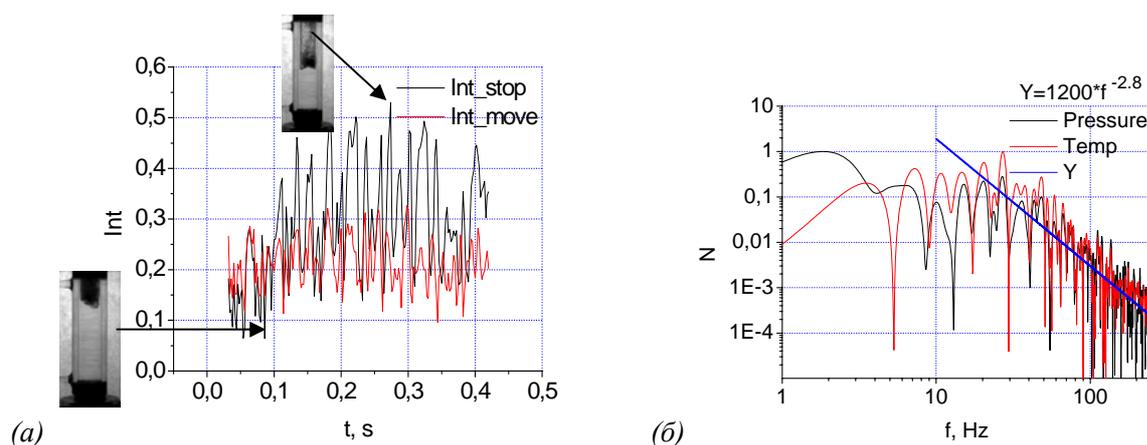


Рис. 6. Зависимость интенсивности света от времени для подвижного и неподвижного окна (минимум дает затемнение) - (а); и Фурье спектр пульсаций давления и температуры (б) при распространении волны испарения в R-11, $T_0 = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{res}} = 0.04\text{ бар}$.

Известно, что конденсация пересыщенного пара происходит в пульсирующем режиме и вызывает значительные колебания давления в потоке, что является одной из причин пульсирующего движения волны адиабатного испарения, смотри рис. 6 (б). Конденсация пересыщенного пара вызывает установление термодинамического равновесия со значительным количеством капельной жидкости, наблюдаемой в потоке.

5. Заключение

В результате выполненных работ получены экспериментальные данные по пузырьковому распаду воды и спиртов при их быстром нагреве микронагревателем. Получено, что в результате гомогенного зародышеобразования, наблюдается фазовый взрыв метастабильной жидкости на временах меньше 300 нсек. Измерение амплитуды излучаемой волны давления в зависимости от внешней плотности энергии позволило экспериментально доказать волновой механизм фазового взрыва неравновесной системы, обусловленный взаимосвязью гидродинамических, тепловых и акустических явлений при интенсивном фазовом переходе.

Выполнен комплекс экспериментальных исследований распространения адиабатных волн испарения при быстром переводе хладона R-11 в метастабильное состояние сбросом давления в волне разрежения. Установлено, что фазовый переход в метастабильной жидкости

проходит в условиях развития многомасштабной турбулентности в жидкой и паровой фазе при динамическом воздействии потока пара на межфазную поверхность и конвективного подвода тепла к зоне высокоинтенсивного фазового перехода. Это значительно снижает температуру межфазной поверхности по сравнению с начальной температурой жидкости, снижает массовую скорость потока пара на межфазной поверхности. С использованием высокоскоростной видеокамеры проведена визуализация поверхностного фазового перехода, установлен его пульсирующий характер и определены свойства. Установлено, что в условиях интенсивного испарения при числах Якоба меньше единицы, подвод тепла к межфазной поверхности происходит крайне нерегулярно, что показывают пульсации степени черноты потока при выбросе переохлажденного пара, пульсации температуры и давления в потоке. В спектрах Фурье указанных величин выделяются характерные частоты, что показывает взаимосвязь выброса пересыщенного пара в поток с пульсациями температуры и давления.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Сибирского Отделения РАН (интеграционный проект № 74); Программы №2 президиума РАН на 2012-2014 гг., и гранта Правительства России № 11.G34.31.0035 ведущему ученому В.Е Захарову.

Литература

1. Kuznetsov V.V., Vasserman E.S. Explosive vaporization dynamics on a flat microheater. Proc. 3-rd International Symposium on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation. 2004. Pisa. Paper ven 04.
2. Hong J., Ashgriz N., Andrews J. Experimental study of bubble dynamics on a micro heater induced by pulse heating. J. Heat Transfer. 2004. Vol. 126. pp. 259-271.
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, No. 21. pp. 281-296.
4. Simoez-Moreira J.R., Shepherd J.E. Evaporation waves in superheated dodecane. J. Fluid Mech. 1999. Vol. 382. pp. 63-86.
5. Kuznetsov V.V., Vitovsky O.V. Evaporation Waves in a Metastable Single-Component Liquid. Journal of Engineering Thermophysics. 2007. Vol. 16, No. 3. pp. 169-174.
6. Hahne E., Barthau G. Evaporation Waves in Flashing Processes. Int. J. of Multiphase Flow. 2000. Vol. 26. pp. 531-547.
7. Bhaskar E.V., Aden J.S. Development of the thin-film structure for the ThinkJet printhead. Hewlett-Packard Journal. 1985. Vol. 36, No. 5. pp. 27-33.
8. Kagan Y. The kinetics of boiling of a pure liquid. Russ. J. Phys. Chem. 1960. Vol. 34, No. 1. pp. 42 – 48.
9. Rayleigh J. W. S. (1945) The theory of sound. Vol. 2. 2nd revised ed. Dover, New York.