

УДК 536.423

ОСОБЕННОСТИ ВЗРЫВНОГО ВСКИПАНИЯ ЖИДКОСТЕЙ НА ПЛЕНОЧНОМ МИКРОНАГРЕВАТЕЛЕ

Ю. Д. Варламов, Ю. П. Мещеряков*, М. Р. Предтеченский,
С. И. Лежнин, С. Н. Ульянов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск

* Конструкторско-технологический филиал Института гидродинамики
им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

E-mail: varlamov@itp.nsc.ru

Экспериментально исследовано взрывное кипение жидкостей на пленочных нагревателях под действием импульсных тепловых потоков $q = 10^8 \div 10^9$ Вт/м². Использовалась методика стробоскопической визуализации стадий кипения с временным разрешением 100 нс. Показано многообразие сценариев развития процесса взрывного кипения и найдены условия теплового воздействия (величины теплового потока, длительности и частоты повторения тепловых импульсов), при которых реализуются однократное и многократное вскипание, прерывистое кипение и кипение с образованием сложных пузырьковых структур. Отмечено, что при $q > 10^8$ Вт/м² гомогенное зародышеобразование является доминирующим механизмом вскипания тестируемых жидкостей.

Ключевые слова: взрывное кипение, пленочный нагреватель, гомогенное зародышеобразование, режимы кипения.

Введение. Интерес к проблеме взрывного вскипания жидкостей на низкоинерционных нагревателях, реализующегося при больших тепловых потоках, обусловлен использованием данного процесса в микромеханических устройствах [1–3].

В большинстве работ, посвященных изучению взрывного вскипания, исследовался механизм начала кипения жидкостей при их импульсном нагреве. В работах [4–7] рассмотрены условия флуктуационного образования зародышей. В работах [4, 8] показано, что при высоких скоростях роста температуры (более 10^6 К/с) наряду с образованием пузырей на фиксированных центрах кипения существенным становится вклад гомогенного зародышеобразования в перегретой жидкости. В серии экспериментов, выполненных на пленочных нагревателях и ультратонких проволочках при высоких скоростях роста температуры жидкости (до 10^8 К/с), показано соответствие экспериментальных данных предсказаниям теории гомогенного зародышеобразования [4, 8–11]. Результаты работ [10, 11] указывают также на то, что величина теплового потока влияет не только на скорость генерации пузырей, но и на характер последующей эволюции формируемых паровых образований. В этих работах отмечается многократное вскипание, а также образование долгоживущих пузырей.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию особенностей взрывного вскипания жидкостей на пленочных микронагревателях под действием импульсных тепловых потоков $q = 10^8 \div 10^9$ Вт/м². В экспериментах изучалось развитие процесса взрывного кипения при различных условиях теплового воздействия (величины теплового потока, длительности и частоты следования тепловых импульсов).

1. Экспериментальное оборудование и методики исследования. Эксперименты выполнены на установке, схема которой представлена на рис. 1. Взрывное вскипание жидкостей реализовывалось на плоском нагревателе, в качестве которого использовалась пленочная структура картриджа струйного принтера, описанная в работе [11]. Нагревателем являлся тонкопленочный резистор с размерами 100×100 мкм, расположенный на подложке из стекла, покрытого тонким слоем диоксида кремния. Сверху резистор защищен тонким коррозионно-стойким слоем. Нагреватель погружался в кювету с прозрачными стенками, заполненную тестируемой жидкостью. Нагрев пленочного резистора проводился путем пропускания импульсов тока с задающего генератора (генератора импульсов Г5-56). По результатам измерения амплитуды импульсов тока, площади и электрического сопротивления пленочного нагревателя определялись значения мгновенной мощности, выделяемой на нагревателе, и эффективного потока тепла q . Диапазон значений теплового потока составлял $10^8 \div 10^9$ Вт/м² при частоте следования тепловых импульсов $f = 10 \div 100$ Гц с длительностью $\tau_h = 2 \div 10$ мкс.

Визуализация взрывного вскипания жидкостей осуществлялась по методике стробоскопической видеорегистрации и последующей реконструкции последовательности стадий быстропротекающих повторяющихся процессов (см., например, [12]). В каждом акте вскипания, инициированном действием импульсов тока, регистрировалась одна стадия процесса, наступление которой определялось задаваемым временем задержки с начала нагрева до момента вспышки стробоскопа малой длительности. С этой целью сигнал с генератора через линию задержки (генератор импульсов Hewlett Packard 8112A) подавался на запуск стробоскопической системы (рис. 1). Минимальный шаг задержки по времени составлял 100 нс. Световой импульс длительностью 100 нс формировался с помощью стробоскопической лампы ИСП-100. Для увеличения интенсивности и равномерности освещения области регистрации использовались линзы Френеля. Визуализация процесса осуществлялась с помощью видеокамеры (Toshiba ИК-М50Н, блок управления ИК-СУ50) с микроскопным объективом (Mitutoyo M Plan Apo 10) и системой оптического изменения масштаба изображения (Navitar Zoom x4), обеспечивающих максимальное увеличение x40 на матрице

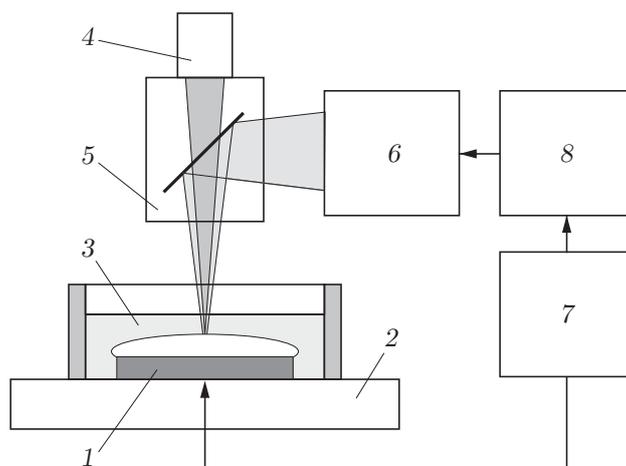


Рис. 1. Схема установки для визуализации стадий вскипания жидкостей на пленочном нагревателе:

1 — пленочный микронагреватель; 2 — подложка нагревателя; 3 — прозрачная кювета с жидкостью; 4 — видеокамера; 5 — микроскопная насадка; 6 — стробоскопическая система; 7 — генератор импульсов; 8 — линия задержки

(IT-CCD, 752×582 пикселей). Предлагаемая методика позволяла выполнить съемку стадий процесса в двух ракурсах: в направлении, перпендикулярном плоскости нагревателя (вид сверху), и в направлении, параллельном плоскости нагревателя (вид сбоку). Проводилась запись выделяемых стадий, а также реконструкция их последовательности. Оценивались характерные временные масштабы процессов и геометрические размеры паровых образований.

Эксперименты выполнены с жидкостями (вода, толуол, этанол, изопропиловый спирт), существенно различающимися по теплофизическим свойствам (поверхностное натяжение, температура кипения, удельная теплота парообразования, давление насыщенных паров, теплопроводность, удельная теплоемкость) [13, 14].

2. Эксперимент. Результаты экспериментов по вариации условий теплового воздействия (величины и длительности тепловых импульсов) показали, что в изменении характера кипения жидкостей на пленочном нагревателе имеется определенная закономерность, которая условно может быть представлена в виде последовательности различных режимов кипения. Так, при заданном тепловом потоке q по мере увеличения длительности тепловых импульсов τ_h реализуются следующие режимы кипения:

— режим кипения с генерацией одиночных пузырей, рост которых не приводит к образованию сплошной паровой каверны, покрывающей поверхность нагревателя;

— режим кипения, в котором сначала происходит генерация микропузырей, затем их количество резко уменьшается, после чего вновь возрастает, что приводит к образованию паровой каверны (рис. 2, *a*);

— режим кипения, характеризующийся генерацией большого количества пузырей, быстро образующих паровую каверну с последующим ее ростом и коллапсом (рис. 2, *б*);

— режим кипения, в котором после роста и схлопывания каверны происходит повторное вскипание (рис. 2, *в*), причем количество циклов вскипания возрастает с увеличением длительности тепловых импульсов (этот эффект отмечался также в работах [10, 11]).

В указанной последовательности смены режимов кипения закономерен тот факт, что начиная с определенных длительностей тепловых импульсов время начала кипения жидкости t_b остается неизменным. Для всех тестируемых жидкостей найдены значения теплового потока q и соответствующие моменты времени t_b , в которые начиналось кипение (рис. 3). Было отмечено, что если действие теплового импульса τ_h прекращалось в момент начала кипения t_b , то последующий процесс кипения включал единичный акт генерации большого количества микропузырей, образования паровой каверны, ее роста и коллапса. Найденные наборы значений q и $\tau_h = t_b$ (рис. 3) соответствовали условиям реализации режима однократного вскипания (см. рис. 2, *б*). Это позволяет обобщить закономерности изменения характера кипения жидкостей. При длительностях тепловых импульсов, превышающих длительность импульсов, соответствующих условиям однократного вскипания ($\tau_h > t_b$), процесс кипения постепенно становится многократно повторяющимся (см. рис. 2, *в*). При уменьшении длительности тепловых импульсов ($\tau_h = (0,8 \div 0,9)t_b$) по сравнению с длительностью импульсов, соответствующих условиям однократного вскипания, реализуется режим прерывистого вскипания, характеризующийся изменением количества генерируемых микропузырей (см. рис. 2, *a*). По сравнению с однократным вскипанием длительность процесса образования и последующей эволюции каверны возрастает, а размеры образующейся каверны становятся меньше. Это различие увеличивается по мере уменьшения длительности тепловых импульсов. Наконец, при длительностях $\tau_h \ll t_b$ вскипания не происходит.

Следует отметить, что подобная закономерность изменения характера кипения жидкостей имеет место и в случае вариации величины теплового потока при заданных значениях длительности теплового импульса.

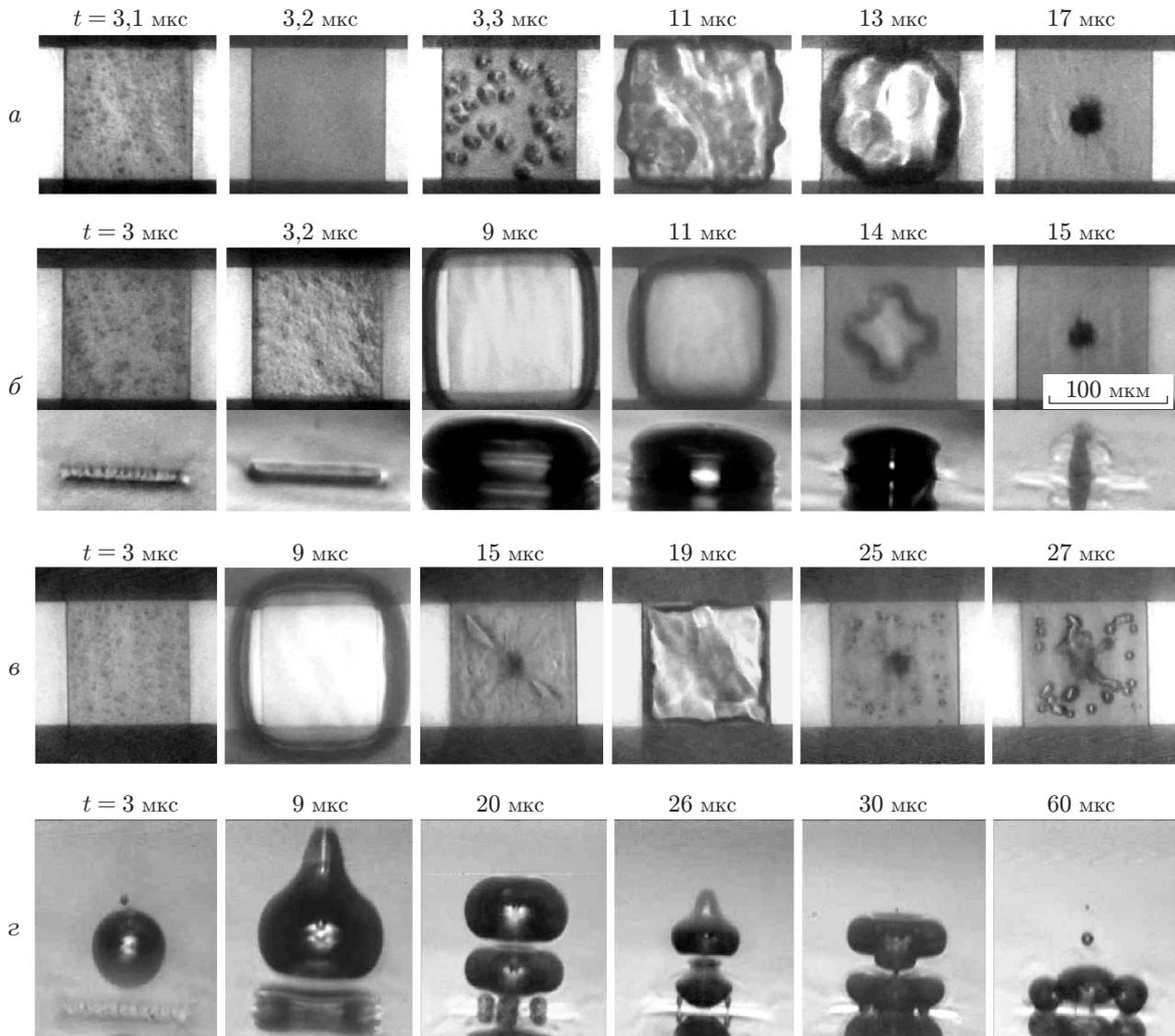


Рис. 2. Режимы вскипания изопропилового спирта на пленочном нагревателе ($q = 4,3 \cdot 10^8$ Вт/м²):

а — $\tau_h = 2,6$ мкс, $f = 20$ Гц (вид сверху); *б* — $\tau_h = 3$ мкс, $f = 20$ Гц (вид сверху и вид сбоку); *в* — $\tau_h = 9$ мкс, $f = 20$ Гц (вид сверху); *з* — $\tau_h = 3$ мкс, $f = 100$ Гц (вид сбоку)

В экспериментах также отмечено, что при схлопывании каверны паровое образование полностью не исчезает. При низкой частоте следования тепловых импульсов (20 Гц) вблизи поверхности нагревателя формируются восходящие потоки жидкости, содержащие пузыри (см. рис. 2,б). Возможность визуализации тепловых потоков при освещении обусловлена различием плотности, а следовательно, и оптических свойств нагретых и холодных слоев жидкости. При увеличении частоты следования тепловых импульсов (с 20 до 100 Гц) всплывающие пузыри не исчезали, а образовывали крупный долгоживущий пузырь размером около 100 мкм (см. рис. 2,з). Пузырь образовывался вблизи поверхности нагревателя за время порядка 10 с с момента подачи тепловых импульсов. При прекращении подачи тепловых импульсов образовавшийся пузырь исчезал за время, большее 1 мин. При использовании дегазированной жидкости в условиях контакта жидкости с атмосферой пузырь образовывался в течение 3–5 мин.

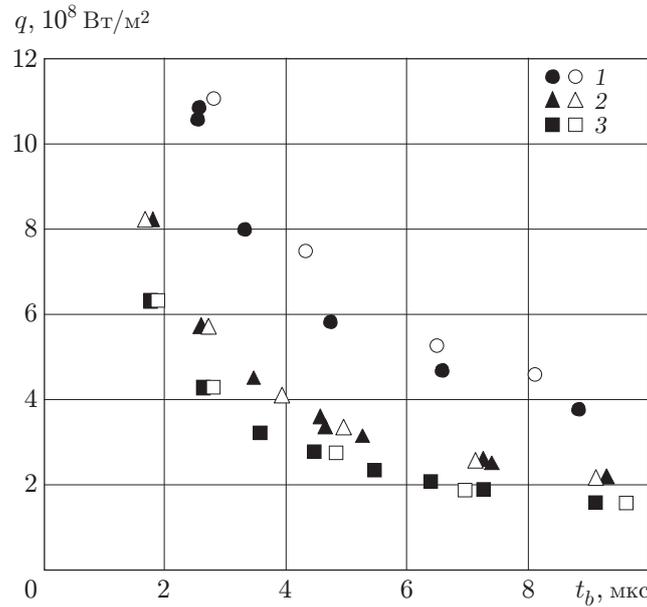


Рис. 3. Зависимость времени начала кипения жидкостей t_b от теплового потока q :

темные точки — экспериментальные данные, светлые точки — результаты численного расчета; 1 — вода, 2 — толуол, 3 — изопропиловый спирт

Наличие подобного пузыря оказывало существенное влияние на процесс кипения. Формировалась сложная пузырьковая структура, один из примеров эволюции которой представлен на рис. 2,з.

3. Обсуждение. Для определения условий реализации взрывного кипения жидкостей на пленочных нагревателях проведен расчет изменения температуры жидкости вблизи нагревателя $T(t)$ в процессе нагрева. Моделирование нагрева пленочной структуры нагревателя и жидкости основывалось на численном решении двумерных уравнений теплопроводности, которые в приближении осевой симметрии имеют вид

$$\frac{\partial (r\rho_i c_i T_i)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(r\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) + r q_V(t). \quad (1)$$

Здесь r, z — цилиндрические координаты; λ_i, c_i, ρ_i — теплопроводность, удельная теплоемкость и плотность среды; индекс i — номер слоя в системе нагреватель — жидкость (для жидкости $i = 1$, для коррозионно-стойкого слоя $i = 2$, для резистора $i = 3$, для слоя оксида кремния $i = 4$, для подложки $i = 5$); q_V — удельная мощность источника тепла в слое резистора.

Уравнения (1) замыкались начальными условиями $T_i|_{t=0} = T_0$ и условиями теплообмена между слоями — равенствами тепловых потоков и температур. На внешних границах ставилось условие равенства нулю тепловых потоков, поскольку тепловые “возмущения” не успевают достигнуть внешних границ за время действия теплового импульса.

Началу кипения соответствовал момент времени $t = t_b$, когда температура жидкости вблизи нагревателя достигала значения $T = T_b$, при котором на поверхности нагревателя площадью S образовывался один пузырь. Это условие записывается в виде

$$S \int_{t=0}^{t=t_b} J(T(t)) dt = 1, \quad (2)$$

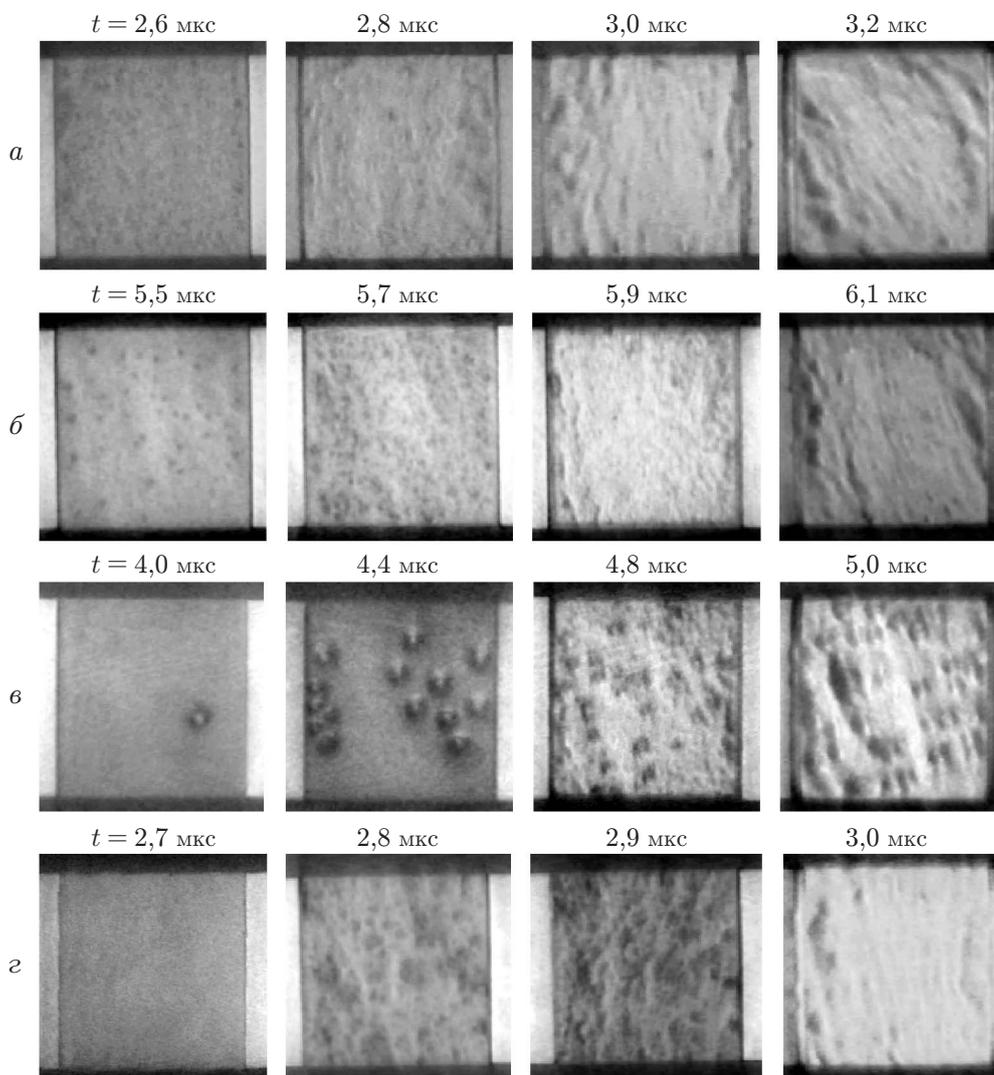


Рис. 4. Начальная стадия кипения жидкостей:

a, б — изопропиловый спирт (*a* — $q = 4,3 \cdot 10^8$ Вт/м², $\tau_h = 2,6$ мкс; *б* — $q = 2,4 \times 10^8$ Вт/м², $\tau_h = 5,5$ мкс); *в, г* — вода (*в* — $q = 7 \cdot 10^8$ Вт/м², $\tau_h = 4,8$ мкс; *г* — $q = 9,2 \cdot 10^8$ Вт/м², $\tau_h = 2,8$ мкс)

где $T(t)$ — температура жидкости вблизи поверхности нагревателя; J — скорость образования зародышей (количество зародышей, образующихся в единицу времени на единице поверхности нагревателя). Температура жидкости в каждый момент времени t определялась из решения системы уравнений (1). Для определения скорости образования зародышей необходимо выделить механизм кипения, доминирующий при исследуемых условиях теплового воздействия.

Результаты экспериментов показали, что для тестируемых органических жидкостей при высоких тепловых потоках (см. рис. 4, *a*) в момент времени t_b появляется большое количество пузырей, которые видны под микроскопом как точечные образования. Затем в течение 100–200 нс образуется сплошная паровая пленка. При уменьшении теплового потока (рис. 4, *б*) длительность процесса с момента появления микропузырей до их слияния увеличивалась, что позволило оценить плотность генерируемых пузырей: $n > 10^{10}$ м⁻². Места зарождения пузырей имеют случайный характер.

В отличие от органических жидкостей в воде при малых тепловых потоках (рис. 4, в) первые пузыри появлялись на фиксированных центрах парообразования. Оцениваемое количество центров парообразования на поверхности используемых нагревателей составляло $n = 10^8 \div 10^9 \text{ м}^{-2}$. Однако затем наблюдалось резкое увеличение количества пузырей. Оценка количества пузырей перед их слиянием в паровую пленку показывает, что их плотность $n > 10^{10} \text{ м}^{-2}$. При увеличении теплового потока (рис. 4, г) длительность процесса с момента появления микропузырей до момента их слияния в паровую пленку уменьшалась. При быстром росте количества пузырей выделить их появление на фиксированных центрах парообразования не удавалось. Характер вскипания воды становился подобным характеру вскипания органических жидкостей.

На рис. 3 представлены зависимости моментов времени, в которые начиналось кипение жидкостей, от плотности потока тепла. Видно, что для тестируемых жидкостей полученные зависимости подобны. Следовательно, можно предполагать, что механизм кипения исследуемых жидкостей в основном одинаков.

Отмеченные закономерности согласуются с результатами работ [4, 6, 8–11], в которых сделан вывод, что при больших тепловых потоках доминирующим механизмом кипения является гомогенное зародышеобразование. Поэтому в соответствии с теорией гомогенного зародышеобразования [7, 15, 16] для определения скорости образования зародышей в уравнении (2) может быть использовано выражение

$$J(T) = \frac{(N_A)^{2/3} \rho_l(T) \Psi}{\mu} \left(\frac{6\sigma N_A}{\pi \mu (2 + P/P_S(T)) \omega} \right)^{1/2} \exp \left(- \frac{L(T) \mu}{RT} \right) \times \exp \left(- \frac{16\pi \sigma^3(T) N_A \omega}{3RT (P_S(T) - P)^2 (1 - \rho_v(T)/\rho_l(T))^2} \right), \quad (3)$$

где R — универсальная газовая постоянная; P — внешнее давление; μ — молекулярная масса; σ — поверхностное натяжение; ρ_l, ρ_v — плотности жидкости и пара; L — скрытая теплота парообразования; N_A — число Авогадро; $P_S(T)$ — давление насыщенных паров; $\psi = (1 + \cos \alpha)/2$; $\omega = (1 + \cos \alpha)^2 (2 - \cos \alpha)/4$; α — контактный угол смачивания. В расчетах в предположении высокой смачиваемости поверхности нагревателя контактный угол смачивания принимался равным нулю ($\alpha = 0$).

Численное решение уравнений теплопроводности (1) основано на применении неявной консервативной схемы второго порядка точности, в которой условие баланса тепла выполняется точно. Получаемая в результате аппроксимации система линейных уравнений решалась методом прогонки. Численное интегрирование уравнения (2) осуществлялось методом трапеций. В результате совместного решения уравнений (1)–(3) получены следующие значения температуры предельного перегрева жидкостей: для воды $T_b \approx 587 \text{ К}$, для толуола $T_b \approx 539 \text{ К}$, для этанола $T_b \approx 478 \text{ К}$, для изопропилового спирта $T_b \approx 465 \text{ К}$. Эти данные соответствуют результатам работ [4, 9]. Расчетные и экспериментальные значения теплового потока и времени начала кипения жидкостей представлены на рис. 3. Видно, что для органических жидкостей различие расчетных и экспериментальных данных не превышает 10 %. Для воды предсказания теории превышали результаты эксперимента на 20 %. Подобная закономерность отмечена в работах [4, 9].

Найденные зависимости времени начала кипения от теплового потока для всех исследованных жидкостей (см. рис. 3) характеризуют также условия теплового воздействия (величину теплового потока q и длительность тепловых импульсов, действие которых прекращалось в момент начала кипения $\tau_h = t_b$), при которых происходит однократное вскипание. Условно эти зависимости можно рассматривать как границу, разделяющую области с условиями теплового воздействия, при которых отсутствует или реализуется взрывное кипение. Из численных расчетов следует, что при уменьшении длительности теплового

импульса ($\tau_h = (0,8 \div 0,9)t_b$) по сравнению с длительностью импульса, соответствующей условиям однократного вскипания, вследствие тепловой инерционности нагревателя температура жидкости продолжает расти и происходит вскипание (см. рис. 2,а). Однако в отличие от процесса однократного вскипания далее происходит резкое уменьшение, а затем вновь увеличение количества генерируемых пузырей. По-видимому, реализуемая в этих условиях скорость нагрева жидкости недостаточна для обеспечения баланса между количеством тепла, поступающего в жидкость, и количеством тепла, необходимого для поддержания роста микропузырей и развития кипения. Первоначально образовавшиеся микропузыри исчезают. Дальнейший инерционный рост температуры поверхности нагревателя и распределение температуры в жидкости после исчезновения микропузырей вновь создают условия для вскипания. Однако интенсивность этого процесса снижается. В результате длительность процесса образования и эволюции каверны возрастает, а размеры образующейся каверны уменьшаются. Поэтому обнаруженный режим прерывистого кипения можно считать переходным к режиму однократного вскипания. При дальнейшем уменьшении длительности тепловых импульсов количество генерируемых пузырей уменьшается. Они уже не образуют паровую каверну, покрывающую поверхность нагревателя. Взрывного кипения не происходит.

В случае, когда длительность тепловых импульсов или значение теплового потока больше значений, соответствующих условиям однократного вскипания, происходит дальнейший разогрев нагревателя. Жидкость отделена от нагревателя растущей каверной. Вследствие низкой теплопроводности пара поток тепла от нагревателя в пар незначителен. Как показали расчеты, при длительности теплового импульса $\tau_h = 2t_b$ температура нагревателя в момент времени $t = \tau_h$ превышает температуру начала кипения жидкости почти в два раза. При схлопывании каверны в результате контакта жидкости с нагревателем происходит быстрый нагрев и повторное вскипание жидкости (см. рис. 2,б). Имеет место переход от режима однократного вскипания к режиму многократного вскипания.

Как отмечено в п. 2, при схлопывании полного коллапса каверны не наблюдалось (см. рис. 2,б), а при увеличении частоты следования тепловых импульсов (до 100 Гц) вблизи поверхности нагревателя образовывался крупный пузырь (см. рис. 2,з). С учетом условий образования данного пузыря и времени его жизни (см. п. 2) можно сделать вывод, что наблюдаемый эффект обусловлен наличием растворенного в жидкости газа.

Предположение о присутствии в паровой каверне молекул газа, растворенного в жидкости, позволяет объяснить отсутствие полного коллапса каверны и образование пузырей вблизи поверхности нагревателя. При увеличении частоты следования тепловых импульсов в результате действия конвективных потоков постепенно увеличивается температура слоев жидкости, прилегающих к нагревателю. Увеличивается также время жизни газовых пузырей, что способствует их слиянию и формированию большого пузыря. Это согласуется с наблюдаемой в эксперименте закономерностью: долгоживущее газовое образование формируется не под действием единичного импульса, а в результате многократно повторяющегося процесса. При росте, а затем коллапсе паровой каверны под действием возникающего давления и в результате движения жидкости газовый пузырь деформируется и разрушается. При этом образуются пузырьковые структуры сложной формы, эволюционирующие во времени (см. рис. 2,з).

Заключение. Таким образом, эксперименты, выполненные при различных условиях теплового воздействия, позволили выделить закономерности в последовательности изменения характера кипения жидкостей на пленочном нагревателе под действием импульсных тепловых потоков.

Найдены зависимости моментов времени начала кипения исследуемых жидкостей от теплового потока, которые, в свою очередь, определяют условия однократного взрывного

вскипания. Показано, что при уменьшении значений потока тепла или длительности тепловых импульсов по сравнению со значениями, соответствующими условиям однократного вскипания, кипение становится прерывистым, что проявляется в резких изменениях количества генерируемых пузырей. При значениях потока тепла и длительности тепловых импульсов, превышающих значения, соответствующие условиям однократного вскипания, процесс кипения жидкости становился многократно повторяющимся. При частоте следования тепловых импульсов более 20 Гц обнаружено формирование сложных пузырьковых структур, являющихся результатом взаимодействия паровой каверны и газового пузыря, образующегося вблизи поверхности нагревателя.

Данные экспериментов и их сопоставление с предсказаниями теории позволяют сделать вывод, что при тепловых потоках $q > 10^8$ Вт/м² гомогенное зародышеобразование является доминирующим механизмом кипения тестируемых жидкостей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Allen R. R., Meyer J. D., Knight W. R.** Thermodynamics and hydrodynamics of thermal ink jets // Hewlett-Packard J. 1985. N 5. P. 21–27.
2. **Lin L., Pisano A.** Thermal bubble powered microactuators // Microsyst. Technol. J. 1994. N 1. P. 51–58.
3. **Tsai J., Lin L.** Active microfluidic mixer and gas bubble filter driven by thermal bubble micropump // Sensors Actuators. 2002. V. A97/A98. P. 665–671.
4. **Скрипов В. П.** Метастабильные жидкости. М.: Наука, 1972.
5. **Carey V. P.** Liquid-vapor phase-change phenomena. L.: Hemisphere, 1992.
6. **Asai A.** Bubble dynamics in boiling under high heat flux pulse heating // Trans. ASME. J. Heat Transfer. 1991. V. 113. P. 973–978.
7. **Volmer M.** Kinetics der Phasenbildung. Dresden; Leipzig: Steinkopff, 1939.
8. **Скрипов В. П., Павлов П. А.** Взрывное вскипание жидкостей и флуктуационное зародышеобразование // Теплофизика высоких температур. 1970. Т. 8, № 4. С. 833–839.
9. **Iida Y., Okuyama K., Sakurai K.** Boiling nucleation on a very small film heater subjected to extremely rapid heating // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1994. V. 37. P. 2771–2780.
10. **Yin Z., Prosperetti A., Kim J.** Bubble growth on an impulsively powered microheater // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2004. V. 47. P. 1053–1067.
11. **Zhao Z., Glod S., Poulikakos D.** Pressure and power generation during explosive vaporization on a thin-film microheater // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2000. V. 43. P. 281–296.
12. **Yarin A. L., Weias D. A.** Impact of drops on solid surfaces: self-similar capillary waves, and splashing as a new type of kinematic discontinuity // J. Fluid Mech. 1995. V. 283. P. 141–173.
13. **Reid R. C.** The properties of gases and liquids. 4th ed. / R. C. Reid, J. M. Prausnitz, B. E. Poling. N. Y.: Mc Graw-Hill Book Comp., 1987.
14. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Физматгиз, 1963.
15. **Van Stralen S. J. D.** Boiling phenomena / S. J. D. Van Stralen, R. Cole. N. Y.: McGraw-Hill, 1979. V. 1.
16. **Blander M., Katz J. L.** Bubble nucleation in liquids // AIChE J. 1975. V. 21, N 5. P. 833–847.

*Поступила в редакцию 5/IV 2006 г.,
в окончательном варианте — 7/VI 2006 г.*