



Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Б. Г. Покусаев, Д. А. Некрасов, Э. А. Таиров, Моделирование вскипания недогретых воды и этанола в условиях импульсного тепловыделения в стенке, *ТВТ*, 2012, том 50, выпуск 1, 89–95

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.85

3 декабря 2024 г., 20:45:25



**ТЕПЛОМАССОБМЕН
И ФИЗИЧЕСКАЯ ГАЗОДИНАМИКА**

УДК 536.24

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВСКИПАНИЯ НЕДОГРЕТЫХ ВОДЫ И ЭТАНОЛА
В УСЛОВИЯХ ИМПУЛЬСНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ В СТЕНКЕ**

© 2012 г. Б. Г. Покусаев*, Д. А. Некрасов*, Э. А. Таиров**

*Московский государственный университет инженерной экологии

**Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск

Поступила в редакцию 14.03.2011 г.

Приведены результаты экспериментального исследования и математического моделирования процесса вскипания недогретой воды и спирта при импульсном тепловыделении в стенке нагревателя. Рассмотрены определяющие стадии вскипания: прогрев пристенной области, развитие паровой фазы, формирование волны давления. Показано, что, начиная с некоторых значений скорости разогрева поверхности (~3000 К/с) и недогрева (~20 К), механизмы вскипания воды и спирта различны.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросам обеспечения безопасной и устойчивой работы энергооборудования, реакторов разного типа, использующих жидкости в качестве теплоносителей, посвящено значительное число работ. Одной из основных теплофизических проблем здесь является изучение теплогидравлических процессов в каналах в условиях нестационарного тепловыделения в стенке. При этом вместе с локальным образованием паровой фазы, ее конденсацией, процессами “повторного смачивания” рядом авторов в опытах фиксируются пульсации давления, амплитуда которых может достигать значительных величин, опасных для устойчивой работы энергооборудования. Детальное изучение этих явлений с целью теоретического их описания несомненно является актуальной задачей.

Исследования явлений, сопровождающих процесс нестационарного вскипания теплоносителей, до сих пор проводились преимущественно на обогреваемых тонких проволочках. Некоторые результаты, полученные в последние годы по этому направлению, представлены в [1–6]. Здесь изучены различные стадии возникновения и роста парового пузырька [1, 2], формирования паровых полостей и пленок [3–5], режима так называемого третьего кризиса кипения [6]. Вопросам физического и теоретического моделирования процесса вскипания различных жидкостей с учетом формирования “самоподдерживающихся фронтов” испарения при нестационарном тепловыделении посвящены работы [7, 8]. Аналогичных исследований на поверхностях относительно большого размера в литературе существенно меньше (см., например, обзор [9] и работы [10, 11]). Связано это в том числе с большими экспериментальными трудностями при проведении таких исследований. Основное внимание в этих работах уделено изучению кризиса кипения, измерению коэффи-

циентов теплоотдачи, вопросам интенсификации теплообмена.

При исследовании теплогидравлических аспектов описанной проблемы в [12–14] основное внимание было уделено изучению закономерностей как динамики возникновения и роста паровой фазы, так и формирования волн давления. В случае вскипания воды методами математического моделирования были получены профили переднего фронта таких волн и рассчитана их максимальная амплитуда, удовлетворительно коррелирующая с экспериментом. Однако в новых экспериментах с этанолом [15] были обнаружены режимы вскипания, существенно отличные от вскипания воды.

В представленной работе приводятся новые результаты экспериментального и теоретического исследования вскипания недогретой воды и спирта при импульсном тепловыделении.

КРАТКИЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В опытах использовался трубчатый вертикально ориентированный нагреватель диаметром 10 мм и толщиной стенки 1 мм. Нагреватель выполнен из нержавеющей стали X18H10T. Электронагрев образца производился пропусканием выпрямленного трехфазного электрического тока импульсами длительностью 60–500 мс. При этом обеспечивалась скорость нарастания температуры греющей стенки $dT/dt = 100–6000$ К/с. Опыты проводились при давлении в объеме жидкости $P_0 = 0.1$ МПа и 0.3 МПа с начальными недогревами до температуры насыщения $\Delta T_{\text{нед}} = 10, 30, 40$ и 70 К. Использовались нагреватели, различающиеся размерами шероховатостей на смачиваемой поверхности. Радиусы характерных микровпадин имели размеры от $r_c = 3.5$ мкм до $r_c = 135$ мкм. Ди-

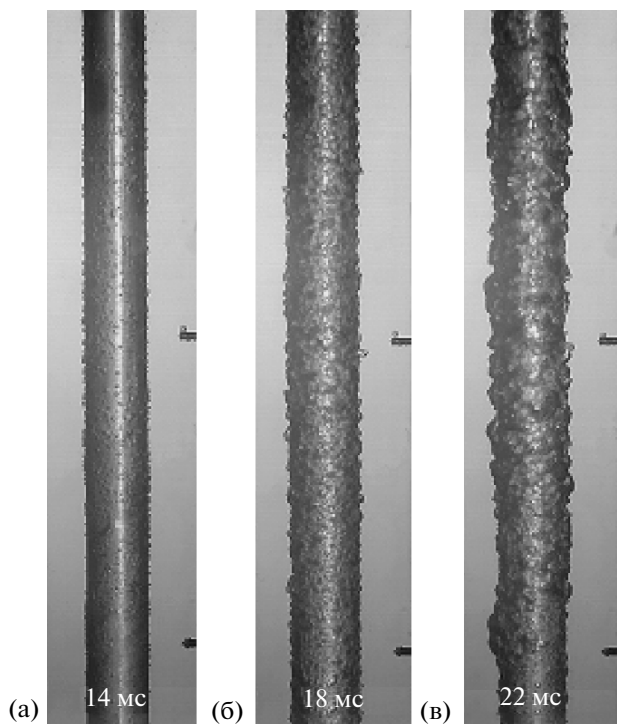


Рис. 1. Характерные видеокадры процесса вскипания недогретой воды при $P_0 = 0.3$ МПа, $\Delta T_{\text{нед}} = 10$ К, $dT/d\tau = 2500$ К/с.

динамика парообразования и развития паровой полости исследовалась с помощью цифровой видеокамеры при скорости 3000 кадров в секунду. Дополнительные датчики позволяли измерять пульсации давления в жидкости, а также температуры нагревателя и жидкости. Более подробно экспериментальная установка и методики измерения описаны в [13].

Анализ экспериментальных данных визуализации процесса вскипания воды ранее [16] позволил выделить несколько характерных стадий: прогрев пристенной области, зарождение и рост паровых пузырьков на поверхности нагревателя, образова-

ние и рост паровой полости вокруг нагревателя, конденсация пара, повторное смачивание поверхности нагрева. После чего процессы повторяются до полного остывания греющей трубки. Характерные кадры описанных первых трех стадий этого процесса показаны на (рис. 1). Указанные на рисунке времена отсчитываются от момента начала наброса нагрузки. Во всех случаях в этих экспериментах фиксировалось формирование волн давления в канале.

В опытах с этанолом, наряду с режимами пузырькового кипения, наблюдаемыми для слабых перегревов стенки, выявлены режимы с характерными признаками движущегося от первоначально образующегося парового пузырька фронта испарения, ранее наблюдаемого в опытах на проволочках [1]. Так, в случае малых мощностей наброса энерговыделения в стенке и, соответственно, низких темпов нарастания температуры стенки сначала возникал растущий одиночный пузырек (рис. 2а) на границе которого развивался фронт испарения (рис. 2б–2е). Далее, по мере нарастания температуры стенки, паровая полость покрывала всю поверхность нагревателя.

При недогревах ($\Delta T_{\text{нед}} \leq 10$ К) паровая полость имеет больший размер и охватывает нагреватель по всей его высоте (рис. 3). В отличие от воды, в опытах с этанолом на поверхности нагревателя всегда активизируется гораздо меньшее количество паровых пузырьков, расположенных на различных расстояниях друг от друга (рис. 3а). По мере роста пузырьков в их основании формируется тонкая паровая пленка (рис. 3б), которая в дальнейшем распространяется вокруг продолжающего расти пузыря. Смыкание паровых пленок между соседними пузырьками приводит к образованию сплошной паровой полости вокруг нагревателя (рис. 3в).

Общий объем паровой полости зависит от величины недогрева жидкости. При $\Delta T_{\text{нед}}$ порядка 30 К вследствие одновременно происходящей интенсивной конденсации пространственно неодн-

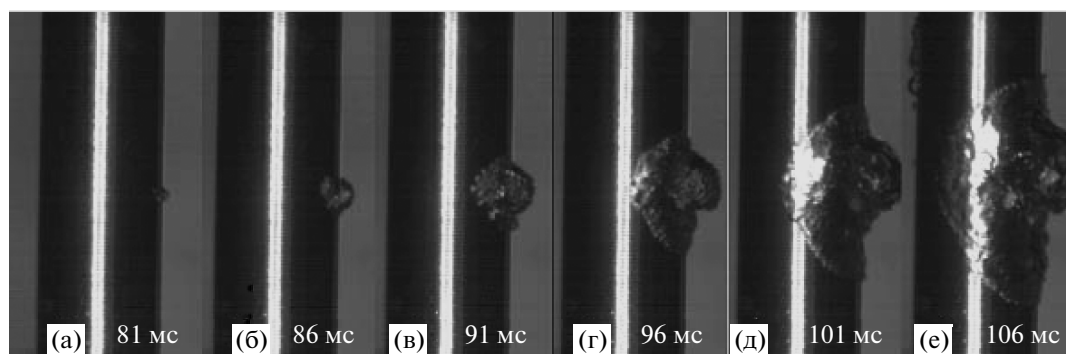


Рис. 2. Участок поверхности трубки при вскипании спирта и процесс развития паровой полости при $P_0 = 0.1$ МПа, $\Delta T_{\text{нед}} = 30$ К, $dT/d\tau = 700$ К/с. Начало подачи импульса нагрева в момент времени $\tau = 0$ мс.

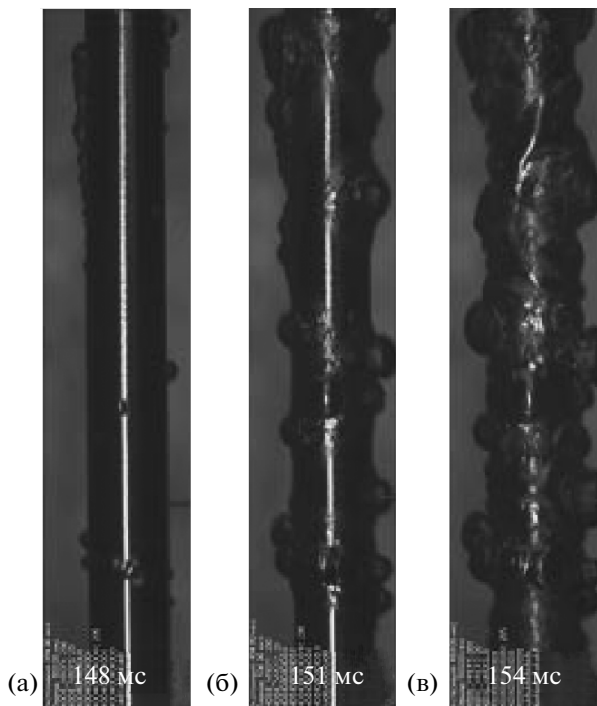


Рис. 3. Вскипание спирта при $P_0 = 0.1$ МПа, $\Delta T_{\text{нед}} = 30$ К, $dT/d\tau = 3000$ К/с. Начало подачи импульса нагрева в момент времени $\tau = 0$ мс.

родная полость быстро разрушается. Описанные выше сценарии реализуются при малых темпах разогрева стенки (500–1000 К/с). При больших импульсных тепловыделениях с темпами разогрева стенки более 1500 К/с и малых недогревах жидкости образуются интенсивные фронты испарения от редких центров активации пузырьков. Распространение фронта испарения вдоль образующей и осевого направления трубки ведет к быстрому запариванию всей поверхности нагревателя.

Дальнейшее увеличение скорости разогрева приводит к чисто пленочному механизму вскипания спирта с минимальным количеством начальных центров парообразования, причем пленка является устойчивой. Сравнение экспериментальных результатов для воды и спирта (рис. 4) показало, что увеличение скорости разогрева поверхности для воды приводит к увеличению количества паровых пузырьков и уменьшению их среднего размера (рис. 4а), тогда как для спирта наблюдается обратная картина, приводящая к чисто пленочному режиму вскипания (рис. 4б). Для этанола получены более высокие (по сравнению с водой) значения времен ожидания τ_{ind} (время от начала разогрева стенки до образования первых паровых пузырьков), что свидетельствует о достижении больших перегревов стенки в условиях нестационарного возрастания ее температуры перед началом вскипания. Так, при условиях экспериментов ($r_c = 135$ мкм, $P_0 = 0.1$ МПа, $\Delta T_{\text{нед}} = 10$ К, $dT/d\tau = 2800$ К/с) для воды $\tau_{\text{ind}} = 15$ мс, а для этанола $\tau_{\text{ind}} = 35$ мс.

Результаты анализа экспериментов также показали, что, в отличие от воды, интенсивность возникающих волн давления при вскипании спирта заметно ниже (рис. 5). Так, если для воды отношение P_{max}/P_0 составляло порядка 3–5, то для спирта оно не превышает 1.2–1.5.

Кроме того, в опытах со спиртом сопоставление динамики амплитуды давления показало также, что амплитуда первой пульсации в некоторых случаях не является максимальной. Выявленные особенности теплогидравлических режимов вскипания спирта потребовали существенной модернизации ранее разработанных для воды [16, 17] расчетных моделей.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Прогрев пристенной области. Для случая вскипания недогретой воды математическая и расчет-

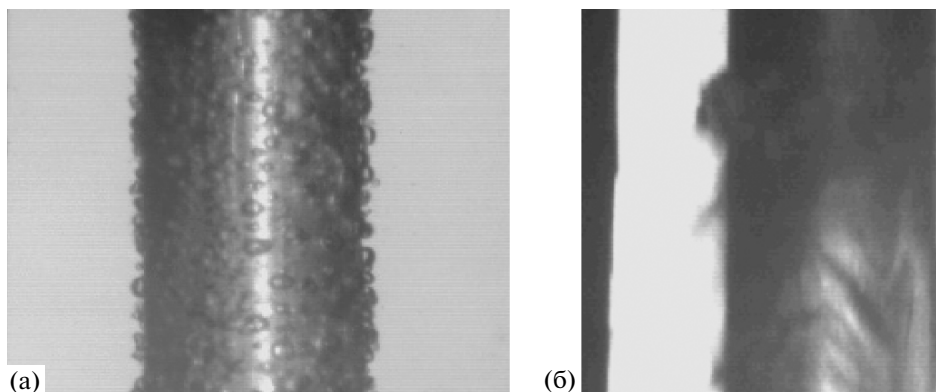


Рис. 4. Характерные фотографии поверхности нагревателя при вскипании воды (а) и спирта (б) в одинаковый момент времени; $dT/d\tau = 4500$ К/с.

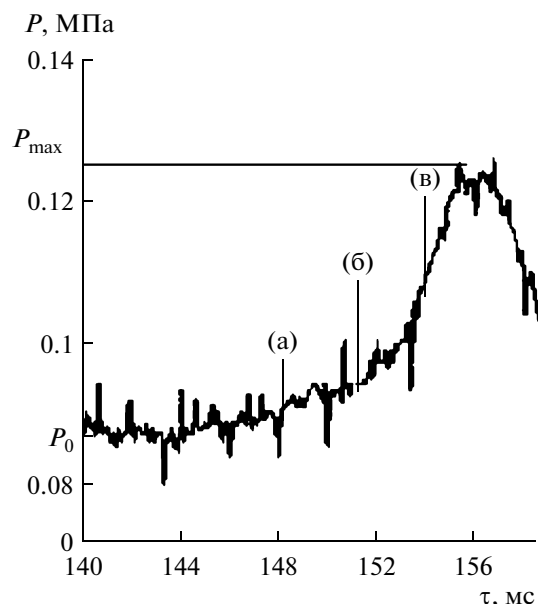


Рис. 5. Изменение давления при вскипании спирта; $P_0 = 0.1$ МПа, $\Delta T_{\text{нед}} = 30$ К, $dT/d\tau = 3000$ К/с; (а)–(в) соответствуют рис. 3.

ная модели также подробно описаны в работах [16, 17]. Моделирование первой стадии вскипания спирта (прогрев пристенной области) по физической и математической постановкам полностью совпадает с аналогичными моделями для воды. Здесь используются соответствующая цилиндрической постановке расчетная схема и уравнение теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями. Решения получены аналитически с помощью метода Лапласа и численно методом конечных разностей. Рассчитаны профили температур в нагревателе и жидкости при различных начальных условиях. Модель прогрева позволяет также определять толщины перегретого слоя на момент начала парообразования (рис. 6). Для этого необходимо задать условие перегрева поверхности, при котором начинается рост первых пузырьков пара. Как известно, необходимый перегрев поверхности для начала роста первых пузырьков зависит от шероховатости. Связь необходимого перегрева с геометрией впадины находится из условия теплового равновесия зародыша в перегретом слое жидкости и определяется по формуле

$$T_w = \frac{2\sigma T_s}{r\rho_v R_c} + T_s,$$

где R_c – радиус устья впадины. На внешней границе перегретого слоя температура принималась равной T_s .

В зависимости от начальных условий (давление, недогрев, качество поверхности) величина

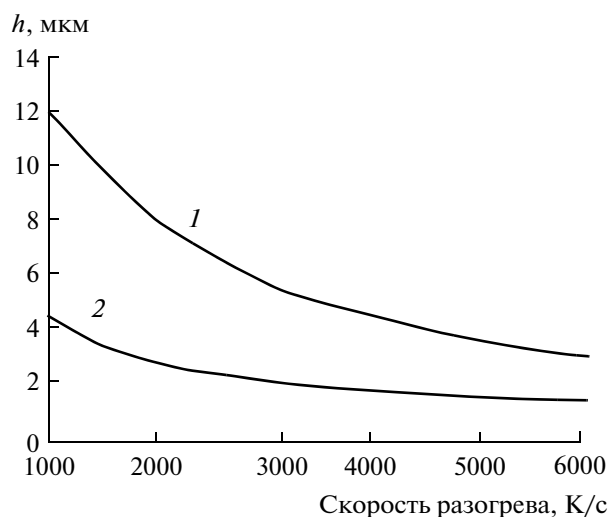


Рис. 6. Изменение толщин перегретого слоя: 1 – спирт, 2 – вода, $P_0 = 0.1$ МПа, $\Delta T_{\text{нед}} = 10$ К.

необходимого перегрева составляла для воды ~ 10 – 12°C , для спирта ~ 20 – 25°C .

Расчеты показали, что с увеличением недогрева в обоих случаях толщина слоя резко снижается. Особенности стадии прогрева для спирта явились несколько большие толщины перегретого слоя на момент начала парообразования. На рис. 7 приведено также сопоставление расчетных и экспериментальных [15] значений времени ожидания до начала роста паровых пузырьков в зависимости от скорости нарастания температуры стенки.

Задача о росте и развитии пузырька пара на поверхности греющей трубки. При моделировании процесса роста пузырька как для воды, так и для спирта используется микрослойная модель, впервые предложенная в работе [18] и получившая дальнейшее развитие в [19, 20]. Форма парового пузырька принималась полусферической. Целями расчета здесь являются определение зависимостей скорости роста пузырьков, объемов перегретого микрослоя, времен покрытия всей поверхности нагрева от темпа тепловыделения, а также расчет поля температур в микрослое с учетом образования сухого пятна под пузырьками. В процессе расчета в модели учитываются известные зависимости свойств жидкости и пара (воды и спирта) от температуры и давления. Система уравнений, алгоритм их решения, а также подробный анализ результатов расчетов для воды представлены в работе [17].

Основным отличием этой стадии для спирта является то, что при средних скоростях разогрева (1000–3000 К/с) перегретый микрослой под пузырьками, ввиду их существенно меньшего количества по сравнению с водой, успевает полностью испариться до момента их слияния. При этом, как отмечалось выше, их рост в радиальном направле-

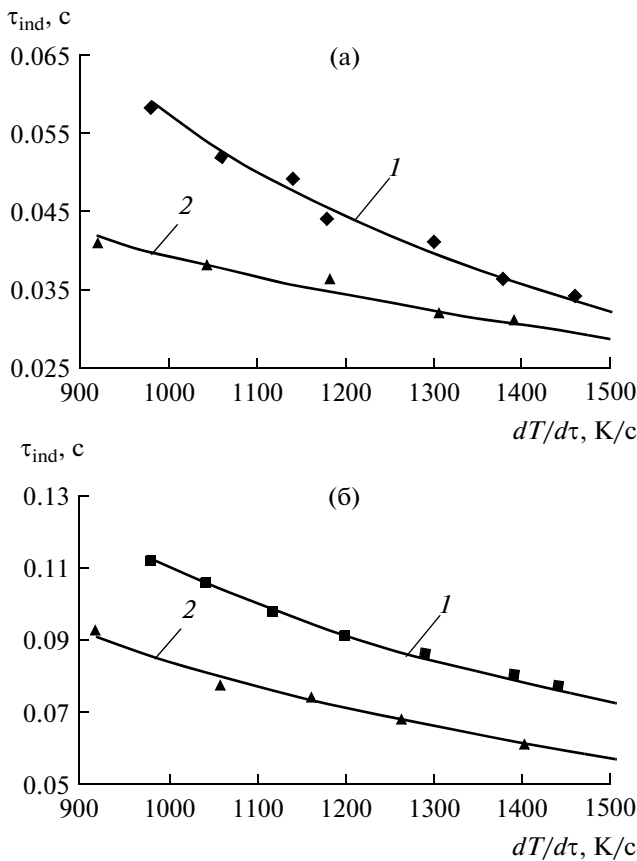


Рис. 7. Расчетные и экспериментальные значения продолжительности периода ожидания до начала роста паровых пузырьков для воды (а) и спирта (б) при начальном давлении $P_0 = 0.1$ МПа: линии – расчет, точки – эксперимент; 1 – $\Delta T_{нед} = 40$ К, 2 – $\Delta T_{нед} = 10$ К.

нии практически прекращается и продолжается только вдоль вертикальной оси нагревателя, что соответствует переходному режиму от пузырьков к пленке. Поэтому, в отличие от воды, третья стадия (пленочное испарение оставшегося перегретого микрослоя) в этих условиях отсутствует.

Пленочная стадия. За начало процесса испарения микрослоя для воды принимался момент, когда вся поверхность нагревателя покрыта паровыми пузырьками. При моделировании процесса роста паровой полости и испарения микрослоя предполагается, что продольным движением (всплытием) полости можно пренебречь. Это предположение позволяет вести расчет только в поперечном направлении (по радиусу), что приводит к одномерной сопряженной задаче в цилиндрической системе координат, схема которой показана на рис. 8.

Основной особенностью моделирования пленочной стадии вскипания является то, что для воды она всегда следует после образования и слияния паровых пузырей, а для спирта при скорости разогрева поверхности более 6000 К/с непосред-

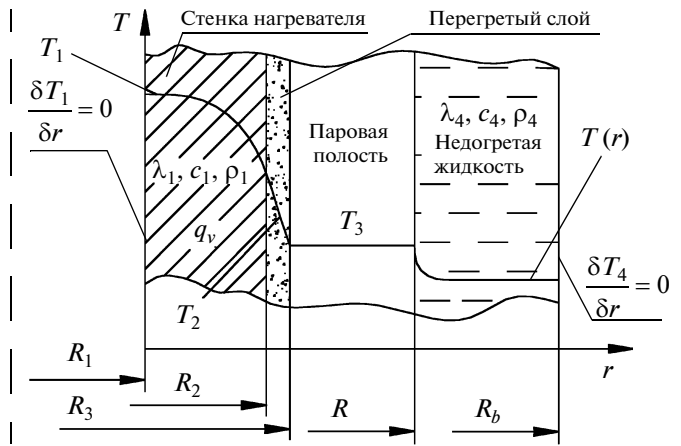


Рис. 8. Универсальная расчетная схема пленочной стадии вскипания.

ственно следует за стадией прогрева пристенной области, т.е. сразу реализуется пленочный режим вскипания. Поэтому для расширения возможностей программного комплекса расчетная схема (рис. 8) и система уравнений [16, 17] были модифицированы, что позволяет проводить в том числе и расчеты для пленочного режима вскипания спирта. Ниже представлена обновленная система уравнений и алгоритм ее решения:

– уравнение теплопроводности для нагревателя

$$(c_p \rho)_1 \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_1 r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + q_v, \quad (1)$$

где q_v – объемная плотность тепловыделения, Вт/м³;

– уравнение теплопроводности для микрослоя

$$(c_p \rho)_2 \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_2 r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right); \quad (2)$$

– уравнение энергии для жидкости

$$(c_p \rho)_4 \left(\frac{\partial T_4}{\partial \tau} + u \frac{\partial T_4}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_4 r \frac{\partial T_4}{\partial r} \right), \quad (3)$$

где $u = u_R R/r$ – скорость движения жидкости, $u_R = dR/d\tau$ – скорость движения внешней границы паровой полости;

– уравнение баланса массы пара в паровой полости

$$\frac{d(\rho_3 V)}{d\tau} = \frac{1}{L} (q_{R_3} S_{R_3} - q_R S_R); \quad (4)$$

– уравнение энергии для пара в полости

$$\frac{1}{\gamma - 1} V \frac{dp_3}{d\tau} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} p_3 \frac{dV}{d\tau} = S_3 q_3 - S_4 q_4; \quad (5)$$

– уравнение состояния для пара

$$p_3 = \rho_3 B T_3,$$

где B – газовая постоянная пара, Дж/кг К;

– уравнение Клапейрона–Клаузиуса

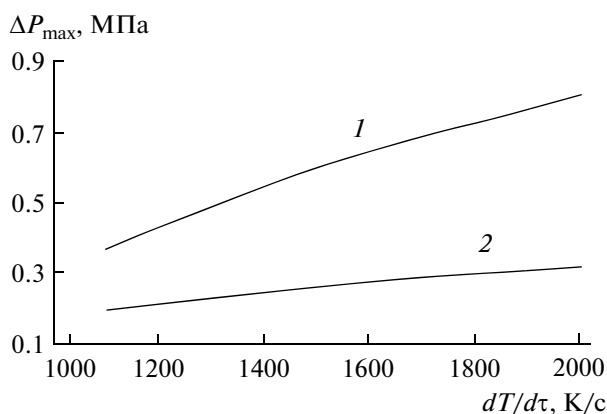


Рис. 9. Максимальные амплитуды давления: 1 – вода, 2 – спирт; $P_0 = 0.1$ МПа, $\Delta T_{\text{нед}} = 10$ К.

$$\frac{dT_3}{dp} = \frac{T_3}{\rho_3 L}, \quad (6)$$

где L – теплота фазового перехода, Дж/кг;

– уравнение Рэлея, описывающее эволюцию цилиндрической паровой полости:

$$\left(u_R \frac{dR}{d\tau} + R \frac{du_R}{d\tau} \right) \ln \frac{R_b}{R} + \frac{1}{2} u_R^2 \left(\frac{R^2}{R_b^2} - 1 \right) = \frac{1}{\rho_L} \left(p_v - p_\infty - 2 \frac{\mu u_R}{R} - \frac{\sigma}{R} \right); \quad (7)$$

– начальные условия:

$$\text{при } R_1 < r < R_2 \quad T_1 = f_1(r),$$

$$\text{при } R_2 < r < R_3 \quad T_2 = f_2(r),$$

$$\text{при } R < r < R_b \quad T_4 = f_3(r),$$

– граничные условия:

$$\text{при } r = R_1 \quad \frac{\partial T_1}{\partial r} = 0;$$

$$\text{при } r = R_2 \quad T_1 = T_2, \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r};$$

$$\text{при } r = R_3 \quad T_2 = T_3;$$

$$\text{при } r = R \quad T_3 = T_4;$$

$$\text{при } r = R_b \quad \frac{\partial T_4}{\partial r} = 0.$$

В случае пузырькового режима вскипания воды и спирта перегретый микрослой образуется в результате слияния паровых пузырьков, отделяющих его от основного массива недогретой жидкости. В условиях пленочного режима для спирта, поскольку пузырьковая стадия отсутствует, начинает испаряться микрослой, образовавшийся уже на стадии прогрева пристенной области. Здесь следует отметить, что осреднение толщины оставшегося под пузырьками перегретого микрослоя как для воды, так и для спирта проводилось “геометрически” по объему с расчетом эквивалентной толщины плоского слоя, за исключением площа-

ди сухого пятна. Это привело к несколько завышенному значению объема слоя (по оценкам авторов ~3–5%), что в дальнейшем компенсируется в расчетах.

На каждом шаге по времени решаются уравнения теплопроводности (1), (2) для составной системы “стенка нагревателя–недогретая жидкость” и уравнение энергии для недогретой воды (3). Результатами этих решений являются величины плотностей тепловых потоков q_{R_3} и q_R соответственно на поверхности испаряющегося микрослоя при R_3 и на поверхности недогретой воды с радиусом R , на которой происходит конденсация пара. Зная эти плотности тепловых потоков и используя уравнение сохранения массы (4), можно определить массу пара, образующегося при испарении из микрослоя перегретой воды, и массу сконденсировавшегося пара. Затем вычисляется результирующая масса пара, поступившего в полость, и при сложении ее со значением на предыдущем шаге интегрирования по времени рассчитывается ее новое значение. Далее итерационным методом последовательных приближений для пара в полости решаются уравнения энергии (5), Клапейрона–Клаузиуса (6), Рэлея (7) и определяются новые значения температуры T_3 , давления P_3 , радиуса внешней поверхности паровой полости R , скорость ее движения u_R .

Моделирование вскипания спирта показало, что независимо от механизма вскипания все стадии протекают несколько медленнее (с характерными временами ~40–120 мс), чем в аналогичных условиях на воде (~20–80 мс). При этом, если вскипание происходит в “пузырьковом” или “пузырьково-пленочном” режимах, описанные закономерности для воды справедливы и для спирта. Основным же принципиальным отличием, как отмечалось выше, является то, что уровни максимально достижимых значений давления при вскипании спирта существенно ниже. Соответствующие расчетные кривые в зависимости от скорости разогрева приведены на рис. 9.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам анализа новых экспериментальных данных по вскипанию спирта модифицированы физическая и расчетная модели вскипания недогретых жидкостей, которые в настоящий момент позволяют проводить расчеты амплитуды волн давления, возникающих в условиях импульсного тепловыделения в стенке греющей трубки.

Показано, что при высоких скоростях тепловыделения (~6000 К/с) вскипание спирта происходит в чисто пленочном режиме, минуя пузырьковую стадию. Максимальные амплитуды возникающих волн давления во всех случаях вскипания спирта существенно ниже, чем в аналогичных

условиях вскипания воды. Поскольку при низких темпах тепловыделения (<500 К/с) характерные времена процесса прогрева пристенной области составляют сотни миллисекунд, в расчетной модели необходимо учитывать механизм конвекции.

Полученные результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными и позволяют применять модель для описания такого рода процессов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 11-08-00368-а, № 09-08-00201-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aktershev S.P., Ovchinnikov V.V.* Vapor Bubble Growth at the Surface of Flat and Cylindrical Heaters // *J. Eng. Thermophys.* 2008. V. 17. № 3. P. 227.
2. *Avksentyuk B.P., Ovchinnikov V.V.* Explosive Boiling and Transient Regimes // *J. Eng. Thermophys.* 2003. V. 12. № 2. P. 99.
3. *Hiroyasu Ohtake, Yasuo Koizumi.* Study on Propagative of a Vapor Film in Film Boiling (Mechanism of Vapor-Film Collapse at Wall Temperature above the Thermodynamic Limit of Liquid Superheat) // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2004. V. 47. P. 1965.
4. *Pavlenko A.N., Surtaev A.S., Koverda V.P., Skokov V.N., Reshetnikov A.V., Vinogradov A.V.* Dynamics of Transition Processes and Structure Formation in Critical Heat-Mass Transfer Regimes During Liquid Boiling and Cavitation // *J. Eng. Thermophys.* 2009. T. 18. № 1. С. 20.
5. *Григорьев В.С., Жилин В.Г., Зейгарник Ю.А. и др.* Поведение паровой пленки на сильно перегретой поверхности, погруженной в недогретую воду // *ТВТ.* 2005. Т. 43. № 1. С. 100.
6. *Авксентюк Б.П., Овчинников В.В.* Третий кризис теплоотдачи при недогреве // *Теплофизика и аэромеханика.* 2008. Т. 15. № 2. С. 281.
7. *Avksentyuk B.P.* Nonequilibrium Model of an Evaporation Front // *J. Eng. Thermophys.* 1995. V. 5. P. 1.
8. *Павленко А.Н., Лель В.В.* Приближенная расчетная модель самоподдерживающегося фронта испарения // *Теплофизика и аэромеханика.* 1999. Т. 6. № 1. С. 111.
9. *Ковалев С.А., Леонтьев А.И.* Достижения российских ученых в области исследования теплообмена при кипении (Обзор) // *ТВТ.* 1999. Т. 37. № 6. С. 989.
10. *Жилин В.Г., Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П. и др.* Экспериментальное исследование характеристик взрывного вскипания недогретой воды на горячей поверхности при смене режимов кипения // *ТВТ.* 2009. Т. 47. № 6. С. 891.
11. *Павленко А.Н., Суртаев А.С., Мацех А.М.* Переходные процессы в стекающих пленках жидкости при нестационарном тепловыделении // *ТВТ.* 2007. Т. 45. № 6. С. 905.
12. *Zhao Z., Gold S., Poulikakos D.* Pressure and Power Generation During Explosive Vaporization on a Thin-Film Microheater // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2000. V. 43. P. 281.
13. *Покусаев Б.Г., Тауров Э.А., Казенин Д.А. и др.* Теплогидравлические процессы в пористых структурах при импульсном тепловыделении на стенке // *ТВТ.* 2002. Т. 40. № 2. С. 306.
14. *Покусаев Б.Г., Тауров Э.А., Некрасов Д.А.* Моделирование вскипания недогретых воды и этанола в условиях наброса тепловой мощности // *Тез. докл. V Рос. нац. конф. по теплообмену.* Т. 4. М.: Изд-во МЭИ, 2010. С. 146.
15. *Тауров Э.А., Левин А.А., Гулин А.М.* Динамика запаривания трубчатого нагревателя в условиях наброса тепловой мощности // *Тез. докл. V Рос. нац. конф. по теплообмену.* Т. 4. М.: Изд-во МЭИ, 2010. С. 173.
16. *Покусаев Б.Г., Некрасов А.К., Некрасов Д.А.* Математическое моделирование переходных процессов в кольцевом канале с зернистым слоем при вскипании недогретой воды. Прогрев пристенной области // *ТВТ.* 2007. Т. 45. № 3. С. 400.
17. *Покусаев Б.Г., Некрасов Д.А.* Математическое моделирование переходных процессов в кольцевом канале с зернистым слоем при вскипании недогретой воды. Формирование волны давления // *ТВТ.* 2008. Т. 46. № 3. С. 406.
18. *Cooper M.G., Lloyd A.G.P.* The Microlayer in Nucleate Pool Boiling // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 1969. V. 12. P. 895.
19. *Olander R.R., Watts R.G.* An Analytical Expression of Microlayer Thickness in Nucleate Boiling // *Trans. ASME C.* 1969. V. 91. № 1. P. 178.
20. *Лабунцов Д.А., Ягов В.В.* К вопросу о скорости роста паровых пузырей при кипении // *Тр. МЭИ.* 1975. Вып. 268. С. 3.