

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА ЧЕРЕЗ ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА ФАЗ ПАР – ЖИДКОСТЬ ПРИ ПЛЕНОЧНОМ КИПЕНИИ НА ОБРАЩЕННОЙ ВНИЗ ТОРЦЕВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРА

Ю.П. Ивочкин¹, К.Г. Кубриков¹, Ю.Ю. Пузина²

¹ Объединенный Институт Высоких Температур РАН, Москва, Россия

² Московский Энергетический Институт, Москва, Россия

Представлены результаты исследований характеристик пленочного кипения на плоских обращенных вниз нагретых поверхностях в условиях, когда вода недогрета до температуры насыщения. Описаны экспериментальная установка и методика измерений давления и температуры. Определена форма межфазной поверхности пар – жидкость вблизи плоского нагревателя, опускаемого в холодную воду. Измерено статическое давление внутри парового слоя. Показано, что значение этого давления, в пределах погрешности эксперимента, определяется глубиной погружения исследовательского образца в воду (т.е. гидростатическим давлением). Установлено влияние концентрации растворенных газов и температуры нагретой жидкости на стабильность паровой пленки. Выполнены, с учетом влияния глубины погружения нагревателя и теплового потока, расчеты по определению формы межфазной поверхности со стороны цилиндрической части нагревателя с плоским торцевым окончанием. Сделаны оценки по постановке граничных условий при формулировании математического описания процессов тепломассопереноса под плоской поверхностью.

Ключевые слова

Паровой взрыв, пленочное кипение, эксперимент, неравновесные эффекты, молекулярно-кинетический анализ.

Условные обозначения

δ – толщина пленки, м; ρ – плотность, кг/м³; b – капиллярная постоянная, м; h – вертикальное расстояние, м; j – массовый поток, кг/(м²·с); K – кривизна поверхности, 1/м; L – теплота парообразования, Дж/кг; P – давление, Па; q – плотность теплового потока, Вт/м²; R – газовая постоянная, Дж/(кг·К); R_i – радиус, м; r – радиальная координата, м; T – температура, К; z – вертикальная координата, м.

Индексы: b – параметры на удалении; s – параметры на линии насыщения; w – параметры нагревателя; θ – на оси z ; I – параметры межфазной поверхности пар-жидкость; $'$ – параметры жидкости; $''$ – параметры пара.

Введение

Многие расчетные теоретические модели теплообмена и физической гидродинамики основаны на задании формы межфазной поверхности: для пузырей – сферическая, для пленок – цилиндрическая. Однако такой идеализированный подход редко реализуется на практике, особенно в условиях искажающего влияния гравитационных сил. Поэтому все больше внимания исследователей уделяется изучению процессов переноса на межфазной поверхности не только пузырей, но также паровых пленок и сложных паровых конгломератов. При этом особый интерес вызывает форма межфазной поверхности жидкость – пар, а также влияние на нее динамических процессов в системе, причем на практике, во многих важных случаях межфазная поверхность является осесимметричной.

Продолжая серию экспериментов по исследованию поведения паровой пленки на сильно перегретых поверхностях [1, 2], а также цикл работ, посвященных определению формы межфазной поверхности в существенно неравновесных условиях [3, 4], основное внимание в представленной работе уделяется степени влияния неравновесных эффектов вблизи межфазной поверхности на процессы теплопереноса при пленочном кипении жидкости. Также в докладе описан расчетный и экспериментальный материал, касающийся формы паровой пленки и пульсаций температуры и давления при пленочном кипении.

Вопрос постановки граничных условий на проницаемой межфазной поверхности рассматривается в [5]. При описании испарения воды с криволинейной поверхности раздела фаз при наличии градиента температуры вдоль нее необходимо учитывать при определенных условиях перенос энергии конвекцией Марангони. Таким образом, авторы формулируют условие совместности по потоку энергии на границе раздела фаз пар – жидкость с учетом конвективного переноса энергии. Изменение теплового потока на границе раздела фаз приравнивается к сумме слагаемых: удельный массовый поток испарения на теплоту парообразования; слагаемое, описывающее влияние испарения на тепловой поток; слагаемое, обусловленное изменением вязких напряжений – сопротивление трения слоев по разные стороны границе раздела фаз; сток тепла, обусловленный конвекцией Марангони. В правой части первые два слагаемых "тепловые", также как и левая часть. Вторые два слагаемых обусловлены движением внутри областей сплошных сред, а также перемещением границы раздела фаз. Тепло связывается с динамическими факторами, т.е. со скоростью среды, но не напрямую с давлением.

Работа [6] посвящена исследованию распаду капель расплава, попавших в холодную жидкость. Для описания поведения паровой пленки авторы используют модель обычного пузыря в объеме жидкости без влияния нагревателя, как при сонолюминесценции. В модели с учетом неравновесных эффектов [7] правая часть уравнения, описывающего движение межфазной поверхности пар – жидкость, не содержит испарение, т.к. принимается, что все процессы на межфазной поверхности закончились за время кинетической релаксации и на динамику паровой пленки влияние не оказывают. Разность давлений в жидкости определяется в том числе давлением пара, которое связано с давлением насыщения при температуре межфазной поверхности и тепловым потоком на границе раздела фаз пар – жидкость. Последняя величина является переменной во времени и зависит от текущего радиуса пленки. Вместо этого авторы статьи используют изменение массы, которое похожим образом меняется при росте паровой пленки. Это сходство, по всей видимости, и обуславливает согласие с экспериментом. Авторы отмечают отличие расчетной температуры межфазной поверхности от температуры насыщения при термодинамическом равновесии, но объясняют это слишком простым уравнением для ее вычисления.

Экспериментальная установка и методика измерений

Упрощенная схема экспериментальной установки и чертеж рабочего участка для исследования пленочного и переходного кипения на плоских нагревателях, погружаемых в воду (вода недогрета до температуры насыщения) показаны на рис.1. и рис.2, соответственно. Эксперимент происходил следующим образом. В исходном состоянии рабочий участок 12 (рис.1) нагревался на воздухе или в атмосфере аргона, причем максимальная температура нагрева не превышала 800 °С. Затем электрический нагреватель 6 отключался, а рабочий участок (латунный цилиндр с плоским торцевым окончанием) с помощью специального координатного устройства со скоростью несколько десятых долей миллиметра в секунду приближался (опускался) к плоской

водной поверхности. В опытах исследовались явления, сопровождающие образование паровой пленки при медленном погружении нагретого тела. Стеклянная ванна с дистиллированной водой *14* была размещена в другой стеклянной ванне *13*, заполненной инертным газом – аргоном. Узел установки *9*, на котором крепился рабочий участок, был изготовлен на основе прецизионного координатного устройства от горизонтального микроскопа типа МГ. Это позволило погружать нагреватель в воду с шагом 2 мкм и улучшить плавность его хода, т.е. существенным образом уменьшить вибрации, вызванные перемещением координатного устройства.

Отличительной чертой проведенных опытов было измерение давления в самой паровой пленке, как в условиях пленочного, так и переходного кипения. Для этого был разработан рабочий участок (рис.2), в котором исследуемая паровая полость с помощью импульсной линии соединена с датчиком давления. Нагреваемый элемент рабочего участка выполнен в форме цилиндра диаметром 10 мм с плоским торцевым окончанием. На изготовленном из латуни Л62 цилиндре расположен спиральный нагреватель. В качестве материала нагревательного элемента были использованы два не соприкасающихся друг с другом провода (хромель, алюмель), которые были покрыты высокотемпературным изолятором и размещались в капилляре из нержавеющей стали. Для внешней теплоизоляции нагревателя использовался высокотемпературный цемент марки ВГКЦ-75-0.5. Описанная конструкция позволила повысить надежность работы опытного участка в условиях повышенной влажности и предотвратить возможность электрического замыкания спирали на горячий цилиндрический сердечник нагревателя.

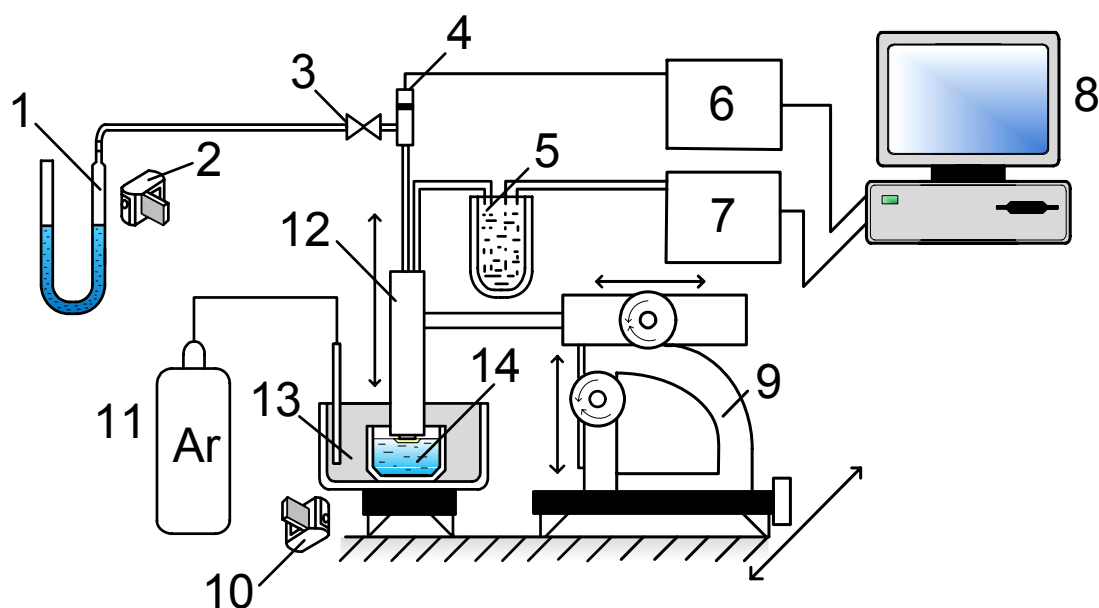


Рис.1. Упрощенная схема экспериментальной установки. *1* – манометр; *2* – видеокамера; *3* – вентиль; *4* – пьезоэлектрический датчик давления; *5* – сосуд Дюара; *6* – усилитель зарядов; *7* – термопарный усилитель; *8* – компьютер (системный блок фирмы *National Instruments*); *9* – координатное устройство; *10* – видеокамера; *11* – баллон с аргоном; *12* – рабочий участок; *13* – прозрачный сосуд с аргоном; *14* – прозрачный сосуд с водой

Визуальное наблюдение исследуемых явлений осуществлялось с использованием микроскопов. Видеосъемка пленочного и переходного кипения проводилась с помощью цифровых видеокамер *Cannon* (тип *MV500*) и *Redlike* (тип *MotionScope1000*). Скоростная видеокамера *MotionScope1000* позволяет снимать процесс с максимальной скоростью 1000 кадр/с и минимальным временем экспозиции 1/8000 с.

Опыты в открытом сосуде (т.е. при атмосферном давлении) были выполнены при начальных температурах воды и нагретой поверхности 20 и 600 °С, соответственно. Характерное значение величины удельного теплового потока q составляло 4×10^5 Вт/м². Температуры латунного цилиндра на различных его участках, а также значение теплового потока определялись по показаниям хромель—алюмелевых и хромель—копелевых термопар, соединенных по трехпроводной схеме, что позволило существенным образом повысить точность тепловых измерений. Места расположения термопар показаны на рис.2, причем нижняя термопара была заложена на расстоянии ~ 0.5 мм от торца нагревателя. В центре цилиндра вдоль всей его длины (~120 мм) расположено сквозное отверстие диаметром 2 мм, предназначенное для отбора давления с торцевой поверхности при пленочном кипении. Это отверстие связывает паровую полость с датчиками давления. В качестве измерителя квазистационарного давления при спокойном пленочном кипении использовался U – образный манометр, а для фиксации перепада давления, ввиду малости его значения (~ мм водяного столба), использовались методы, основанные на регистрации перемещения мениска наклонного манометра с помощью либо катетометра, либо цифровой видеокамеры, с последующей обработкой видеоматериала на компьютере. Исследования быстрых нестационарных процессов осуществлялись, с использованием программного продукта *Labview*, пьезоэлектрическим датчиком давления фирмы *Kistler*, работающим совместно с усилителем зарядов и измерительной аппаратурой фирмы *National Instruments*.

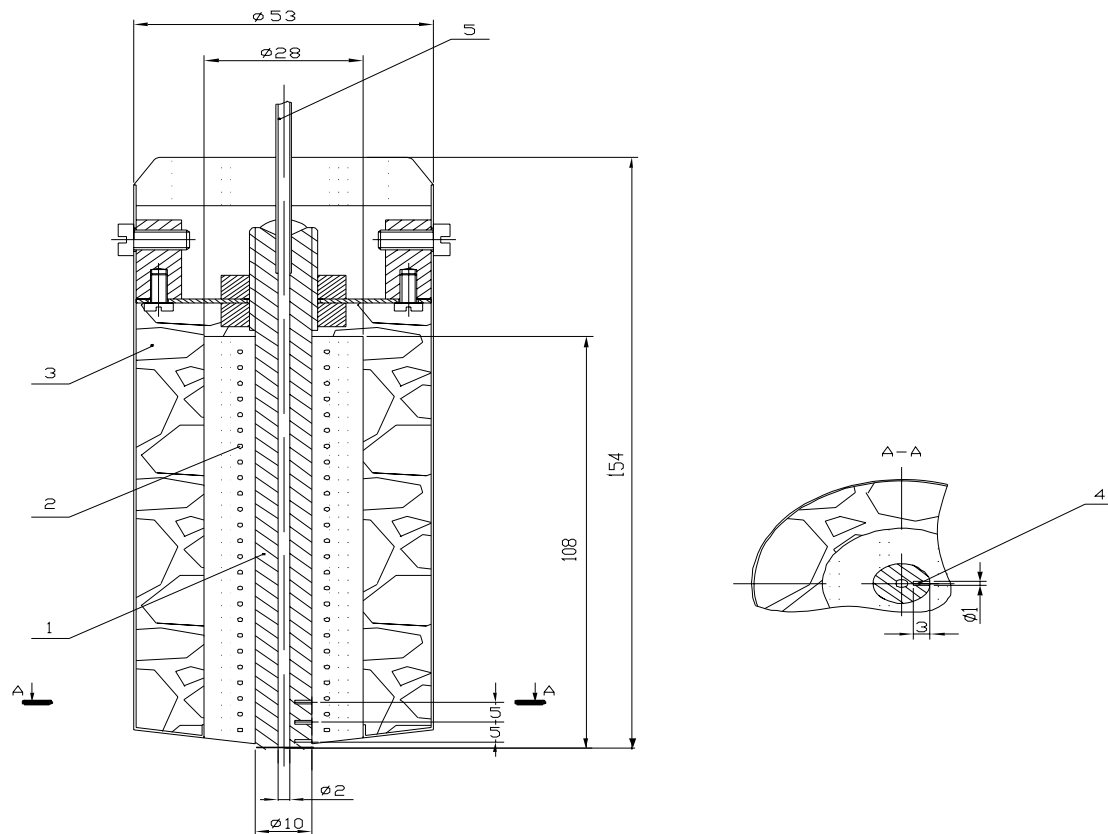


Рис.2. Чертеж рабочего участка. 1 – нагреваемый элемент; 2 – спиральный нагреватель; 3 – теплоизолятор; 4 – отверстия для термопар; 5 – трубка из нержавеющей стали.

На начальном этапе экспериментальной работы, помимо исследования формы межфазной поверхности, основное внимание было уделено изучению влияния различного рода факторов на стабильность паровой пленки. Некоторые результаты из этих исследований представлены ниже.

Результаты экспериментальных исследований

Проведенные видеонаблюдения, подкрепленные показаниями датчиков, показали, что, во-первых, при медленном приближении горячей поверхности к плоскости воды и последующем погружении ее на глубину до ~ 1мм не наблюдается непосредственного соприкосновения нагревателя с холодной жидкостью, т.е. между ними всегда существует прослойка пара. Причем следует отметить, что измеренная толщина парового слоя с хорошей точностью соответствует ее значению, вычисленному по уравнению Фурье в предположении, что температура межфазной поверхности пар – жидкость равна 100°C. При более глубоком погружении нагревателя в воду наблюдается сход (разрушение) паровой пленки, которое обычно начинается вблизи боковой границы торцевой поверхности и вызвано либо перекосом плоскости нагревателя, либо возмущениями, развивающимися в этой области. Во-вторых, форма границы раздела межфазной поверхности пар – жидкость (см. рис.3) имеет сложное очертание с точкой перегиба вблизи свободной поверхности и плавным (а не резким, как можно было бы представить, исходя из предположения, что межфазная поверхность повторяет торцевой профиль цилиндрического плоского нагревателя) выходом на свободную водяную поверхность. Однако полученный результат требует дополнительной экспериментальной проверки посредством зондовых измерений параметров паровой пленки, поскольку регистрируемый видеоматериал может значительным образом расходиться с реальной формой поверхности, вследствие существенного влияния температурных градиентов на оптическую плотность среды в исследуемом объеме.

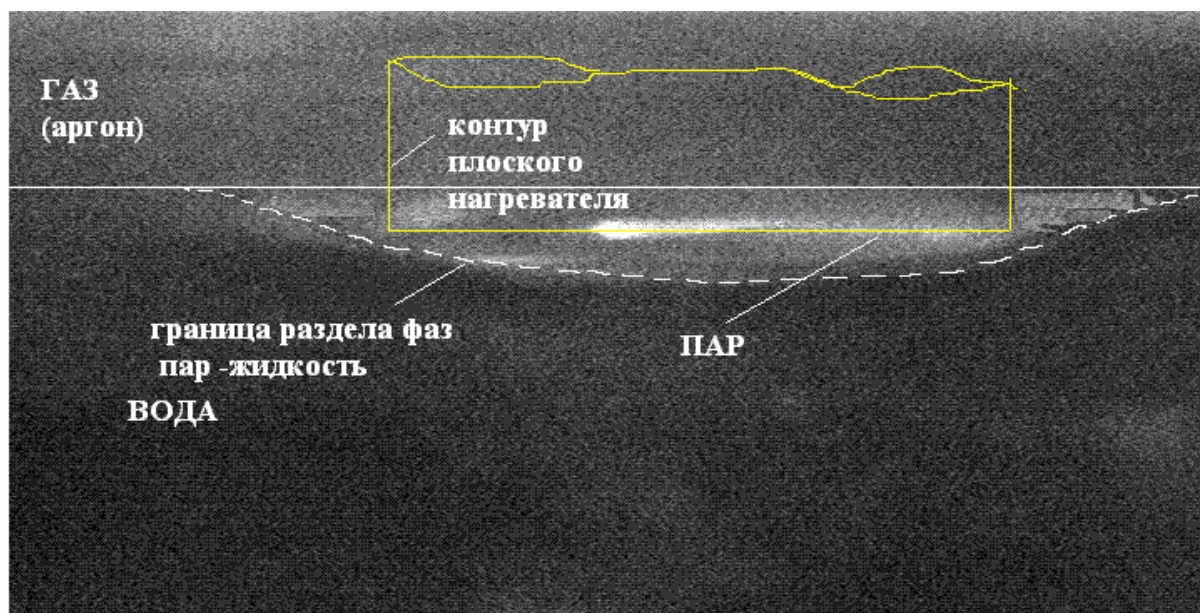


Рис.3. Фотография формы границы раздела фаз пар – жидкость.

Нестабильное существование паровой пленки, в том числе и ее разрушение, помимо причин геометрического характера (отсутствие соосности между плоскостью нагревателя и водной поверхностью), может быть обусловлено тепловыми и гидродинамическими явлениями. В частности, при определенных тепловых условиях (см. подрисуючную надпись к рис.4) при приближении нагревателя к воде граница раздела фаз пар – жидкость начинает колебаться. Характерная частота этих колебаний несколько герц, а амплитуда несколько десятков микрометров. Как показали результаты элементарных оценок, выполненных на основе соотношений теплового

баланса, эти колебания могут быть связаны с возникновением режима интенсивного испарения воды, вызванного невозможностью отвода всего тепла, поступающего от нагретой поверхности к границе раздела фаз пар – жидкость только за счет теплопроводности и конвекции.

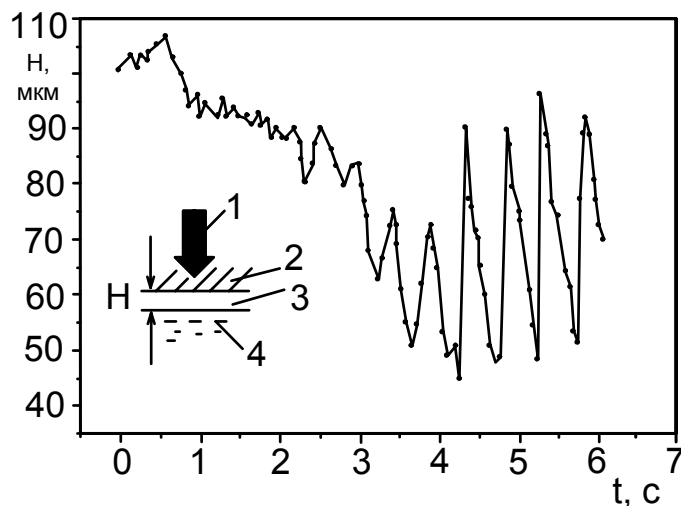


Рис.4. Осциллограмма колебаний паровой пленки. 1 – тепловой поток ($q \sim 4 \times 10^5$ Вт/м²); 2 – горячая стенка (плоский металлический нагреватель); 3 – слой пара; 4 – вода, H – расстояние между нагревателем и границей раздела фаз пар – жидкость. Температура воды 80 °С.

Другой, наблюдаемый в опытах тип колебаний границы пар – жидкость связан, по-видимому, с резонансными явлениями, возникающими в гидродинамической системе, состоящей из паровой области, импульсной линии и U – образного манометра. Выяснение причин возникновения и механизма этого явления требует дополнительного исследования.

Проведенные измерения статического давления внутри паровых слоев, расположенных вблизи плоской и полусферической (для этой геометрии эффект более выражен) форм нагретых поверхностей выявили еще один фактор, влияющий на стабильность существования паровой полости. Как показали результаты измерений, значение этого давления в пределах погрешности экспериментов, в обоих случаях, целиком определяется глубиной погружения исследовательского образца в воду (т.е. гидростатическим давлением). Опыты были выполнены с охладителем (водой) при разной степени концентрации растворенных в нем газов, что достигалось различной длительностью кипячения дистиллированной воды. Установлено, что наличие растворенных газов приводит к появлению возмущений (волн) на межфазной поверхности пар – жидкость, росту пульсаций как температуры нагретой поверхности, так и давления внутри парового слоя, и способствует преждевременному сходу (разрушению) паровой пленки. Из графика, представленного на рис.5 видно что, значительный разброс измеряемого давления, обусловленный медленными (десятые ÷ сотые доли Гц) колебаниями столба жидкости в наклонном манометре, наблюдается лишь при относительно низких значениях температуры воды ($T < 50$ °С).

Можно предположить, что описанное явление связано с циклическим выходом (выбросом) в паровую область растворенных в воде газов, подводимых к границе раздела фаз пар – жидкость вихрями, вызванных свободной конвекцией. В пользу этой гипотезы, помимо непосредственных визуальных наблюдений, свидетельствует факт отсутствия колебаний как при малых недогревах воды (слабые свободно-конвективные течения), так и в экспериментах, выполненных с использованием дистиллированной

дегазированной (3 часа кипячения) воды. Обнаруженный эффект играет существенную роль в процессе инициирования парового взрыва, поскольку именно он, во многих случаях, является источником возмущения паровой пленки, приводящий к преждевременному ее разрушению и непосредственному контакту охладителя с горячим телом, в условиях, когда температура поверхности последнего превышает температуру предельного перегрева воды. Осциллограммы температуры, полученные в экспериментах, проведенных с использованием кипяченной и некипяченной дистиллированной воды, также подтверждают это предположение.

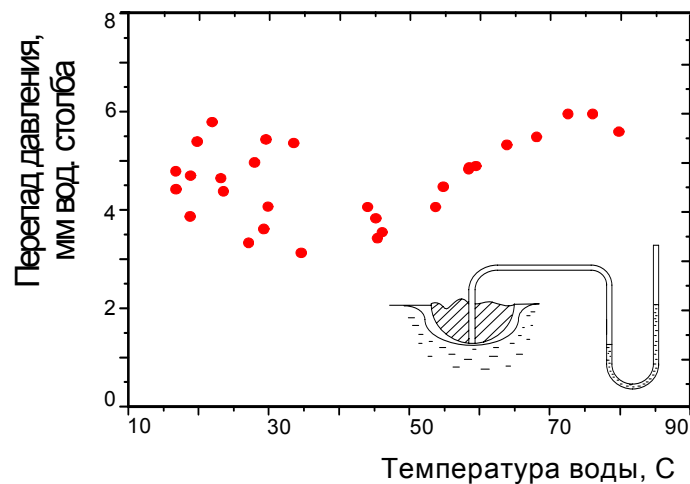


Рис.5. Зависимость давления внутри паровой пленки от температуры дистиллированной воды, в которой присутствуют растворенные газы

Модельное описание

Рассматривается цилиндрический нагреватель радиуса R_w , погруженный в воду на глубину h_w торцевым концом с плоской поверхностью (рис. 6). Температура нагревателя T_w такова, что на его поверхности образуется паровая пленка толщиной δ_0 в нижней точке межфазной поверхности. Над свободной поверхностью жидкости поддерживается постоянное давление P_b .

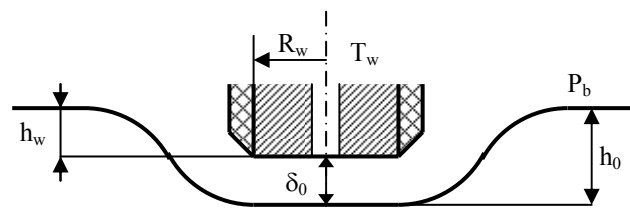


Рис.6. Физическая модель

Представленная система представляет собой сопряженную задачу, в которой три фазы участвуют в теплообмене: нагреватель (твердое тело) – паровая пленка – жидкость, последние две фазы также участвуют в процессе массопереноса.

Для формулирования математического описания принимается ряд допущений физической модели: Процессы тепломассопереноса в двухфазной системе квазистационарные, т.е. скорость понижения температуры цилиндра заметно меньше скорости установления стационарного состояния системы, соответствующего данному перепаду ΔT между температурами нагревателя и жидкости. Коэффициент конденсации на межфазной поверхности пар – жидкость равен единице. Температура жидкости вблизи границы раздела T' постоянна по сечению, при этом давление насыщения, соответствующее температуре жидкости $P_s(T')$ равно давлению над свободной

поверхностью жидкости P_b . Теплота в паре распространяется теплопроводностью, лучистая составляющая теплового потока мала. Физические свойства жидкости и пара постоянны. Скачки температуры на межфазных поверхностях пар – жидкость и пар – твердое тело малы по сравнению с общей разностью температур, и ими можно пренебречь. Возможные колебания паровой пленки в первом приближении не рассматриваются.

Геометрически задача разделяется на участки – плоский торец и переходная область вокруг цилиндрической боковой поверхности нагревателя к зеркалу жидкости. Для плоской торцевой поверхности нагревателя ($0 < r < R_w$) запишем граничные условия на межфазной поверхности:

Универсальное условие совместности по потоку импульса:

$$P'' = P_b + \rho' g (h_0 - z) + 2\sigma K - \frac{j^2}{\rho''} \quad (1)$$

Вблизи границы раздела фаз состояние паровой пленки описывается соотношениями, полученными при решении кинетического уравнения Больцмана моментным методом [8]:

$$\frac{P'' - P_s(T')}{P_s(T')} = \frac{0.44q_1}{P_s(T')\sqrt{2RT'}} - \frac{2\sqrt{\pi}j}{\rho_s\sqrt{2RT'}} \frac{1 - 0.4\beta}{\beta} \quad (2)$$

Тепловой поток в первом приближении определяется теплопроводностью через плоскую стенку (скачками температуры на границах раздела фаз пар – жидкость и пар – нагреватель пренебрегается):

$$q_1 = \frac{\bar{\lambda}'' \Delta T}{\delta_0} \quad (3)$$

Предположим, что межфазная поверхность повторяет форму нагревателя под плоской частью, следовательно, кривизна границы раздела фаз пар – жидкость в начале координат равна нулю. Из этого можно сделать ряд выводов:

– Давление пара по сечению пленки постоянно. Если давление пара не постоянно, то толщина паровой пленки должна быть переменна.

– Влияние гидростатического напора и кривизны направлено «в одну сторону» – уменьшение толщины приводит к уменьшению гидростатического напора и к уменьшению кривизны межфазной поверхности (была кривизна нулевая, межфазная поверхность стала выпуклой, кривизна стала отрицательной).

– Температура межфазной поверхности постоянна во всей плоской области. Условия теплопередачи через паровую пленку одинаковы по сечению. Если температура межфазной поверхности не постоянна, то давление насыщения должно быть переменным, что приводит к переменности давления пара.

Рассмотрим два предельных случая:

а) Испарения нет. Если бы происходило испарение, то по сечению накапливается масса, толщина паровой пленки увеличивается.

Из рис. 1, а также из (1)–(3) при $j=0$, $z=0$, $K=0$ следует:

$$\delta = h_0 - h_w \quad (4)$$

$$\frac{0.44q_1}{\sqrt{2RT'}} = \rho' g h_0 \quad (5)$$

$$h_0 = 0.5 \left(h_w + \sqrt{h_w^2 + \frac{1.76\bar{\lambda}'' \Delta T}{\rho' g \sqrt{2RT'}}} \right) \quad (6)$$

б) Рассмотрим идеализированную ситуацию, когда вся теплота, поступающая от нагревателя, затрачивается на испарение $q_w = jL$.

$$\rho'gh_0 - \frac{j^2}{\rho''} = \frac{q_1}{\sqrt{2RT'}} \left(0.44 - \frac{1.2\sqrt{\pi RT'}}{L} \right) \quad (7)$$

$$h_0 = 0.5 \left(h_w + \sqrt{h_w^2 + \frac{4\bar{\lambda}''\Delta T}{\rho'g\sqrt{2RT'}} \left(0.44 - \frac{1.2\sqrt{\pi RT'}}{L} \right)} \right) \quad (8)$$

Методика расчета формы межфазной поверхности в области перехода от плоского торцевого окончания нагревателя к свободной поверхности жидкости основана на подходах к расчету осесимметричной границы раздела фаз пар – жидкость, образовавшейся на полусферическом нагревателе, погруженном в холодную жидкость [9]. Вид межфазной поверхности определяется на основании интегрирования уравнения для разности давлений пара и жидкости (1) подобно тому, как это вычисляется в задачах гидростатики [10]. Кривизна осесимметричной поверхности представляет собой нелинейный дифференциальный оператор второго порядка. При записи неравновесного граничного условия (2), также как и для плоской части, рассматриваются два случая: отсутствие массового потока с границы раздела фаз пар – жидкость и полного испарения. При этом основное отличие от задачи с полусферическим нагревателем является геометрия источника теплоты, а также зависимость начальных условий: кривизны в лобовой точке и соответствующей толщины паровой пленки от решения задачи для плоской торцевой поверхности цилиндра:

$$z=0, \quad r=R_w, \quad dz/dr=0 \quad (9)$$

Условие выхода на свободную поверхность жидкости:

$$z=h_0, \quad dz/dr=0 \quad (10)$$

Выбор кривой в однопараметрическом семействе осуществляется по условию (10), при этом параметром интегрирования является кривизна в месте перехода от плоской поверхности к переходной области к свободному уровню жидкости.

Расчетные данные

Используя формулы (4)-(6) построим зависимость $h_0(h_w)$ – парабола (рис. 7) для следующих исходных данных: $T_w=500^\circ\text{C}$, $R_w=0.01\text{м}$. От величины δ зависит тепловой поток, при $h_w=0$, $q_w=1.5 \cdot 10^4 \text{Вт/м}^2$.

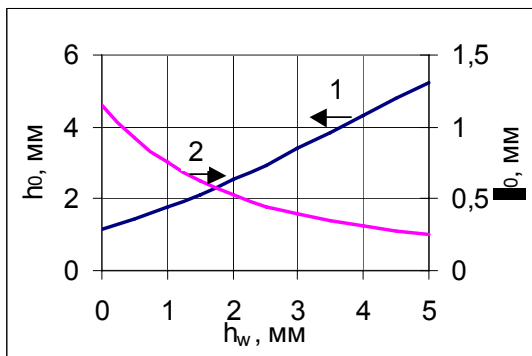


Рис. 7. Зависимость толщины паровой пленки (2) в лобовой точке от глубины погружения нагревателя при отсутствии испарения с межфазной поверхности.

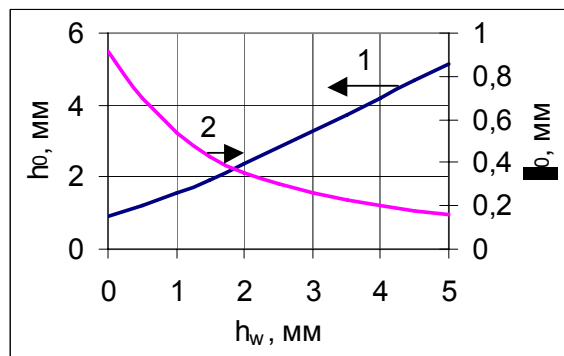


Рис.8. Зависимость толщины паровой пленки (2) в лобовой точке от глубины погружения нагревателя при полном испарении с межфазной поверхности.

При допущении, что вся теплота, поступающая от нагревателя, затрачивается на испарение $q_w = jL$, получена зависимость толщины паровой пленки в нулевой точке от глубины погружения h_w для случая нулевой кривизны k_0 (рис. 8). Анализ формулы (8) показывает, что при тех же исходных данных, которые соответствуют результатам на рис. 7, толщина паровой пленки в лобовой точке при испарении жидкости будет меньше (рис. 8). При этом необходимо отметить, что при $j=q_1/L$ накапливается масса пара в пленке, следовательно, должна увеличиваться толщина, и кривизна в лобовой точке не нулевая.

Толщина паровой пленки зависит от располагаемой разности между температурами нагревателя и жидкости, а, кроме того, увеличивается при погружении нагревателя. В лобовой точке при разных граничных условиях ($j=0$ и $j=q/L$) величина δ_0 отличается на 0,237 мм при $h_w=0$ и на 0,09 мм при $h_w=5$ мм. Величина h_0 является определяющей для всей формы межфазной поверхности: для плоской поверхности и переходной области, включая размер области деформации свободной поверхности жидкости.

При рассмотрении цилиндрической части нагревателя за ноль принята точка пересечения линии уровня свободной поверхности жидкости и боковой поверхности нагревателя (без теплоизолятора). Толщина паровой пленки увеличивается при увеличении теплового потока с нагревателя (рис. 9). Необходимо отметить, что размер парового образования сопоставим с характерными геометрическими параметрами рабочего объема – радиусом и глубиной погружения нагревателя.

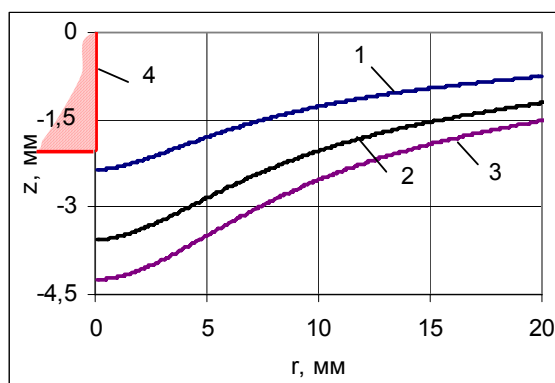


Рис. 9. Вид межфазной поверхности $h_w=2$ мм. 1 – $q_w=5 \cdot 10^4$ Вт/м²; 2 – $q_w=8 \cdot 10^4$ Вт/м²; 3 – $q_w=10^5$ Вт/м²; 4 – очертания нагревателя.

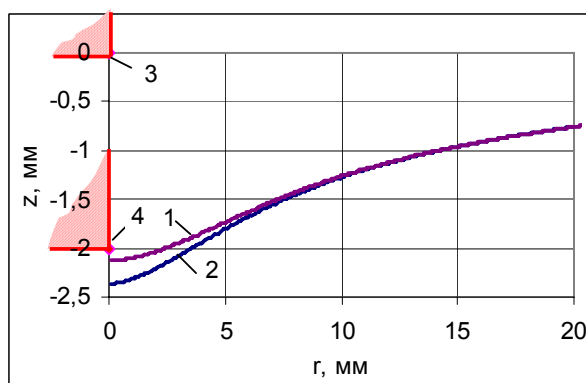


Рис. 10. Вид межфазной поверхности. 1 – $h_w=0$ мм; 2 – $h_w=2$ мм; 3 – край нагревателя $h_w=0$ мм; 4 – край нагревателя $h_w=2$ мм.

Толщина паровой пленки уменьшается по мере погружения нагревателя (рис. 10), причем изменение существенно меньше, чем исходной величины. Это связано с определяющим влиянием теплового потока на формирование межфазной поверхности. Вид осесимметричной межфазной поверхности (рис. 9-10) получен при использовании граничного условия (9), которое согласуется с рассмотренным случаем межфазной поверхности под плоской торцевой поверхностью цилиндра. Для того, чтобы решение удовлетворяло второму граничному условию на свободной поверхности жидкости (10) необходимо положить величину кривизны в месте перехода от плоской геометрии к криволинейной отличной от нуля (положительную), что повлечет за собой соответствующее изменение величины h_0 . Таким образом, для согласия с экспериментом (рис. 3), необходимо скорректировать описание геометрии межфазной поверхности, по всей видимости, межфазная поверхность не повторяет очертания нагревателя и не является плоскостью.

Испарение оказывает существенное влияние на толщину паровой пленки (рис. 11). Также как и для плоской поверхности, испарение с границы раздела фаз пар – жидкость приводит к уменьшению величины парового слоя (примерно в четыре раза).

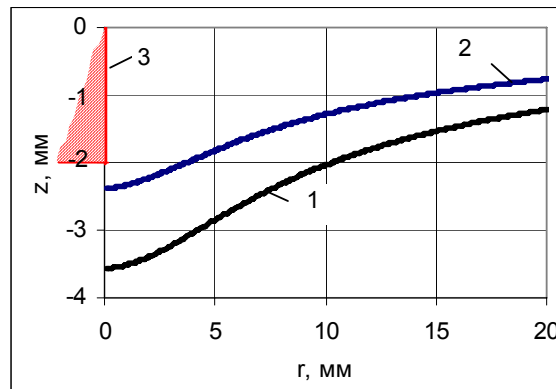


Рис. 11. Влияние испарения на форму межфазной поверхности. 1 – массовый поток отсутствует; 2 – вся теплота на межфазной поверхности затрачивается на испарение; 3 – очертания нагревателя.

Как и в случае полусферического нагревателя, расчетная величина области деформации жидкости оказывается существенно больше, чем отмечается в экспериментах. Видимо, это может быть обусловлено в первую очередь допущением физической модели о постоянстве температуры межфазной поверхности.

Таким образом, применение неравновесного граничного условия позволяет решать сопряженные задачи. При этом «кинетическая добавка», обусловленная действием теплового потока на межфазной поверхности пар – жидкость, определяет не разность давления жидкости и актуального давления пара, а связывает последнюю величину с линией насыщения, а именно с давлением, соответствующим по линии насыщения температуре жидкости вблизи границы раздела фаз.

Анализ разработанной физической модели взаимодействия сильно нагретого цилиндра с недогретой до состояния насыщения жидкостью показывает, что кривизна межфазной поверхности пар – жидкость на оси цилиндра не равна нулю, что согласуется с экспериментальными данными.

Заключение

Результаты исследований характеристик пленочного кипения на плоских обращенных вниз нагретых поверхностях в условиях недогрева показывают:

- Статическое давление внутри парового слоя в пределах погрешности эксперимента, определяется глубиной погружения исследовательского образца в воду (т.е. гидростатическим давлением).
- Концентрация растворенных газов и температура нагретой жидкости влияет на стабильность паровой пленки.
- Форма межфазной поверхности имеет сложное очертание с точкой перегиба вблизи свободной поверхности и плавным выходом на зеркало жидкости.
- Толщина паровой пленки увеличивается при увеличении теплового потока с нагревателя и уменьшается по мере погружения нагревателя.
- Испарение оказывает существенное влияние на толщину паровой пленки.

Авторы выражают благодарность В.В. Глазкову, Ю.А. Зейгарнику и А.П. Крюкову за помощь в постановке исследования и обсуждении полученных результатов.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проекты 06-08-01486).

Литература

1. Certain Features of Film Boiling on a Solid Hemispherical Surface /V.S. Grigoriev, Yu.P. Ivochkin, A.P. Kryukov, Yu.A. Zeigarnik, V.G. Zhilin // 3rd International Symposium on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation. Italy. Piza. 2004. V.2. pp.1271 – 1277.
2. Ивочкин Ю.П., Кубриков К.Г. Поведение паровой пленки на обращенных вниз полусферических и плоских нагревателях, погруженных в холодную воду. //Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках: Труды XV Школы–семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. В 2–х томах. Т.1 – М.: Издательство МЭИ, 2005, с. 200 – 203.
3. Крюков А.П., Селянинова Ю.Ю. Влияние процессов теплопереноса на кривизну границы раздела фаз пар – жидкость. // CD-ROM publications. XXVIII Сибирский теплофизический семинар. – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2005. – Д-059.
4. Крюков А.П., Селянинова Ю.Ю. Форма межфазной поверхности при пленочном кипении воды на полусфере. // Труды Четвертой Российской Национальной Конференции по Теплообмену. – М.: Издательство МЭИ, 2006. – Т. 4. – С. 155–158.
5. Kausik S. Das and C. A. Ward Surface thermal capacity and its effects on the boundary conditions at fluid-fluid interfaces. / Physical review E. – 2007. – №75. – P. 065303.
6. Asis Giri, Hyun Sun Park, Bal Raj Sehgal Analysis of bubble dynamics in explosive boiling of droplet with fine fragmentation / Experimental Thermal and Fluid Science 29 (2005) 295–303.
7. Горбунов А.А., Дергунов И.М., Крюков А.П. Эволюция паровой полости при кипении сверхтекучего гелия // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. Москва, 1998. Т.4. с.80–83.
8. Муратова Т.М., Лабунцов Д.А. Кинетический анализ процессов испарения и конденсации. // ТВТ. 1969. Т. 7. № 5. С. 959–967.
9. Ю.Ю. Пузина, Ю.П. Ивочкин. Изменение кривизны границы раздела фаз пар – жидкость под действием теплового потока. // Труды XVI Школы – семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, 21 –25 мая 2007 г., г. Санкт – Петербург. Т.1, С.486 – 489. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
10. Гидромеханика невесомости // Под. ред. Мышкиса А.Д. М.: Наука. 1976. 506с.