

ОСОБЫЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ В ПЛЕНКАХ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РОСТ ПАРОВЫХ ПУЗЫРЕЙ

АННОТАЦИЯ

Впервые обращено внимание на вопросы термодинамики генерации паровых пузырей при кипении на горизонтальных цилиндрических нагревателях с учетом особых теплофизических свойств пограничных слоев жидкостей. Показано, что такие особые свойства этих жидкостей как вязкость, теплопроводность, расклинивающее давление и теплота испарения хорошо описывают те результаты исследований по кипению, интерпретация которых была неоднозначна и вызывала затруднения: место зарождения пузыря, его размер, удерживание вблизи поверхности нагрева, большие тепловые потоки, кризис кипения.

1. ВВЕДЕНИЕ

Давно изучаемый процесс кипения жидкостей на твердых нагревателях все еще имеет ряд «белых пятен» в вопросах зарождения и генерации паровых пузырей, перехода от пузырькового к пленочному кипению. Основное затруднение, на наш взгляд, сложилось в связи с тем, что зарождение и удерживание паровых пузырей происходят так, как будто они имеют контакт с поверхностью нагрева, «прилипая» к ней. Но с другой стороны известно, что такого контакта по сухому пятну не может быть, так как это соответствует началу пленочного кипения. Эти и другие противоречия разрешаются, если принять во внимание большое число исследований и опубликованных работ в области поверхностных сил и учесть то обстоятельство, что разделительная пленка между паровым пузырем и нагревателем имеет особые теплофизические свойства во многом различные по сравнению со свойствами объемной жидкости.

2. ТЕКСТ ДОКЛАДА

Несмотря на все успехи математического моделирования процесса пузырькового кипения жидкостей, экспериментальной и вычислительной техники последних 50-ти лет, некоторые вопросы все еще остаются не выясненными.

На рис. 1 представлены результаты некоторых наших исследований по кипению воды на трубчатых нагревателях [1]. Наблюдается явно однозначная зависимость величины перегрева стенки от диаметра нагревателя при различных тепловых потоках, но в то же время, распределение температур по периметру трубы изменяется с его увеличением.

При небольших плотностях тепловых потоков (менее 20 кВт/м^2) наибольшая температура перегрева

наблюдается на нижней образующей цилиндра. С увеличением теплового потока растет экранизация бокового периметра горизонтальной трубы основаниями паровых пузырей, т.е. двухфазным пограничным слоем. Это сопровождается изменением перегрева стенки по периметру трубы (см. рис. 1) и наибольшим становится перегрев стенки на верхней части трубы.

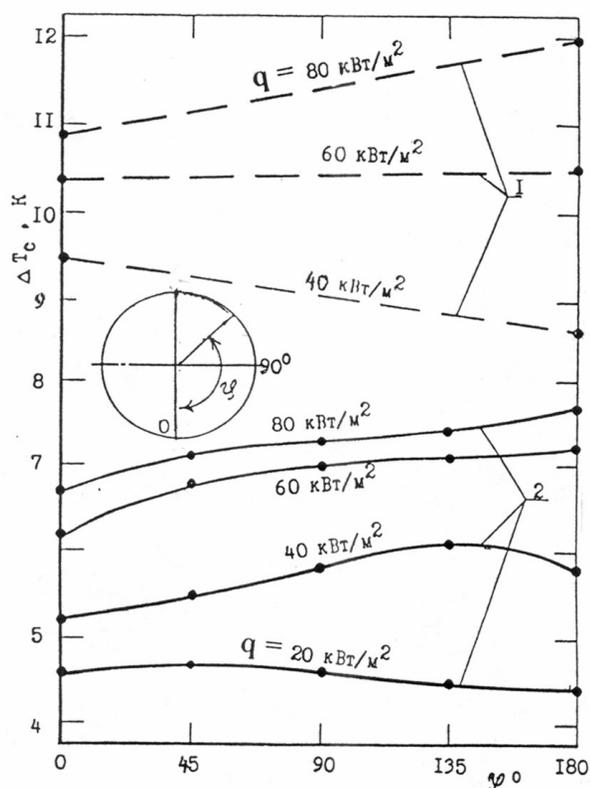


Рис. 1. Перегрев стенки по периметру горизонтального цилиндра при различной плотности теплового потока q , кВт/м^2 : 1 – труба диаметром 10 мм; 2 – труба диаметром 34 мм

Образование паровых пузырей происходит спонтанно на нижней образующей в пристенных перегретых слоях жидкости вдоль всей ее рабочей длины. Постоянных «центров» генерации паровых пузырей на нижней образующей не отмечено. Они чередуются между собой. С увеличением теплового потока растет частота отрыва паровых пузырей с нижней образующей горизонтальной трубы. Тепловой поток, отводимый паровыми пузырями с нижней части горизонтальной трубы, составляет 96...99% всего теплового потока, отводимого при кипении паровыми пузырями [1].

Проанализируем процесс зарождения парового пузыря, рассматривая традиционно несколько необходимых условий. Из некоторых, первоначально примем только бесспорное условие равенства давлений пара в пузыре p'' и в окружающей перегретой жидкости [2]. Давление пара в пузыре складывается из давления насыщенного пара над плоской поверхностью раздела фаз p_∞ , гидростатического давления высоты слоя жидкости p_r , давления в жидкости, обусловленного действием сил поверхностного натяжения плоской границы раздела фаз жидкость-пар p_σ и лапласовского давления $2\sigma/R$, создаваемого кривизной поверхности пузыря.

Давление в перегретой жидкости можно найти по термодинамическим таблицам состояния вещества, например для воды [3]. Определение всех составляющих давлений в пузыре также не представляет затруднений, кроме давления сил поверхностного натяжения p_σ . Однако оценить величину давления p_σ представляется возможным по увеличению температуры ΔT_0 кипящей жидкости по сравнению с температурой насыщенного пара над поверхностью. Для воды при атмосферном давлении в работе [2] приводятся значения $\Delta T_0 = 0,4$ °C, что по таблице термодинамических свойств воды [3] соответствует давлению $p_\sigma \approx 2,0$ кПа.

Для наглядности на рис. 1 построим совмещенную диаграмму давления насыщения $p(t)$ (кривая *a*) и давления пара в пузыре $p''(R)$ (кривая *б*) рис. 1, по которой можно находить радиус зарождаемых пузырей. Температура перегретой жидкости определяет тот наименьший радиус пузыря, названный критическим, который отвечает условию равновесия. Например, при температуре перегрева 105 °C радиус может составить 5 мкм и более, а при температуре 120 °C – более 1,5 мкм.

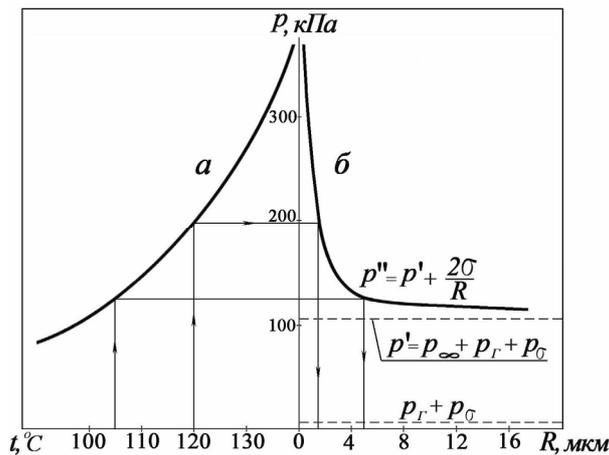


Рис. 2. Зависимости давления насыщения от температуры (*a*) и давления в пузыре от его радиуса (*б*) ($p_\infty = 101,3$ кПа, $p_r = 2$ кПа, $p_\sigma = 2$ кПа)

Температура перегретой жидкости, как следует из рис. 2, является главным и необходимым условием для зарождения пузыря, но не единственным. С ее помощью пока не представляется возможность

найти объяснения наблюдаемым процессам на рис.1.

Следуя [4], зарождение паровых пузырей начнется тогда, когда пристенный перегретый слой достигает толщины δ_T , соизмеримой с $2R_k$ – перегрев такого слоя характеризует начало закипания. Например, при температуре 120 °C толщина этого слоя должна быть не менее 3,0 мкм, а при температуре 105 °C – не менее 10 мкм. Рассмотрим это подробнее.

Для определения толщины теплового пограничного слоя δ_T разные авторы приводят различные методики, которые в основном сводятся к определению профиля температур вблизи нагревателя. Величину теплового пограничного слоя δ_T без измерения температурного профиля в работе [5] предложено рассчитывать в зависимости от коэффициента теплоотдачи α :

$$\delta_T = C/\alpha^n, \quad (1)$$

где C – постоянная величина, n – показатель степени.

На рис. 3 представлены результаты некоторых работ, из которых видно, что постоянная C в уравнении (1) имеет различные значения для трех областей теплообмена (различный угол наклона).

Для горизонтальных нагретых поверхностей, если поверхность нагрева обращена кверху, то коэффициент теплоотдачи ее выше, чем у поверхности, обращенной книзу почти на 60 % [6]. В соответствии с уравнением (1) толщина пограничного слоя будет, наоборот, на столько же меньше.

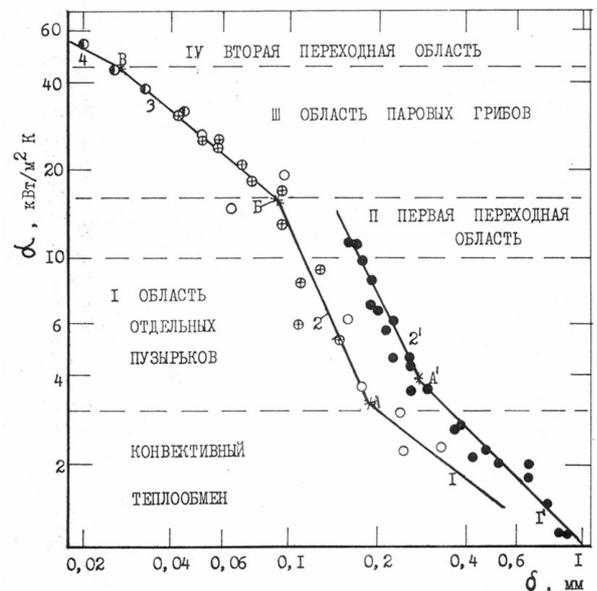


Рис. 3. Зависимости коэффициента теплоотдачи от толщины теплового пограничного слоя: ● – торец медного стержня диаметром 20 мм, покрытый никелем толщиной 5...7 мкм; ○ – торец медного стержня диаметром 50 мм [17]; ⊕ – пластина из нержавеющей стали размером 5,08 × 19 × 63,5 мм; ● – данные работы [5]

Аналогично для горизонтального цилиндрического нагревателя локальные значения коэффициента теплоотдачи α по периметру, по-видимому,

имеют такое же распределение, как и перегрев стенки (см. рис. 1): большей температуре стенки соответствует меньший коэффициент теплоотдачи. Следовательно, толщина пограничного слоя для такого цилиндрического нагревателя также не одинакова.

Объяснение такой зависимости можно найти при анализе соотношения, предлагаемого в работе Шлихтинга [7]:

$$\delta_T \approx \ell / (\text{Re} \cdot \text{Pr})^{0,5}, \quad (2)$$

где ℓ – характерный размер тела; Re и Pr – соответственно критерии подобия Рейнольдса и Прандтля, δ_T – толщина пограничного слоя.

В нижней части цилиндрического нагревателя естественная конвекция затруднена, число Re имеет небольшие значения, как и коэффициент теплоотдачи, а толщина теплового пограничного слоя, наоборот, наибольшая.

Вследствие этого при равных температурах перегрева в пограничном слое зарождение парового пузыря произойдет там, где толщина слоя наибольшая – то есть в нижней части цилиндра. Для образования пузырей в других, менее тонких, слоях пограничного слоя потребуется его дополнительный перегрев, так как зарождаемые пузыри, в соответствии с рис. 2 будут меньшего радиуса. Именно это – первоначальное зарождение пузырей в нижней части цилиндрических нагревателей отмечалось в нашей работе [1] и не находило объяснений.

На других два вопроса, а именно, почему температура начала закипания уменьшается с увеличением диаметра нагревателя и что такое «центры парообразования» – также можно получить ответ с помощью диаграммы рис. 2 и анализа толщины пограничного слоя δ_T .

На большую роль тонких пленок жидкостей вблизи твердых тел при кипении и конденсации указывалось еще в работах Д.А. Лабунцова [8], В.В. Ягова [9], В.П. Исаченко [10]. Несмотря на это, до настоящего времени при экспериментальных исследованиях и теоретическом анализе совершенно не принималось во внимание то обстоятельство, что жидкость этого слоя имеет особые физические свойства, отличающиеся от свойств объемной жидкости. Само существование пограничного слоя (в первую очередь гидродинамического) обусловлено тем, что жидкость в этом слое отличается по такому структурочувствительному свойству как вязкость от объемной жидкости, при этом установлено, что в граничных слоях толщиной до десятых долей микрона вязкость может меняться в несколько раз [11]. Именно повышенная вязкость затрудняет естественную конвекцию приграничных слоев жидкости и тепла, создавая значительные перепады температур в тепловом пограничном слое.

Высокие значения тепловых потоков и коэффициента теплопередачи для кипящей жидкости всегда вызывали удивление исследователей, но между тем, при этом не обращалось внимание на работу М.С. Мецика с сотрудниками [12], поразительные результаты которой заключаются в установлении

повышенной теплопроводности прослоек воды и этилового спирта с их утоньшением. При толщине водных прослоек в 0,1 мкм теплопроводность возрастает по сравнению с табличным значением более чем на порядок. К таким же выводом можно прийти, анализируя результаты работ Маркуса и Дропкина по определению профиля температур вблизи нагревателя: непосредственно при кипении в таком слое воды вблизи нагревателя температура изменялась незначительно [5].

Сложным является вопрос удерживания парового пузыря на нагревателе при его росте. Теории удерживания в тонком микрослое «силами инерции и виртуальной массы», или силами смачивания по «контуру сухих пятен контакта» не могут объяснить экспериментальные факты и противоречат некоторым из них. Между тем, в этих процессах проявляется другое фундаментальное свойство тонких слоев жидкости между различными фазами. Б.В. Дерягиным впервые было показано, что пленки жидкости вблизи твердой фазы обладают пониженным, «расклинивающим» давлением Π , величина которого определяется толщиной пленки h и свойствами твердого тела A : $\Pi = A \cdot h^{-3}$ [13]. Рассмотрим процесс закипания с учетом этих свойств тонких пристенных слоев жидкости.

Зародившийся в пограничном слое на расстоянии h от нагревателя паровый пузырь удерживается своей разделительной пленкой границы раздела фаз жидкость-пар в поле сил расклинивающего давления жидкости $\Pi = A \cdot h^{-3}$. Разделительная пленка, как граница раздела фаз, находится под действием сил поверхностного натяжения (как показано ранее порядка 2 кПа) и отрицательного давления кривизны поверхности, передаваемого на окружающую жидкость, как это имеет место при капиллярных явлениях. В равенстве этих давлений, т.е. расклинивающего давления пограничного слоя $\Pi = A \cdot h^{-3}$ и давления разделительного слоя жидкость-пар заключается третье условие для определения места зарождения пузыря.

Различные виды паровых структур в виде столбцов, грибов, паровых ножек [14] могут быть объяснены взаимодействием перечисленных сил, удерживающих пузырь при его росте. Еще более загадочные явления – отрыв паровых пузырей от проволочного нагревателя во всех направлениях, в том числе и против действия архимедовой силы, т.е. вниз от нагревателя [15] также можно попытаться объяснить действием расклинивающего давления.

Наконец, еще одна особенность тонкого приграничного слоя определяет кризис пузырькового кипения и переход его к пленочному. Эта особенность станет более понятной, если попытаться ответить на вопрос, почему при пузырьковом кипении пар образуется на некотором расстоянии, а не в наиболее нагретом слое жидкости, прилегающем к нагревателю (что, наоборот, имеет место при пленочном кипении).

Опыты по определению теплоты испарения-энергии связи молекул жидкости с твердой поверх-

ностью, показали, что она примерно в полтора раза выше теплоты парообразования [16]. Поэтому для перевода жидкости, прилегающей к смачиваемой поверхности в паровую фазу, требуется более высокая энергия (или температура) по сравнению с теплотой парообразования r объемной жидкости. Кризис кипения наступает тогда, когда с увеличением теплового потока температура слоя жидкости, прилегающего к нагревателю, достигает критического значения, определяемого энергией связи молекул жидкости с твердым телом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы вполне разделяют мнение тех, кто считает, что для подтверждения новых представлений и идей необходима постановка прямых экспериментов. Но сложность заключается как раз в том, что эксперименты по кипению трудно совместить с одновременным очень тонким измерением теплофизических свойств слоев жидкостей, прилегающих к твердой поверхности нагревателя. Приходится результаты этих отдельных исследований (вполне экспериментально достоверных) использовать при моделировании процессов кипения, что было принято в настоящем сообщении.

Надеемся, что последующие исследования в области пузырькового кипения подтвердят нашу точку зрения, т.к. другая позиция ставит под сомнение результаты экспериментальных работ по поверхностным силам.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

q – плотность теплового потока, Вт/м²;
 ΔT_c – температура перегрева стенки нагревателя, К;
 p'' – давление пара в пузыре Па;
 p_∞ – давление насыщенного пара, Па;
 p_T – гидростатическое давление, Па;
 p_σ – давление в жидкости за счет сил поверхностного натяжения, Па;
 R – радиус парового пузыря, м;
 R_k – наименьший радиус пузыря (критический), м;
 ΔT_0 – температура перегрева жидкости, К;
 δ_T – толщина теплового пограничного слоя, м;
 C – постоянная, Вт/(м² · град);
 α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · град);
 ℓ – характерный размер тела, м;
 Π – расклинивающее давление, Па;
 h – толщина пристенного слоя, м;
 A – постоянная, Па · м³;
 r – теплота парообразования, Дж/кг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чайка В.Д.** Вопросы физики кипения жидкостей (на горизонтальных трубах). Владивосток: Дальнаука, 1996. 213 с.
2. **Михеев М.А., Михеева И.М.** Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973. 320 с.
3. **Вукалович М. П., Ривкин С.П., Александров.** Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при совете Министров СССР, М., 1973. 320 с.
4. **Ильин И.Н., Гривцов В.П., Саука У.О.** Начало кипения жидкостей // Кипение и конденсация. Рига: Риж. Политех. ин-т, 1981. С. 93–117.
5. **Маркус Б., Дропкин Д.** Экспериментальное исследование температурных профилей в перегретом пограничном слое над горизонтальной поверхностью при пузырьковом кипении воды в большом объеме // Теплопередача. Сер. С. М.: Мир, 1965. Т. 87. № 3. С. 14–25.
6. **Гребер Г., Эрк С., Григусь У.** Основы учения о теплообмене. М.: Изд-во иностр. лит., 1958. 556 с.
7. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 712 с.
8. **Лабунцов Д.А.** Современные представления о механизме пузырькового кипения жидкостей // Теплообмен и физическая газодинамика М.: Наука, 1974. С. 98–115.
9. **Ягов В.В.** Теплообмен при пузырьковом кипении – возможности теоретического анализа // Теплообмен в двухфазных системах: Тр. IV Междунар. форума. Минск: Институт теплообмена им. А.В. Лыкова, 2000. Т. 5. С. 3–12.
10. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача М.: Энергоиздат, 1991. 416 с.
11. **Дерягин Б.В., Карасев В.В. и др.** ДАН СССР 187, 846 (1969).
12. **Мецик М.С.** Новые данные о теплопроводности тонких пленок воды // Исследования в области поверхностных сил: Сб. докл. III конф. по поверхн. силам. М.: Наука, 1967. С. 41–42.
13. **Дерягин Б.В., Кусаков М.М.** Изв. АН СССР, ОМЕИ. Сер. хим. № 5, 741 (1936), № 5, 1139 (1937) Колл. ж. т. 17, 207 (1955).
14. **Гертнер Р.** Фотографическое исследование пузырькового кипения в большом объеме // Труды Американского общества инженеров-механиков. 1965. Сер. С. Т. 87. № 1. С. 20–35.
15. **Субботин В.Н., Казновский С.П., Коротаев С.К., Свириденко В.Е., Селиванов Ю.Ф.** Исследование динамики паровых пузырьков при кипении воды на тонких проволоках в условиях естественной конвекции // Атомная энергия. 1970. Т. 28. Вып. 1. С. 9–13.
16. **Исследования структуры и теплоты испарения пленок влаги из дисперсных материалов / М.П. Волярович, Н.И. Гамаюнов, В.И. Баздырева, Б.В. Евдокимов и др. // Поверхностные силы в тонких пленках и устойчивость коллоидов. М.: Наука, 1974. С. 129–139.**
17. **Bobst R.W., Colver C.F.** Temperature Profiles up to Burnout Adjacent to a Horizontal Heating Surface in Nucleate Pool Boiling Water // Chem. Engn. Prog., Semp. Ser. 1968. Vol. 64. № 82. P. 26–32.