

ФОРМА МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПЛЕНОЧНОМ КИПЕНИИ ВОДЫ НА ПОЛУСФЕРЕ

АННОТАЦИЯ

Форма межфазной поверхности, образованной при взаимодействии сильно нагретой полусферической поверхности нагревателя и воды, исследуется в настоящей работе. Анализ особенностей процессов переноса в паровой пленке проводится на основании совместного применения методов механики сплошной среды и молекулярно-кинетической теории. В результате численного решения сформулированного математического описания получено распределение параметров пара по сечению пленки. Проведен анализ влияния существенно неравновесных условий на формообразование границы раздела фаз жидкость – пар при изменении температуры нагревателя.

1. ВВЕДЕНИЕ

В ряде прикладных задач современной теплотехники встречаются ситуации, когда сильно нагретое тело взаимодействует с холодной жидкостью. При этом теплота от нагревателя может подводиться к межфазной поверхности со стороны жидкости или со стороны пара. В первом случае жидкость перегревается относительно температуры насыщения и испаряется, весь тепловой поток от нагревателя затрачивается на испарение. Если жидкость отделена от нагревателя паровой пленкой, то часть теплового потока расходуется на нагрев жидкости, оставшаяся часть на испарение, а температура пара выше температуры межфазной поверхности.

Реальные границы раздела фаз представляют собой тонкие слои сложной структуры. В таких пограничных слоях молекулы вещества взаимодействуют одновременно с молекулами отдельных фаз [1]. Особое место в решении задач тепломассопереноса занимает постановка граничных условий на межфазной поверхности. В методах механики сплошной среды на границе раздела фаз задается массовый поток, при этом в большинстве случаев принимается, что вся теплота затрачивается на испарение жидкости. В методах молекулярно-кинетической теории на границе раздела фаз задается функция распределения испарившихся молекул по скоростям, что позволяет связать потоки тепла и массы с температурой межфазной поверхности и соответствующим по линии насыщения давлением.

Цель настоящей работы – развитие методики расчета формы стационарной осесимметричной межфазной поверхности [2] с учетом особенностей процессов переноса на границе раздела фаз пар – жидкость при граничных условиях первого рода.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

В экспериментальных исследованиях локальных процессов при смене режимов кипения [3] температура предварительного нагрева полусферы выбиралась из условия получения на ее поверхности устойчивого пленочного кипения воды 300–700°C, температура воды изменялась в пределах 15–95°C. В ходе этих исследований обнаружена возможность существования устойчивой паровой пленки, которая может находиться в спокойном состоянии от десятых долей секунды до нескольких минут. Схематично рабочий участок показан на рис. 1.

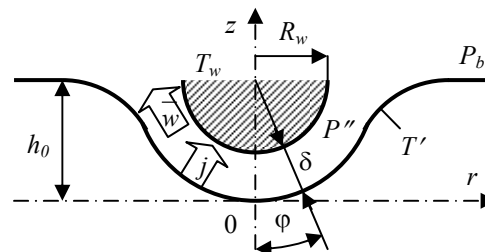


Рис. 1. Рабочий участок

Полное математическое описание представленной двухфазной системы включает в себя: а) систему уравнений сохранения для полубесконечного массива несжимаемой жидкости; б) систему уравнений сохранения для пара, движущегося в канале между проникаемой поверхностью пар – жидкость и непроницаемой поверхностью нагревателя с учетом теплообмена излучением; в) уравнение теплопроводности для нагревателя; г) соответствующие граничные условия.

Для формулирования математического описания принимаются допущения физической модели. Процессы тепломассопереноса в двухфазной системе квазистационарные, т.е. скорость понижения температуры сферы заметно меньше скорости установления стационарного состояния системы, соответствующего данному перепаду ΔT между температурами нагревателя и жидкости. Коэффициент конденсации на межфазной поверхности равен единице. Температура межфазной поверхности T' и доля теплового потока на испарение γ постоянны по сечению, при этом давление насыщения, соответствующее температуре жидкости $P_s(T')$ равно давлению над свободной поверхностью жидкости P_b . Характер течения пара ламинарный. Теплота в паре в первом приближении распространяется теплопроводностью, лучистая составляющая теплового потока мала. Физические свойства жидкости и пара постоянны.

ны. 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 не рассматриваются.

Гидравлическое сопротивление парового канала определяется в первом приближении для одномерного стационарного ламинарного нестабилизированного течения пара в пленке:

$$P_0'' - P_b = \int_0^{\pi/2} \frac{70\eta''\bar{w}}{\delta^2} (R_w + \delta) d\varphi. \quad (1)$$

Скорость течения пара определяется массовым расходом вследствие испарения с поверхности и сечением паровой пленки, перпендикулярным направлению движения, которое представляет собой боковую поверхность усеченного конуса:

$$\bar{w}(\varphi) = \frac{2 \int_0^{\varphi} jr(R_w + \delta) d\varphi}{\rho'' (r(R_w + \delta) - R_w^2 \sin\varphi)}. \quad (2)$$

На границе раздела фаз пар – жидкость записываются универсальные условия совместности [1]. Часть теплового потока γ затрачивается на испарение жидкости. Скорость движения жидкости к межфазной поверхности определяется массовым потоком пара. Давление пара связано с внешним следующим соотношением:

$$P'' = P_b + \rho' g(h_0 - z) + 2\sigma K - \frac{j^2}{\rho_s''}, \quad (3)$$

где кривизна поверхности для осесимметричного случая записывается [4]:

$$2K = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(\frac{r \frac{dz}{dr}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dr}\right)^2}} \right). \quad (4)$$

Для описания процессов переноса на межфазной поверхности используется подход молекулярно-кинетической теории, в соответствии с которым неравновесное граничное условие имеет вид [5]:

$$\frac{P'' - P_s(T')}{P_s(T')} = \frac{0.44q_1}{P_s(T')\sqrt{2RT'}} - \frac{1.2\sqrt{\pi}j}{\rho_s''\sqrt{2RT'}}. \quad (5)$$

Тепловой поток на межфазной поверхности определяется теплопроводностью через шаровую стенку (паровую пленку):

$$q_1 = \frac{\bar{\lambda}''(T_w - T')R_w}{\delta(\delta + R_w)}. \quad (6)$$

Таким образом, из (3), (5) и (6) при условии $P_s(T') = P_b$ и $j = \gamma q_1 / L$ следует:

$$\begin{aligned} \rho' g(h_0 - z) + 2\sigma K - \frac{(\gamma q_1 / L)^2}{\rho_s''} = \\ = \frac{q_1}{\sqrt{2RT'}} \left(0.44 - \frac{1.2\sqrt{\pi}\gamma RT'}{L} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Уравнение (7) является дифференциальным уравнением второго порядка. Граничные условия:

$$z = 0, \quad r = 0, \quad dz/dr = 0. \quad (8)$$

Решение системы интегральных и дифференциальных уравнений (1)–(8) осуществляется численно с применением метода Рунге-Кутты. Для этого уравнение (4) преобразуется к системе обыкновенных дифференциальных уравнений с использованием методики, разработанной в [4]. Эта система определяет однопараметрическое (параметр – кривизна K_0 в точке симметрии) семейство неравновесных поверхностей раздела фаз. В отличие от задач гидростатики, где в качестве граничного условия в зависимости от решаемых задач могут быть заданы объем пузырька и значение контактного угла, в рассматриваемом случае интеграл уравнения (7) должен удовлетворять условию выхода на свободную поверхность жидкости, то есть:

$$z = h_0, \quad dz/dr = 0 \quad (9)$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

3.1. Распределение параметров пара в пленке

В существенно неравновесных условиях поведение двухфазной системы определяется эффектами на межфазной поверхности. Для рассматриваемого случая помимо теплового потока на форму границы раздела фаз оказывает влияние поток массы при испарении жидкости. Расход пара увеличивается по мере приближения к свободной поверхности жидкости, тогда как гидростатический перепад уменьшается, а кривизна поверхности не только уменьшается, но и меняет знак, то есть поверхность раздела фаз пар – жидкость становится не вогнутой, а выпуклой.

На рис. 2 представлены результаты расчета для нагревателя $R_w = 5$ мм, погруженного в воду. На глубине межфазная поверхность повторяет форму нагревателя, образуя полусферический сегмент. При приближении к свободной поверхности жидкости толщина паровой пленки увеличивается, тепловой поток на межфазной поверхности уменьшается.

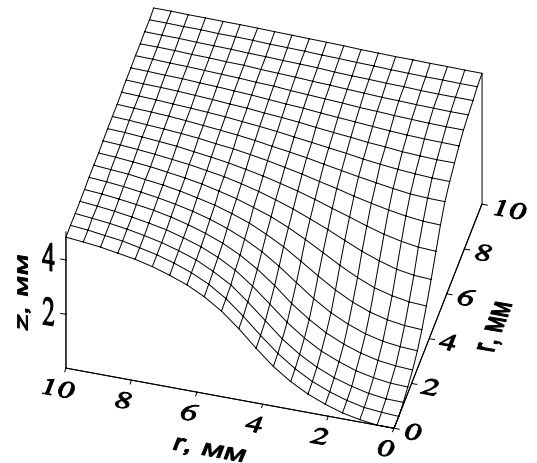


Рис. 2. Вид межфазной поверхности $T_w = 500^\circ\text{C}$

На рис. 3–5 представлено соответствующее изменение параметров пара по сечению пленки. С увеличением температуры нагревателя тепловой поток на межфазной поверхности увеличивается, также как и доля теплоты, затрачиваемая на испарение жидкости. Вместе с тем, кривизна границы раздела фаз пар – жидкость и давление пара в пленке меняются незначительно. Кривизна меняет знак, когда главные радиусы кривизны равны между собой и противоположны по знаку. В лобовой точке главные радиусы кривизны равны между собой. Форма межфазной поверхности оказывается непростой, определяется неравновесными условиями.

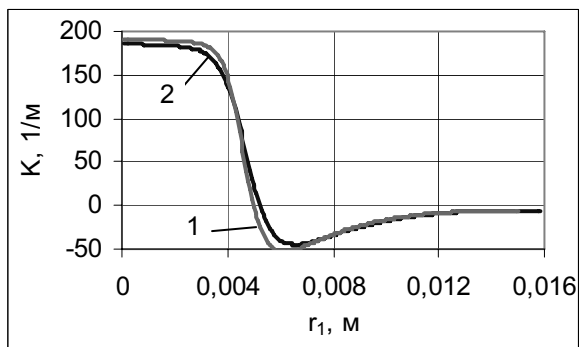


Рис. 3. Кривизна межфазной поверхности: 1 – $T_w=500^\circ\text{C}$; 2 – $T_w=700^\circ\text{C}$

Давление пара определяется с одной стороны эффектами на межфазной поверхности, с другой стороны – гидростатической разностью давлений и лапласовским скачком на границе раздела фаз пар – жидкость.

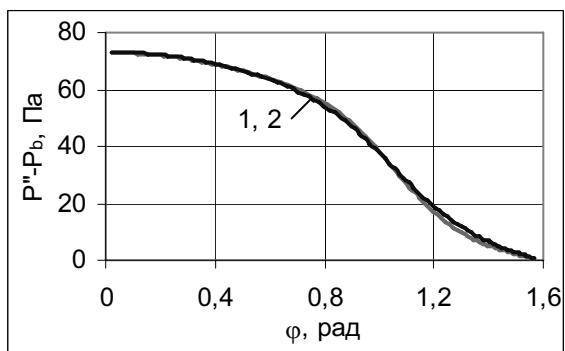


Рис. 4. Давление пара: 1 – $T_w=500^\circ\text{C}$; 2 – $T_w=700^\circ\text{C}$

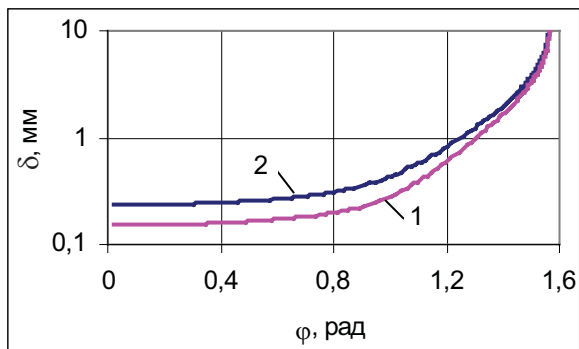


Рис. 5. Толщина паровой пленки: 1 – $T_w=500^\circ\text{C}$; 2 – $T_w=700^\circ\text{C}$

Наиболее сильное влияние температуры нагревателя выявляется на параметрах лобовой точки: расстоянии от нижней точки межфазной поверхности до свободной поверхности жидкости h_0 и соответствующей толщине паровой пленки $\delta_0=h_0-R_w$. Так при $T_w=700^\circ\text{C}$ радиус кривизны в лобовой точке составляет 5.4 мм, а при $T_w=500^\circ\text{C}$ – 5.26 мм. Размер области деформации жидкости составляет около 15 мм, что в три раза превышает радиус нагревателя.

3.2. Оценка границ применимости

Оценка плотности второго критического теплового потока для воды дает значение $3 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$. В лобовой точке межфазной поверхности при $T_w=500^\circ\text{C}$ тепловой поток составляет $1.12 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$, соответствующая величина коэффициента теплоотдачи $280 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$. Лучистая составляющая теплового потока от нагревателя к межфазной поверхности $1.92 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$ не превышает 17.2 %. В результате расчета теплоотдачи при пленочном кипении на погруженных сферах по рекомендациям, предложенным в [6], получено значение $216 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$. Скачки температур на межфазных поверхностях пар – жидкость и пар – нагреватель при коэффициенте энергетической аккомодации в последнем случае 0.5 дают значения $1.24 \cdot 10^{-3} \text{ K}$ и $3.9 \cdot 10^{-3} \text{ K}$ соответственно.

Параметр неравновесности \bar{q} , оцениваемый по плотности теплового потока в лобовой точке, равен $1.88 \cdot 10^{-3}$. В [1] отмечается, что «при значениях параметра неравновесности \bar{q} меньших, чем 10^{-3} , квазиравновесная схема ($T''=T'=T_s(P'')$ на границе раздела фаз) обеспечивает достаточную для инженерных расчетов точность». Следует подчеркнуть, что в рамках допущения о постоянстве температуры межфазной поверхности T' квазиравновесная схема не позволяет определить изменение давления пара по сечению пленки, обусловленное действием поля силы тяжести. Вместе с тем, в экспериментах [3] было получено, что уменьшение температуры ванны приводит к увеличению области деформации жидкости и к изменению кривизны межфазной поверхности вблизи свободной границы. Оценка составляющей конвективного переноса тепла в пленке дает значение $1.8 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$, по жидкости – $7.1 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$ при располагаемой разности температур 40°C . Таким образом, теплоперенос в жидкости, который зависит в первую очередь от недогрева, влияет на распределение потоков теплоты на межфазной поверхности. В дальнейшем планируется расширить границы применимости модели с учетом изменения температуры межфазной поверхности и доли теплового потока γ , расходуемого на испарение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для определения формы стационарной осесимметричной межфазной поверхности, образовавшейся при погружении шарового нагревателя в жидкость, разработана методика расчета, описание процессов переноса на границе раздела фаз пар – жидкость в которой основано на преобразовании системы уравнений, включающей универсальное условие совместности по потоку импульса и неравновесное граничное условие. В результате численного решения созданной математической модели для граничных условий первого рода получены зависимости прогиба межфазной поверхности от расстояния до оси нагревателя для полусферического нагревателя диаметром 1 см при тепловой нагрузке $q_w \sim 10^5 \text{ Вт/м}^2$, погруженного в воду. Показано, что кривизна проницаемой для потока массы стенки паровой пленки зависит от теплового потока.

Использование в математическом описании неравновесных граничных условий позволяет решать сопряженные задачи с учетом особенностей процессов переноса на межфазных поверхностях пар – жидкость.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №05–02–16859) и гранта президента Российской Федерации по поддержке ведущих научных школ НШ–7763.2006.8.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

γ – доля теплового потока на испарение;
 δ – толщина пленки, м;
 φ – угол, рад;
 η – вязкость, Па·с;
 ρ – плотность, кг/м^3 ;
 σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;
 g – ускорение свободного падения, м/с^2 ;

h – вертикальное расстояние от зеркала жидкости до межфазной поверхности, м;
 j – плотность потока массы, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;
 K – кривизна поверхности, $1/\text{м}$;
 L – теплота парообразования, Дж/кг;
 P – давление, Па;
 q – плотность теплового потока, Вт/м^2 ;
 R – индивидуальная газовая постоянная, Дж/(кг·К);
 R_i – радиус, м;
 r – радиальная координата, м;
 T – температура, К;
 w – скорость, м/с;
 z – вертикальная координата, м.
Индексы:
 b – параметры на удалении;
 s – параметры на линии насыщения;
 w – параметры нагревателя;
 θ – на оси z ;
 $'$ – параметры жидкости;
 $''$ – параметры пара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лабунцов Д.А., Ягов В.В.** Механика двухфазных систем. М.: Издательство МЭИ, 2000. 304с.
2. **Селянинова Ю.Ю. Крюков А.П.** Определение формы осесимметричной межфазной поверхности в сильнонервновесных условиях // Труды XV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках». М.: Издательство МЭИ, 2005. Т. 1. С. 272–275.
3. **Поведение** паровой пленки на сильно перегретой поверхности, погруженной в недогретую воду / В.С. Григорьев и др. // ТВТ. 2005. Т. 43. № 1. С. 100–114.
4. **Гидромеханика** невесомости // Под. ред. А.Д. Мышкица. М.: Наука, 1976. 506 с.
5. **Муратова Т.М., Лабунцов Д.А.** Кинетический анализ процессов испарения и конденсации // ТВТ. 1969. Т. 7. №5. С. 959-967.
6. **Аметистов Е.В., Клименко В.В., Павлов Ю.М.** Кипение криогенных жидкостей. М.: Энергоатомиздат, 1995. 400 с.