

На правах рукописи

Биглари Моджтаба

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В ПАРОВЫХ
ПЛЕНКАХ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
НАГРЕТЫХ ТЕЛ С КРИОГЕННЫМИ ЖИДКОСТЯМИ**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2004

Работа выполнена на кафедре низких температур Московского энергетического института (технического университета)

Научный руководитель: д.т.н., проф. Крюков Алексей Павлович

Официальные оппоненты:

д.т.н. проф. Ягов Виктор Владимирович

к.т.н. Ивочкин Юрий Петрович

Ведущая организация: ОАО «Криогенмаш»

Защита состоится “ ” января 2005 года в часов минут на заседании диссертационного совета Д 212.157.04 при Московском энергетическом институте (техническом университете) по адресу: Москва, Красноказарменная ул., д. 17, корп. Т, кафедра инженерной теплофизики, комн. Т-206

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ (ТУ)

Отзывы на автореферат просим направлять по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, Ученый совет МЭИ (ТУ)

Автореферат разослан “ ” декабря 2004 года

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.157.04

к.ф.-м.н., доцент

В.И. Мика

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Образование паровых пузырьков и пленок на поверхности горячих тел, погруженных в жидкость, очень часто встречается в промышленности. Так, например, такие процессы используются для размельчения камней в почках с помощью акустики, ультразвуковой чистки, лазерной хирургии и, наконец, в принтерах.

В некоторых случаях это явление отрицательно влияет на работу системы. В качестве примера при охлаждении сверхпроводящих магнитов в He-II образование пленки пара на поверхности магнита уменьшает интенсивность теплоотдачи. В ядерной технологии, в процессе плавления металлов и производстве бумаги при сжижении природного газа образование пленки пара на горячей поверхности может приводить к катастрофическим последствиям (паровой взрыв).

Во всех таких ситуациях процессы переноса через межфазную поверхность могут реализовываться в неравновесных условиях, кроме того, возможно изменение температуры жидкости вблизи границы раздела фаз.

В настоящее время процесс эволюции паровой пленки на поверхностях горячих тел, погруженных в относительно холодные жидкости, с учетом неравновесных эффектов и эффектов изменения температуры межфазной поверхности исследован недостаточно полно и требует создания подходящей методики для такого исследования.

Цель и задачи работы. Целью настоящей работы была разработка модели эволюции паровой пленки на поверхности относительно горячих объектов, погруженных в криогенные жидкости, при их остывании с учетом неравновесных эффектов на межфазной поверхности пар-жидкость, а также с учетом изменения температуры межфазной поверхности. На базе разработанной модели провести исследование влияния различных параметров на эволюцию пленки пара.

Для достижения этой цели в работе решены следующие задачи:

- проведено исследование эволюции паровой пленки на поверхности горячего шара, погруженного в He-II с учетом его остывания;
- исследована устойчивость паровой пленки на поверхности горячего шара, погруженного в He-II;
- исследована эволюция паровой пленки, образующейся на поверхности капли воды, погруженной в жидкий метан.

Научная новизна. Получены новые данные о режиме расширения и схлопывания пленки пара на поверхности горячего шара, погруженного в He-II, и определены режимы, при которых отсутствуют колебания паровой пленки.

Определена область устойчивости паровой пленки, образованной на поверхности нагретого тела, погруженного в сверхтекучий гелий.

Получены новые данные об эволюции паровой пленки на поверхности капли воды, погруженной в жидкий метан, с учетом изменения температура межфазной поверхности пар-жидкость.

Практическая ценность. Разработанная методика численного расчета может быть использована при исследовании динамики паровой пленки, образующейся на поверхности горячих тел, погруженных в жидкость, и математическом моделировании явления парового взрыва в результате попадания горячих тел в относительно холодную жидкость.

Достоверность полученных результатов подтверждается проведенным многократным тестированием отдельных элементов используемых алгоритмов и всей задачи в целом. Кроме этого, достоверность некоторых полученных результатов подтверждается сравнением с экспериментальными данными по эволюции паровой пленки.

Автор выносит на защиту методику численного расчета тепломассопереноса на межфазной поверхности пар-жидкость в He-II и в обычной криогенной жидкости (например жидкий метан), учитывающую неравновесные эффекты на межфазной поверхности пар-жидкость, изменение температуры этой поверхности, ее движение, а также охлаждение горячего тела, погруженного в жидкость в результате теплоотдачи от него.

Апробация работы. Результаты настоящей работы докладывались и обсуждались на IX международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2003 г.); XIV Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (Рыбинск, 2003 г.); V Минском международном форуме по тепло-и массообмену (Минск, 2004 г.).

Публикации. Материалы диссертационной работы изложены в 3 публикациях – 2 статьях и 1 тезисе.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 113 страницах машинописного текста, содержит 37 страниц с рисунками, список литературы включает 63 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проведения исследования процессов тепломассопереноса через границу раздела фаз пар-жидкость при эволюции паровой пленки на поверхностях горячих тел, погруженных в криогенные жидкости.

В первой главе описывается процесс образования паровой пленки на поверхности горячего тела в результате его контакта с холодной жидкостью, обосновывается его важность в промышленности, особенно где вероятность происхождения парового взрыва высока и подчеркивается вероятность возникновения парового взрыва при контакте сжиженного природного газа (LNG) с водой.

Дальше рассматриваются несколько теоретических и экспериментальных работ, в которых рассмотрено взаимодействие горячих объектов с холодными жидкостями. На основе обзора литературы можно сделать следующие выводы:

1) На сегодняшний день имеется сравнительно немного расчетных работ, в которых исследовано взаимодействие горячих объектов с холодными жидкостями (особенно для объектов сферической формы). Неравновесные эффекты на межфазной поверхности пар-жидкость рассматривались еще реже. В большинстве случаев для описания движения межфазной поверхности пар-жидкость использовано уравнение Рэлея. Взаимодействие относительно горячих частиц и капель (объектов) с криогенными жидкостями исследовано мало.

2) Экспериментальных работ, в которых исследована эволюция паровой пленки на поверхностях горячих тел, погруженных в жидкости, имеется также сравнительно мало, особенно для сферических нагревателей. Большая часть экспериментальных работ посвящена рассмотрению паровых пузырьков на поверхностях нагревателей. В принципе можно использовать некоторые из этих экспериментальных данных для сравнения с теоретическими (численными) результатами, полученными в настоящей работе.

В второй главе формулируются системы уравнений, описывающих эволюцию паровой пленки на поверхностях горячих объектов, погруженных в криогенные жидкости с учетом охлаждения объекта.

Постановка задачи. Предполагается, что в начале процесса на поверхности объекта существует тонкая пленка пара. Образование пленки в настоящей работе не рассматривается. Считается, что объект имеет форму шара. Если тепловой поток будет больше критического теплового потока, то рост пленки пара продолжается, в противном случае она схлопывается, а жидкость устанавливает контакт с шаром. Обе фазы

(пар и жидкость) считаются вязкими и теплопроводными. Шар, находящийся в жидкости, считается неподвижным. Предполагается, что жидкость является несжимаемой, а пленка пара в течение всего процесса сохраняет сферическую форму. Схема рассматриваемой задачи представлена на рис. 1.

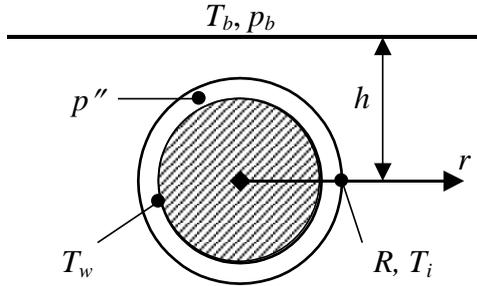


Рис. 1. Постановка задачи при заданной температуре горячего объекта.

Считаются известными: начальная температура шара T_w , температура жидкости $T_{ж}$, диаметр (радиус) шара $d_w(r_w)$, давление и температура пара над свободной поверхностью жидкости p_b и T_b , а также глубина погружения h .

Известно, что для описания процессов переноса в жидкости надо решить уравнения сохранения массы, импульса и энергии в ней. (здесь D обозначает субстанциональную производную)

$$\frac{D\rho}{D\tau} + \rho \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\vec{u}}{D\tau} = -\nabla p + \eta \nabla^2 \vec{u} + \vec{F} \quad (2)$$

$$\rho \frac{DH}{D\tau} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \hat{q} + \eta \phi \quad (3)$$

где ρ — плотность жидкости, кг/м^3 ; τ — время, с; \vec{u} — скорость, м/с; T — температура жидкости, К; p — давление, Па; \vec{F} — массовая сила (сила тяжести и т. п.), Н; λ — теплопроводность жидкости, $\text{Вт/м}\cdot\text{К}$; H — энтальпия жидкости, Дж; \hat{q} — интенсивность внутренних

источников энергии, Вт/м³; η — динамическая вязкость, Па·с; и ϕ — диссипативная функция.

При отсутствии источников энергии и малости диссипативной функции в жидкости с учетом того, что жидкость несжимаема, уравнение(3) переходит в (3.а)

$$\rho c \frac{DT}{D\tau} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (3.а)$$

Исследуемая задача рассматривается в сферической системе координат. Заметим, что в общем случае задача несимметрична, но в первом приближении ее считаем симметричной и одномерной и допустим, что изменение различных параметров происходит только радиально.

Из (1) и (2) может быть выведено уравнение, позволяющее определить положение и скорость границы раздела фаз при расширении и схлопывании паровой полости (уравнение движения межфазной поверхности пар-жидкость).

$$\ddot{R}R + \frac{3}{2}\dot{R}^2 + 4\nu\frac{\dot{R}}{R} = -\frac{1}{\rho}\left[p_b + \rho gh - p'' + \frac{2\sigma}{R}\right] \quad (4)$$

Начальные условия: $R(0) = R_0$; $\dot{R}(0) = 0$. Здесь R — текущий радиус пленки пара; $\dot{R} = dR/d\tau$ — скорость движения межфазной поверхности и $\ddot{R} = d^2R/d\tau^2$ — ее ускорение; ρ — плотность жидкости; p_b — давление пара над свободной поверхностью жидкости; p'' — давление пара внутри пленки; h — глубина центра сферы; σ — поверхностное натяжение; ν — кинематическая вязкость жидкости.

Для определения давления внутри паровой пленки используется кинетическое соотношение, связывающее это давление с тепловым потоком на межфазной поверхности пар-жидкость при отклонении от состояния термодинамического равновесия:

$$p'' = p_s(T_i) + \frac{0.44q_i}{\sqrt{2R_\mu T_i}} \quad (5)$$

где q_i — тепловой поток на межфазной поверхности; T_i — температура межфазной поверхности; $p_s(T_i)$ — давление насыщения при температуре T_i , R_μ — газовая постоянная.

Тепловой поток на межфазной поверхности q_i в предположении, что теплоперенос через пленку пара осуществляется только теплопроводностью, определяется следующим образом:

$$q_i = \lambda'' \frac{T_w(\tau) - T_i(\tau)}{R(\tau) - r_w} \frac{r_w}{R(\tau)} \quad (6)$$

где λ'' — теплопроводность пара при средней температуре.

Температура шара определяется по следующему уравнению:

$$\frac{dT_w}{d\tau} = - \frac{3\lambda'' [T_w(\tau) - T_i(\tau)] R(\tau)}{\rho_w r_w^2 c_w [R(\tau) - r_w]} \quad (7)$$

Начальное условие: $T_w(0) = T_{w0}$. Здесь ρ_w — плотность шара, c_w — его удельная теплоемкость.

В первом приближении вместо уравнения сохранения в настоящей работе используется уравнение теплопроводности в жидкости:

$$\frac{\partial^2 T_{жс}(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_{жс}(r, \tau)}{\partial r} = \frac{1}{a} \frac{\partial T_{жс}(r, \tau)}{\partial \tau} \quad (8)$$

Начальные и граничные условия: $T_{жс}(r, 0) = T_{жс0}$;

$$r \rightarrow \infty \Rightarrow T_{жс}(r, \tau) = T_{жс0}; -\lambda_{жс} \frac{\partial T_{жс}(r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=R} = q_i = \lambda'' \frac{T_w(\tau) - T_i(\tau)}{R(\tau) - r_w} \frac{r_w}{R(\tau)}.$$

Здесь $T_{жс}$ — температура жидкости, $\lambda_{жс}$ — теплопроводность и a — коэффициент температуропроводности жидкости.

Для определения толщины пленки пара и температуры шара в зависимости от времени, необходимо решить систему уравнений (4), (7) и (8). В настоящей работе решение осуществляется численно. Для решения уравнения движения межфазной поверхности используется метод Рунге-Кутты четвертого порядка точности. В диссертации подробно рассматривается метод решения системы уравнений, описывающих эволюцию паровой пленки, рассмотрены алгоритмы решения и их особенности.

В третьей главе рассмотрены особенности решения рассматриваемой задачи для сверхтекучего гелия и получены численные данные об эволюции паровой пленки на поверхности горячего металлического шара, погруженного в эту жидкость. Следует отметить, что в

сверхтекучем гелии благодаря высокой эффективности переноса тепла температуру жидкости можно считать постоянной в течение процесса. Таким образом, в этом случае можно определить положение межфазной поверхности и температуру шара в зависимости от времени с помощью решения уравнений (4) и (7).

Базовый расчет был проведен для следующих данных: $r_w = 5 \cdot 10^{-4}$ м, $T_w(0) = 78$ К, $h = 10^{-2}$ м, $\delta_0 = 10^{-4}$ м (начальная толщина паровой пленки), материал шара — сталь 12X18H10T. Поскольку теплоемкость материалов при низких температурах сильно изменяется, в расчетах используется средняя величина (при температуре 40 К). При решении были получены зависимости радиуса паровой пленки, температуры стального шара и давления пара внутри пленки от времени. Результаты решения показаны на рис. 2. Видно, что изменения радиуса пленки пара носят колебательный характер

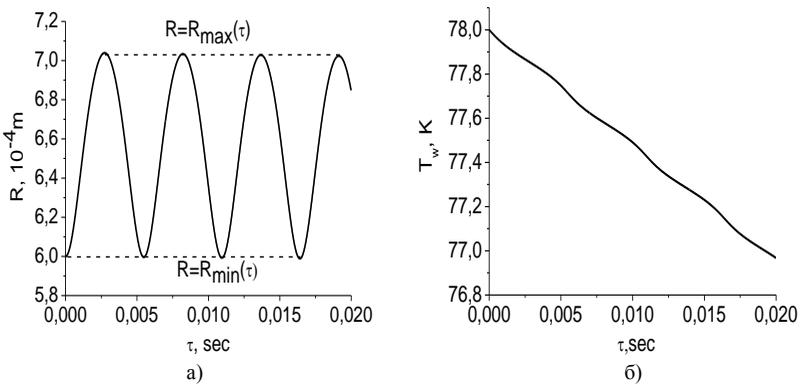


Рис. 2. Решение задачи для базовых данных: а) изменение радиуса пленки пара, б) зависимость температуры шара от времени.

Среди различных параметров, влияющих на эволюцию паровой пленки важным является глубина погружения шара. На рис. 3 показано влияние этого параметра на характер эволюции, для зависимости радиуса паровой пленки представлены огибающие, а также приводится зависимость температуры шара от времени. Видно, что с увеличением глубины погружения происходит сначала уменьшение амплитуды колебаний; при $h = 1,639 \cdot 10^{-2}$ м для базовых данных амплитуда становится равной нулю, соответственно, колебания прекращаются. При этой глубине пленка пара линейно схлопывается. При дальнейшем увеличении глубины погружения начальная амплитуда меняет знак, т.е.

колебания развиваются так, что сначала происходит уменьшение толщины пленки, а затем ее увеличение (см. рис.3.)

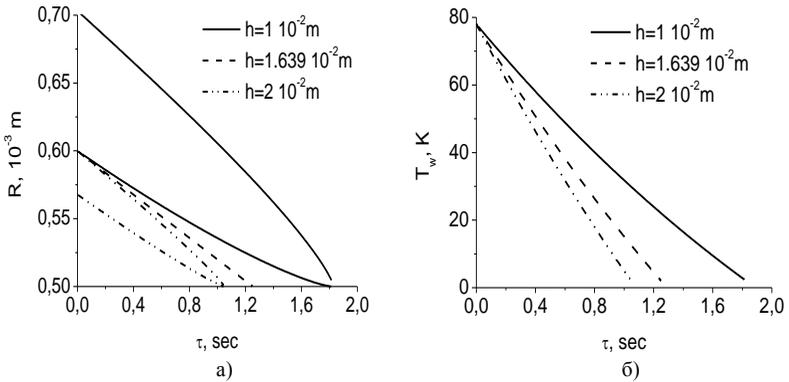


Рис. 3. Зависимости параметров от времени при различных глубинах погружения: а) радиус паровой пленки; б) температура стального шара.

В четвертой главе рассмотрены особенности решения рассматриваемой задачи для жидкого метана и получены численные данные об эволюции паровой пленки на поверхности капли воды, погруженной в эту жидкость.

Предполагается, что на некоторой глубине h находится неподвижная капля воды, имеющая форму сферы с радиусом r_w . Считается, что в начале процесса температура капли равна 273,15 К и остается неизменной в течение всего процесса. Также считается, что капля сохраняет свой размер и форму. Давление над свободной поверхностью метана равно атмосферному, таким образом, являются заданными следующие параметры: p_s , T_s , h , δ , $T_{ж}$. Требуется определить зависимость радиуса паровой пленки, скорости межфазной поверхности и давления внутри пленки пара от времени. В отличие от сверхтекучего гелия, для которого температуру жидкости в рассматриваемой задаче можно считать постоянной, для метана необходимо решение уравнения теплопроводности (8).

Определение давления насыщения метана в зависимости от его температуры осуществляется с помощью следующего соотношения¹⁾:

¹⁾ Friend D.G., Ely J.F., Hepburn I., Thermophysical Properties of Methane, Journal of Physical and Chemical Reference Data, Vol.18, No.2, p.583-638, 1989.

$$p_{sat}(T) = p_c \exp \left[H_1 T^* / (1 - T^*) + H_2 T^* + H_3 T^{*1.9} + H_4 T^{*2} + H_5 T^{*3} \right] \quad (9)$$

где $T^* = (T_c - T) / T_c$; p_{sat} — давление насыщения, Па; T — температура насыщения, соответствующая p_{sat} , К; p_c — критическое давление метана, Па; T_c — критическая температура, К; $H_1 = -6,589879$, $H_2 = 0,6355175$, $H_3 = 11,31028$, $H_4 = -10,38720$, $H_5 = 3,393075$.

Если время замерзания больше рассматриваемого в работе времени эволюции паровой пленки, можно считать, что температура капли в ходе процесса не изменяется. Время полного замерзания капель воды можно определить, используя результаты решения задачи Стефана. Например, для капель радиусом 0,5 мм и 2,5 мм время замерзания в жидком метане при атмосферном давлении равняется соответственно 0,037 с и 0,92

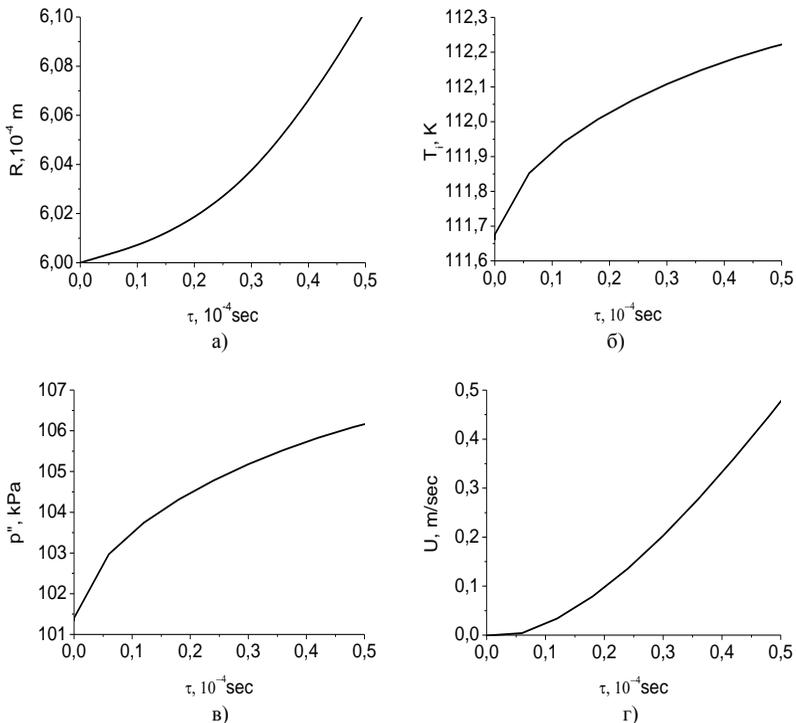


Рис.4. Результаты решения задачи для базовых данных: а) изменение радиуса пленки пара, б) температура межфазной поверхности, в) давление пара внутри пленки, г) скорость межфазной поверхности в зависимости от времени.

Зависимость радиуса паровой пленки, температура и скорость межфазной поверхности, и давление пара внутри пленки в этом случае определяются с помощью решения системы уравнений (4) и (8). Величина $p_s(T_i)$ определяется по соотношению (9).

Результаты, представленные на рис. 4, были получены для капли воды с температурой 273,15 К, погруженной в жидкий метан. Базовый расчет был проведен для следующих данных: $r_w = 5 \cdot 10^{-4}$ м; $T_w = 273,15$ К; $T_b = 111,66$ К; $h = 2 \cdot 10^{-1}$ м; $\delta_0 = 1 \cdot 10^{-4}$ м. Видно, что в отличие от сверхтекучего гелия колебания межфазной поверхности отсутствуют.

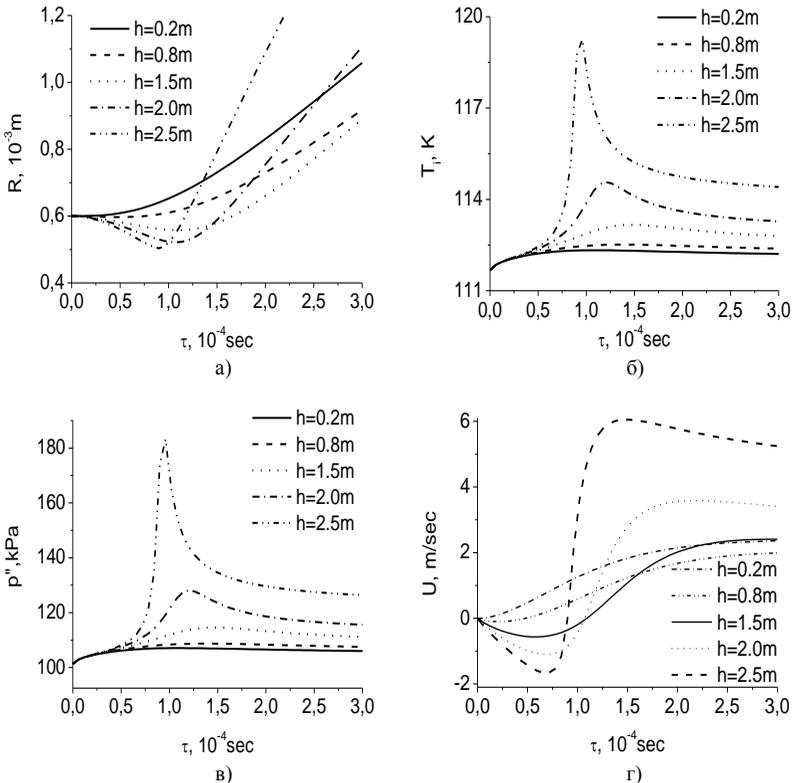


Рис. 5. Зависимости параметров от времени при различных глубинах погружения капли воды в жидкий метан: а) радиус паровой пленки; б) температура межфазной поверхности пар-жидкость; в) давление пара внутри пленки; г) скорость межфазной поверхности.

Примеры результатов для различных значений глубины погружения показаны на рис. 5. Результаты получены для тех же исходных данных, что и на рис. 4 (за исключением h). В течение того интервала времени, для которого приведены результаты на рис. 4, капля воды не может значительно проникнуть в объем жидкого метана, то есть можно допустить, что капля неподвижна. Но поскольку глубина h является важным параметром в уравнении движения межфазной поверхности (4), целесообразно рассмотреть влияние глубины погружения капли воды в жидкий метан. Предполагается, что капля с самого начала находится на определенной глубине. По рис. 5 видно, что глубина погружения сильно влияет на рост паровой пленки, изменение температуры и скорости межфазной поверхности, давление пара внутри пленки.

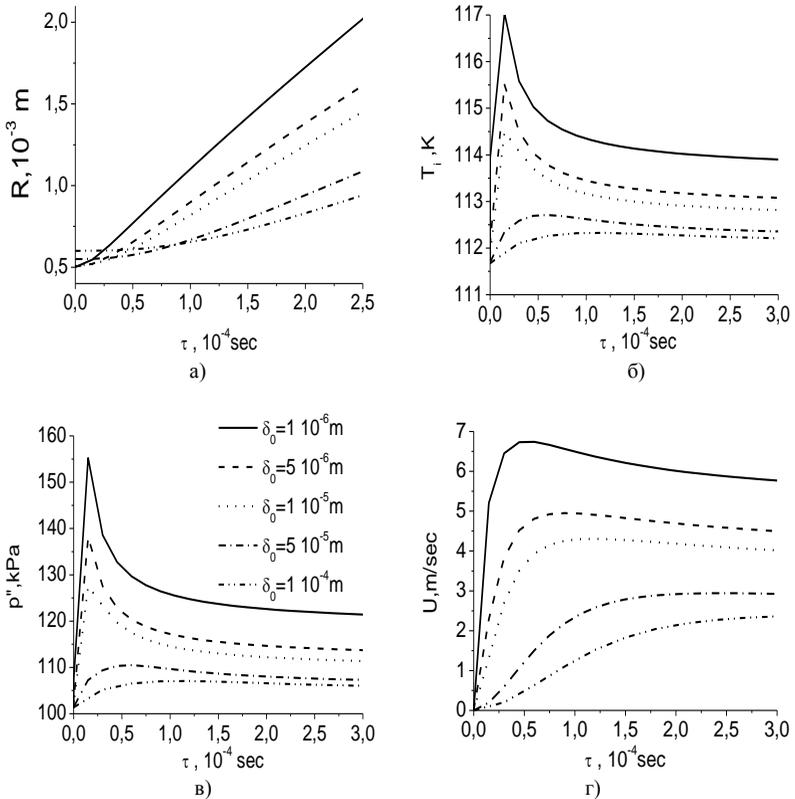


Рис. 6. Зависимости параметров от времени при различных значениях начальной толщины: а) радиус паровой пленки; б) температура межфазной поверхности пар-жидкость; в) давление пара внутри пленки; г) скорость межфазной поверхности.

На рис. 6 показано влияние начальной толщины пленки пара. Результаты получены для тех же исходных данных, что и на рис. 4 (за исключением начальной толщины пленки). Видно, что с уменьшением начальной толщины пленки пара, изменение основных параметров происходит сильнее.

Далее в этой главе приводится сравнение полученных результатов с экспериментами. В литературе не удалось обнаружить таких экспериментальных данных по пленочному кипению жидкого метана, с которыми можно было бы непосредственно сопоставить расчетные данные. В связи с этим для проверки предложенной модели проводилось сравнение с экспериментальными данными для «взрывного парообразования» на погруженной в воду тонкой платиновой проволоке в результате подачи на нее кратковременного электрического импульса². Экспериментальная зависимость радиуса паровой пленки от времени построена по представленным в работе фотографиям. В данном случае нагреватель имеет не сферическую, а цилиндрическую форму. В связи с этим основные уравнения должны быть записаны в цилиндрических координатах.

При моделировании весь процесс разбивается на три этапа:

1 этап: теплопроводность в жидкости, пока ее температура не достигает температуры начала кипения. В этот момент образуется пленка пара.

2 этап: рост паровой пленки в жидкости в течение продолжительности электрического импульса. В это время тепловой поток на поверхности нагревателя равен $1,35 \cdot 10^9$ Вт/м².

3 этап: рост паровой пленки в жидкости после выключения нагревателя. Тепловой поток обеспечивается разностью температур между нагревателем и межфазной поверхностью пар-жидкость. С учетом температуры нагревателя, температуры межфазной поверхности и толщины пленки пара в этом моменте, тепловой поток на поверхности нагревателя равен $8,9 \cdot 10^5$ Вт/м².

Сравнение расчетных результатов с экспериментальными данными показано на рис. 7. Видно, что предложенная модель дает результаты, достаточно хорошо согласующиеся с экспериментом.

²⁾ Glod S., Poulidakos D., Zhao Z., Yadigaroglu G., An investigation of micro scale explosive vaporization of water on an ultrathin Pt wire, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.45, p.367-379, 2002.

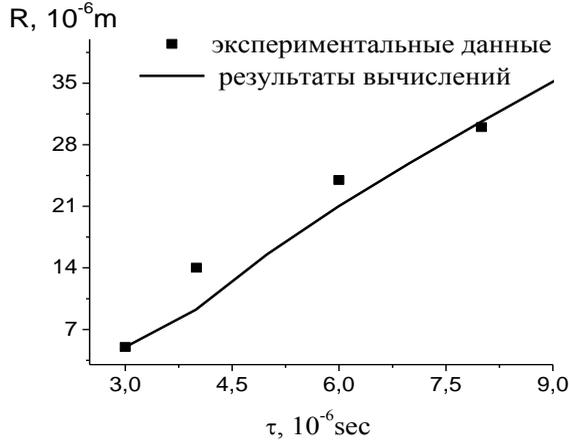


Рис.7. Сравнение расчетных результатов с экспериментальными данными.

В пятой главе рассмотрена устойчивость стационарного решения задачи об определении толщины паровой пленки на поверхности горячего шара, погруженного в сверхтекучий гелий. Приняты те же допущения, что и в главе 2. Кроме того, предполагается, что температура шара все время постоянна. Из уравнений (4 – 6) выводится основное уравнение, описывающее движение межфазной поверхности. В безразмерном виде оно записывается следующим образом:

$$\ddot{R}R + \frac{3}{2}(\dot{R})^2 + \frac{4}{\text{Re}} \frac{\dot{R}}{R} = \frac{0.44 \text{La} \lambda (T_w - T_i) r_w}{(R - r_w) R \sqrt{T_i}} - \frac{h}{Fr} - \frac{2}{RWe} \quad (10)$$

В уравнении (10) величины Re, Fr, We и La соответственно обозначают числа Рейнольдса, Фруда, Вебера и Лабунцова, которые определяются следующим образом:

$$\text{Re} = \frac{m_r m_U}{\nu} = \frac{r_w}{\nu} \sqrt{\frac{p_b}{\rho}}; \quad \text{Fr} = \frac{m_U^2}{g m_r} = \frac{p_b}{\rho g r_w}; \quad \text{We} = \frac{m_p m_U^2 m_r}{\sigma} = \frac{p_b r_w}{\sigma};$$

$$\text{La} = \frac{m_q}{m_p \sqrt{2 R_\mu m_r}} = \lambda \frac{T_b}{r_w} \cdot \frac{1}{p_b \sqrt{2 R_\mu T_b}}$$

Здесь m_i — масштаб переменной i . Для рассматриваемой задачи выбраны в качестве масштабов следующие значения: $m_r = r_w$; $m_T = T_b$; $m_p = p_b$; $m_\rho = \rho$ и $m_\lambda = \lambda$.

При решении уравнения (10) при различных глубинах погружения шара и приведения результатов к размерному виду получены зависимости радиуса паровой пленки от времени, представленные на рис.8.

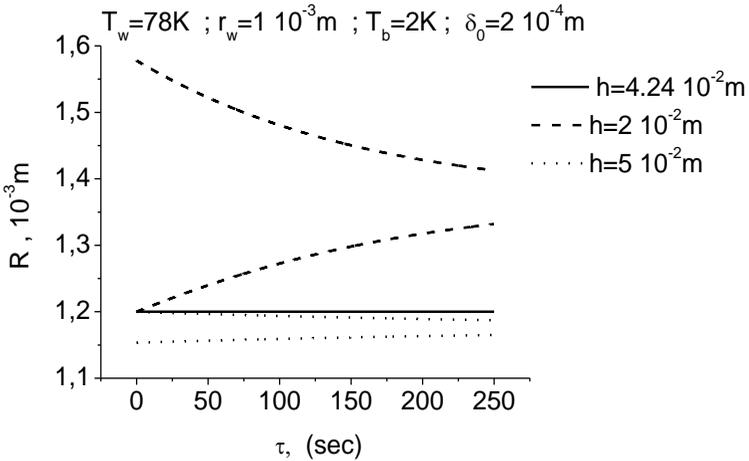


Рис.8. Зависимости радиуса пленки пара при различных глубинах погружения.

Легко видеть, что колебания межфазной поверхности затухают, и через определенное время радиус пленки пара достигает стационарного значения. При определенной глубине радиус паровой пленки является постоянной величиной и не зависит от времени.

Стационарное значение радиуса пленки можно определить, положив в уравнении (10) $\dot{R} = \ddot{R} = 0$. В безразмерном виде:

$$0 = \frac{0.44\text{La}\lambda(T_w - 1)}{(R_0 - 1)R_0} - \frac{h}{\text{Fr}} - \frac{2}{\text{We}R_0} \quad (11)$$

В размерном виде:

$$R_0 = r_w \frac{\lambda''(T_w - T_b)/(R_0 - r_w)}{2.27 \sqrt{2R_0 T_b} [\rho g h + 2\sigma/R_0]} \quad (12)$$

В общем случае задача об устойчивости не является одномерной. Однако при малой толщине пленки пара представляется возможным в первом приближении рассматривать задачу в одномерной постановке и предположить, что имеют место только возмущения радиуса пленки: $R = R_0 + \tilde{R}$, где \tilde{R} — возмущение (причем $\tilde{R} \ll R_0$), R_0 — стационарное решение. В этом случае уравнение (10) сводится к линейному однородному дифференциальному уравнению второго порядка относительно возмущения. Область устойчивости определяется следующим образом:

$$T_w > T_b \left[1 + 1.606 \frac{(R_0/r_w - 1)^2}{(2R_0/r_w - 1)} \right] \quad (13)$$

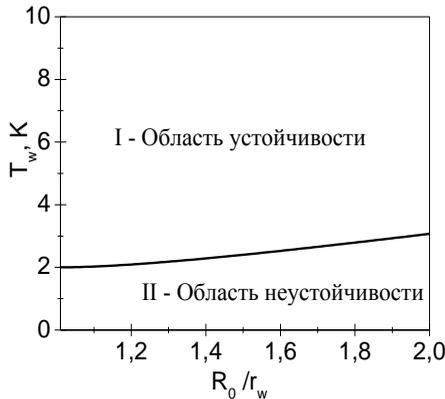


Рис.9 .Область устойчивости решения

Как правило, температура нагревателя при кипении сверхтекучего гелия такова, что если стационарное решение существует, то оно устойчиво.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Предложена методика расчета динамики паровых пленок при остывании относительно горячих объектов, погруженных в криогенные жидкости, на основе механики сплошной среды и молекулярно-кинетической теории. С учетом неравновесных эффектов на межфазной поверхности пар-жидкость определены зависимости радиуса пленки пара, скорости и температуры межфазной поверхности, давления пара внутри пленки, а также режимы охлаждения горячего шара от времени.

С помощью предложенной методики получены данные для He-II и жидкого метана.

Для He-II рассмотрено влияние различных параметров, таких как температура поверхности шара, начальная толщина пленки пара, глубина погружения и размер шара на характер протекания процесса. Выявлено, что при определенной глубине погружения существуют режимы охлаждения без колебаний. В этом случае в ходе схлопывания пленки пара ее толщина изменяется линейно. Для каждого значения температуры и размера металлического шара существует единственное значение глубины погружения, при котором не происходит колебаний межфазной поверхности пар-жидкость.

Определена область устойчивости стационарного решения задачи об эволюции пленки пара на поверхности шара, погруженного в He-II, для случая, когда температура этого шара постоянна. Показано, что если стационарное решение существует, то оно устойчиво.

При рассмотрении поведения капли воды в жидком метане в отличие от He-II в рассмотренном диапазоне задаваемых параметров колебательного режима движения межфазной поверхности не существует. Процесс роста и схлопывания паровой пленки происходит очень быстро. В отличие от He-II, для которого температура межфазной поверхности в ходе процесса не изменялась, для жидкого метана изменение этой температуры, особенно в начале процесса, значительно. В результате этого повышение давления внутри пленки происходит более интенсивно. Поэтому рост паровой пленки происходит гораздо быстрее, что может быть причиной отсутствия колебательного режима при движении межфазной поверхности.

Решение задачи об эволюции паровой пленки на поверхности капли воды, погруженной в жидкий метан, показывает, что ситуация приближается к возможности возникновения парового взрыва.

С помощью разработанной автором методики проведена интерпретация экспериментальных данных Глода С., Пуликакоса Д., Жао З., Ядигароглю Ж. (2002), полученных при кипении воды на тонких

платиновых проволоках. Получено удовлетворительное совпадение результатов, что свидетельствует о пригодности предложенной расчетной методики.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. М. Биглари, И.М. Дергунов, А.П. Крюков. Динамика паровой пленки при остывании горячих металлических сфер, погруженных в сверхтекучий гелий // Труды XIV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках». — М.: Издательство МЭИ, 2003. — Т. 1. — С. 179 — 182.
2. М. Биглари, И.М. Дергунов, А.П. Крюков. Устойчивость паровой пленки на поверхности горячего шара, погруженного в сверхтекучий гелий // Труды V Минского международного форума по тепло-и массообмену. — Минск 2004. Публикация на компакт диске. 5-05.
3. М. Биглари, И.М. Дергунов А.П. Крюков. Кипение сверхтекучего гелия на поверхности горячих металлических сфер// Труды IX международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Тезисы докладов. — М.: Издательство МЭИ, 2003. — Т. 3. — С. 25.