

На правах рукописи

Селянинова Юлия Юрьевна

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА
НА МЕЖФАЗНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ПАР – ЖИДКОСТЬ**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2005

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Крюков Алексей Павлович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
Синкевич Олег Арсеньевич
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Ивочкин Юрий Петрович

Ведущая организация:

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН

Защита состоится “.....” декабря 2005 года в часов 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, ауд. 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 “.....” 2005 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.157.04
к.ф.-м.н., доцент

В.И. Мика

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время особое внимание исследователей привлекают сильнонеравновесные процессы, характеризующиеся значительными тепловыми потоками и, как следствие, высокими разностями температур. При этом температура источника теплоты может в несколько раз превышать критическую температуру рабочей жидкости. Подобного рода процессы могут осуществляться при отклонении от безопасного режима работы теплообменной аппаратуры различного назначения или при паровом взрыве.

В большинстве расчетно-теоретических моделей форма межфазной поверхности, как правило, задается, для пузырей – близкая к сферической, для пленок – цилиндрическая. В условиях искажающего влияния гравитационных сил происходит видоизменение паровых структур, что ведет к появлению сложных многофакторных процессов тепломассопереноса, например шумового кипения сверхтекучего гелия при больших глубинах погружения нагревателя. Это приводит к невозможности точного обеспечения желаемых режимных параметров процесса, в частности такого, например, как близость температуры к температуре λ -точки.

В условиях невесомости из-за отсутствия сил, препятствующих росту пленки, неограниченное увеличение ее делает невозможным детальное исследование процессов переноса на межфазной поверхности. В связи с этим представляет интерес пористая структура, которая, оставляя возможность для тепломассопереноса в жидкости, ограничивает неконтролируемый рост парового пространства.

Цель и задачи работы. Главной целью работы является исследование в ряде прикладных задач особенностей процессов переноса на межфазных поверхностях различной формы с учетом неравновесных эффектов вблизи границы раздела фаз пар - жидкость. В соответствии с этим в работе ставятся следующие задачи:

- анализ двухфазных систем по взаимной направленности потоков тепла и массы на межфазной поверхности и ее проницаемости в зависимости от геометрии и расположения нагревателя;
- получение результатов расчета роста паровой пленки на поверхности цилиндрического нагревателя с рассмотрением различных факторов, обуславливающих соответствующее движение жидкости;
- решение задачи об определении формы осесимметричной межфазной поверхности, образованной при погружении горячего шара в холодную жидкость;
- обоснование созданной модели экспериментальной ячейки для исследования кипения сверхтекучего гелия в условиях невесомости.

Научная новизна. Сформулировано математическое описание роста паровой пленки на поверхности цилиндрического нагревателя с учетом

особенностей процессов тепломассопереноса на границе раздела фаз пар - жидкость.

Получено оригинальное решение задачи об определении формы осесимметричной межфазной поверхности пар-жидкость при возмущающем воздействии теплового потока.

Впервые представлена система для обеспечения условий, необходимых для экспериментального исследования кипения гелия II в условиях невесомости. Получено оригинальное решение задачи об эволюции паровой пленки для случая, когда нагреватель расположен внутри пористого тела.

Практическая значимость работы состоит в возможности применения полученных результатов в решении следующих проблем:

- проектирование оборудования для экспериментальных исследований кипения сверхтекучего гелия в невесомости;
- определение условий возникновения парового взрыва;
- оптимизация режимов работы и конструкции теплообменных аппаратов специального назначения, в том числе капиллярных фазоразделителей, теплообменников с пористыми стенками и др.

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием уравнений механики сплошной среды и молекулярно-кинетической теории в границах их применимости, подтверждена проверкой разработанных моделей на известных задачах тепломассопереноса, а также сравнением расчетных данных с экспериментальными работами.

Автор защищает: Результаты решения задачи о росте паровой пленки на поверхности цилиндрического нагревателя. Методику расчета формы стационарной осесимметричной межфазной поверхности пар-жидкость, учитывающую неравновесные эффекты вблизи границы раздела фаз. Возможность использования пористого тела для стабилизации кипения сверхтекучего гелия в условиях невесомости.

Апробация работы. Результаты работы доложены на VIII - XI международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2002-2005 гг.); III международном семинаре по физике низких температур в условиях микрогравитации CWS-2002 (Черноголовка, 2002 г.); XIV и XV Школах-семинарах молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева (Рыбинск, 2003г., Калуга, 2005г.); V Минском Международном форуме по тепломассообмену (Минск, 2004 г.).

Публикации. Материалы данной диссертационной работы изложены в 8 публикациях – 1 статье, 3 докладах и 4 тезисах.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения и имеет объем 132 стр., включая 71 рисунок и 3 таблицы. Библиография включает 74 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, определяются предмет и методы исследования.

В главе 1 на основе существующих работ, посвященных особенностям процессов теплопереноса на межфазных поверхностях пар – жидкость, проводится классификация задач по расположению нагревателя относительно проницаемой границы раздела фаз.

Также в этой главе представлен обзор работ, связанных с проблемой движения межфазных поверхностей, который показывает, что в большинстве случаев неравновесные граничные условия не применяются. При этом основное внимание уделяется теплообменным характеристикам процессов в двухфазных системах и вероятности наступления кризисной ситуации, тогда как особенности переноса на межфазных поверхностях пар – жидкость в должной степени не принимаются во внимание.

В главе 2 рассматривается задача о росте паровой пленки на поверхности цилиндрического нагревателя радиусом R_w , погруженного в жидкость на глубину h (рис. 1). При подаче тепловой нагрузки q_w образуется паровая пленка конечного размера R_1 . Над свободной поверхностью поддерживается постоянное давление P_b . Температура жидкости T_b может быть меньше соответствующей по линии насыщения давлению P_b .

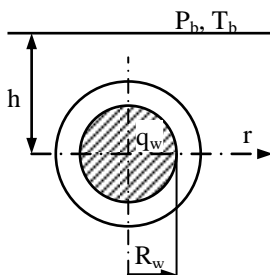


Рис. 1. Постановка задачи

Движение межфазной поверхности описывается уравнением:

$$(\ddot{R}_1 R_1 + \dot{R}_1^2) \ln \left(\frac{R_0}{R_1} \right) + \frac{(\dot{R}_1 R_1)^2}{2} \left(\frac{1}{R_0^2} - \frac{1}{R_1^2} \right) = \frac{P' - P_b}{\rho'} \quad (1)$$

где \ddot{R}_1 – ускорение движения межфазной поверхности, м/с^2 ; \dot{R}_1 – скорость, м/с ; R_0 – размер рабочего объема, м ; P' – давление жидкости вблизи межфазной поверхности, Па ; ρ' – плотность жидкости, кг/м^3 .

$$\text{Начальные условия: при } \tau = 0, R_1 = R_w, \dot{R}_1 = 0, \ddot{R}_1 = 0 \quad (2)$$

Разность давлений между паром и жидкостью:

$$P' - P_b = P'' - P_b - \rho'gh - \frac{\sigma}{R_1} - 2\eta \frac{\dot{R}_1}{R_1} \quad (3)$$

где P'' – давление пара в пленке, Па; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; σ – поверхностное натяжение Н/м; η – вязкость жидкости, Па·с.

Одним из подходов к описанию процессов тепломассопереноса в паровой пленке состоит в применении методов механики сплошной среды. При этом используется уравнение теплопроводности для пара:

$$\frac{\partial T''}{\partial \tau} = \lambda'' \left(\frac{\partial^2 T''}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T''}{\partial r} \right) \quad (4)$$

где T'' – температура пара, К; τ – время, с.

$$\text{Начальное условие: при } \tau = 0, \quad T''(0, r) = T_b \quad (5)$$

$$\text{Граничные условия: } r = R_1, \quad T''(\tau, R_1) = T' \quad r = R_w, \quad q_w = -\lambda'' \left(\frac{\partial T''}{\partial r} \right)_{r=R_w} \quad (6)$$

Выражение для давления пара получено в результате дифференцирования уравнения состояния идеального газа:

а) Часть теплового потока γ , поступающего на межфазную поверхность, идет на испарение жидкости:

$$\frac{dP''}{d\tau} = \frac{2 \left(\gamma \frac{\lambda''(T_1'')}{L} \left(\frac{\partial T''}{\partial r} \right)_{r=R_1} R_1 R T'' - P'' R_1 \frac{dR_1}{d\tau} \right)}{(R_1^2 - R_w^2)} + \frac{P''}{T''} \frac{dT''}{d\tau} \quad (7)$$

где λ'' – температура пара, Вт/(м·К); L – теплота парообразования, Дж/кг.

б) Весь тепловой поток, поступающий на межфазную поверхность, уходит в жидкость (испарения нет $\gamma = 0$):

$$\frac{dP''}{P''} = \frac{dT''}{T''} - \frac{2R_1 dR_1}{(R_1^2 - R_w^2)} \quad (8)$$

$$\text{Начальное условие: при } \tau=0 \quad P''=P_b \quad (9)$$

$$\text{Граничное условие: } \frac{dR_1}{d\tau} = V_1 \quad (10)$$

Другим подходом к описанию процессов переноса в паре является использование результатов молекулярно-кинетического анализа.

Неравновесное граничное условие позволяет установить связь давления пара в пленке с тепловым потоком на межфазной поверхности¹:

$$\frac{P'' - P_s(T')}{P_s(T')} = \frac{0.44q_w R_w}{P_s(T') R_1 \sqrt{2RT'}} \quad (11)$$

где T' – температура межфазной поверхности, К; $P_s(T')$ – соответствующее по линии насыщения давление, Па.

Результаты решения получены в приближении постоянной температуры жидкости (сверхтекучий гелий). Исходные данные: $q_w=2 \cdot 10^4 \text{Вт/м}^2$; $R_w=0.1 \text{мм}$; $h=0.02 \text{м}$; $T_b=2 \text{К}$ ($P_b=3173 \text{Па}$).

Паровая пленка не достигает стационарного состояния, в случае, когда массовый поток не равен нулю (рис. 2). Если есть прирост массы, есть и соответствующее повышение давления, которое обуславливает движение жидкости (7). Стационарное состояние может быть достигнуто в том случае, когда разность давлений между паровой пленкой и окружающей средой уравнивается суммой гидростатического напора и лапласовского скачка на границе раздела фаз.

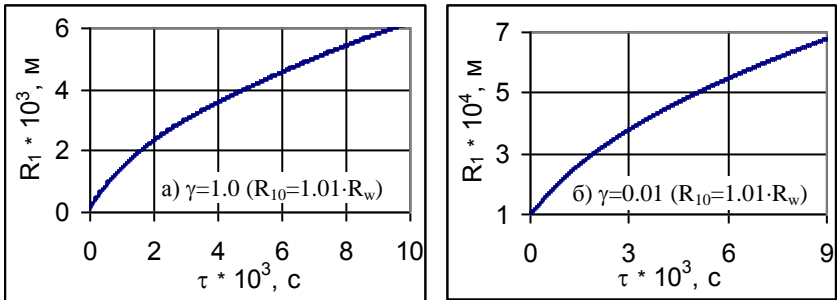


Рис. 2. Результаты решения

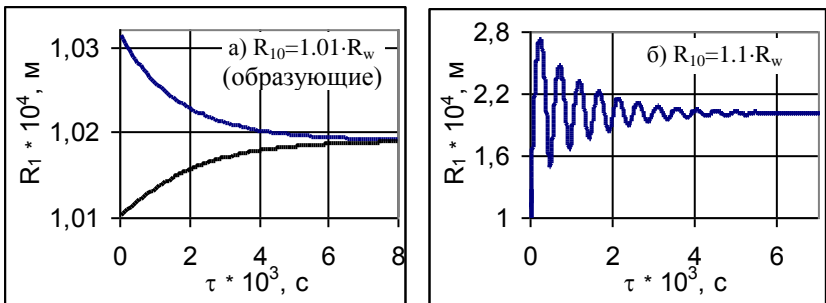


Рис. 3. Результаты решения при $\gamma=0$

¹ Муратова Т.М., Лабунцов Д.А. Кинетический анализ процессов испарения и конденсации // ТВТ. – 1969. – Т. 7, №5. – С. 959–967.

Расширение паровой пленки определяется повышением давления пара вследствие нагрева, если весь тепловой поток, поступающий на межфазную поверхность, уходит в жидкость, и испарения нет (8). Стационарное положение определяется значением начальной толщины (рис. 3).

Результаты расчета с использованием для описания процессов вблизи межфазной поверхности неравновесного граничного условия (11) показывают (рис. 4), что система достигает стационарного состояния. В данном решении не требуется задавать начальную массу пара в пленке при граничных условиях II рода.

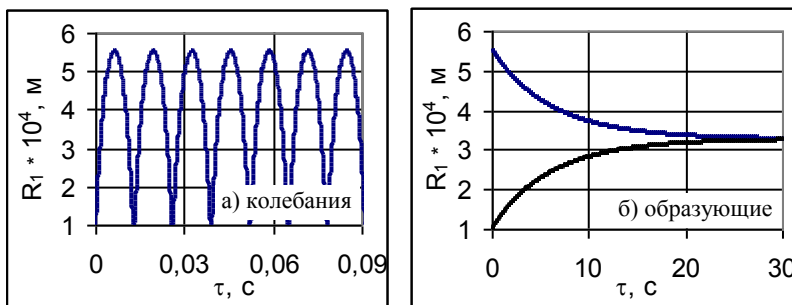


Рис. 4. Решение с использованием неравновесного граничного условия

Сравнение результатов расчета задачи с разными допущениями показывает, что качественный вид зависимости радиуса паровой пленки от времени (эволюция) зависит от способа описания процессов в паре. При этом метод, основанный на использовании специального условия совместности, позволяет определять давление в паровой пленке вне зависимости от начальных условий.

На основании модели с использованием неравновесного граничного условия проводилось сопоставление с экспериментальными данными по «взрывному парообразованию» на тонкой платиновой проволоке². При моделировании весь процесс разбивался на три стадии. а) Задача теплопроводности в жидкости. При подаче тепловой нагрузки жидкость начинает нагреваться вплоть до температуры начала кипения, соответствующей по линии насыщения внешнему (атмосферному) давлению. б) Рост паровой пленки в теплопроводной жидкости. По достижении жидкостью температуры начала кипения на поверхности нагревателя образуется паровая пленка, которая начинает увеличиваться в размерах при постоянном тепловом потоке с поверхности нагревателя. в) Рост паровой пленки в теплопроводной жидкости с выключением нагрузки на проволоке.

² Zhao Z., Glod S., Poulikakos D., Pressure and power generation during explosive vaporization on a thin film microheater // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000. – vol.43, – p.281–296.

После выключения нагревателя тепловой поток обеспечивается разностью температур между нагревателем и поверхностью жидкости.

Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными показывает качественное и количественное согласование.

В главе 3 разработана методика расчета формы осесимметричной межфазной поверхности в сильнонеравновесных условиях. При замораживании капля жидкости в качестве охлаждающей среды используются жидкие криоагенты для обеспечения высокой интенсивности процесса охлаждения. В результате может возникнуть ситуация, когда попадающие на поверхность жидкости капли имеют температуру, превышающую температуру предельного перегрева жидкости. Это приводит к следующему физическому эффекту: капли с плотностью большей, чем плотность жидкости, довольно продолжительное время (несколько десятков секунд) плавают на ее поверхности, окруженные пленкой пара. Рассматривается следующая физическая модель: шар радиусом R_w плавает в насыщенной жидкости, давление над свободной поверхностью которой равно P_b . Температура шара T_w такова, что на его поверхности образуется устойчивая паровая пленка (рис. 5).

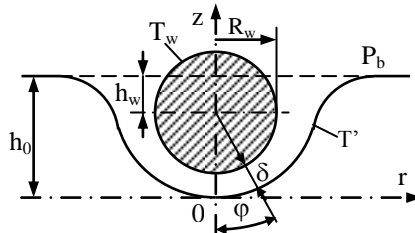


Рис. 5. Физическая модель

Принимаются следующие допущения: процессы тепломассопереноса в двухфазной системе квазистационарные. Температура межфазной поверхности T' постоянна по сечению, при этом давление насыщения, соответствующее температуре жидкости $P_s(T')$ равно давлению над свободной поверхностью жидкости P_b . Коэффициент конденсации β на межфазной поверхности равен единице. Физические свойства капли, жидкости и пара постоянны. Скачки температуры на межфазных поверхностях пар – жидкость и пар – твердое тело малы по сравнению с общей разностью температур.

Универсальное условие совместности:

$$P'' = P_b + \rho' g(h_0 - z) + 2\sigma K - \frac{j^2}{\rho_s''} \quad (12)$$

где K – кривизна межфазной поверхности, $1/m$; j – удельный массовый поток пара, $kg/(c \cdot m^2)$; ρ_s'' – плотность насыщенного пара, kg/m^3 .

Неравновесное граничное условие:

$$\frac{P'' - P_s(\Gamma')}{P_s(\Gamma')} = \frac{0.44q_1}{P_s(\Gamma')\sqrt{2RT'}} - \frac{2\sqrt{\pi}j}{\rho_s\sqrt{2RT'}} \frac{1-0.4\beta}{\beta} \quad (13)$$

Весь тепловой поток на межфазной поверхности идет на испарение ($q_1=j \cdot L$), совместное преобразование (12) и (13) при условии, что $\beta=1.0$ и $P_s(\Gamma')=P_b$ приводит к (14):

$$\rho'g(h_0 - z) + 2\sigma K - \frac{(q_1/L)^2}{\rho_s''} = \frac{q_1}{\sqrt{2RT'}} \left(0.44 - \frac{1.2\sqrt{\pi RT'}}{L} \right) \quad (14)$$

где q_1 – тепловой поток на межфазной поверхности, Вт/м².

Тепловой поток на межфазной поверхности в первом приближении определяется уравнением стационарной теплопроводности в паре для сферической геометрии задачи. Толщина паровой пленки δ определяется выражением:

$$\delta = \sqrt{(h_0 - h_w - z)^2 + r^2} - R_w \quad (15)$$

Кривизна осесимметричной межфазной поверхности K является нелинейным дифференциальным оператором второго порядка³:

$$2K = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(\frac{r \frac{dz}{dr}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dr}\right)^2}} \right) \quad (16)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} z = 0, \quad r = 0, \quad dz/dr = 0 \\ z = h_0, \quad dz/dr = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

где h_0 зависит от кривизны границы раздела фаз пар – жидкость в лобовой точке K_0 , которая определяется одним радиусом R_0 , $K_0 = 1/R_0$:

$$\rho'gh_0 + 2\sigma K_0 - \frac{(q_{10}/L)^2}{\rho''} = \frac{q_{10}}{\sqrt{2RT'}} \left(0.44 - \frac{1.2\sqrt{\pi RT'}}{L} \right) \quad (18)$$

Шар плавает на поверхности жидкости, следовательно, сила тяжести уравновешивается действием разности давлений пара под и над объектом.

Гидравлическое сопротивление парового канала:

³ Гидромеханика невесомости // Под. ред. Мышкиса А.Д. – М.: Наука, 1976. – 506с.

$$P_0'' - P_b = \int_0^{\Phi} \psi(\varphi) \frac{\bar{\rho}'' \bar{w}(\varphi)^2}{2} d\varphi \quad (19)$$

Расход пара определяется массовым потоком с межфазной поверхности в результате испарения жидкости под действием теплового потока. Коэффициент гидравлического сопротивления $\psi(\varphi)$ определяется в первом приближении по ламинарному нестабилизированному течению в трубе:

$$\psi(\varphi) = \xi \frac{R_w + \delta}{\delta} = \frac{140}{Re} \frac{R_w + \delta}{\delta} \quad (20)$$

Рассматривается плавание капли воды шаровой формы диаметром $d_w = 3$ мм в жидком азоте при атмосферном давлении $T^* = 77.4\text{K}$ (рис. 6). Радиус кривизны в лобовой точке $R_0 = 1.7\text{мм}$; расстояние от нижней точки межфазной поверхности до уровня свободной поверхности жидкости $h_0 = 2.46\text{мм}$. Масса шара (капли воды) оценивается как $m_w = 1.4 \cdot 10^{-5}\text{кг}$, что дает глубину погружения шара $h_w = 0.82\text{мм}$. Форма межфазной поверхности оказывается непростой, несмотря на внешнее сходство с задачами гидростатики принципиальное отличие приведенной двухфазной системы состоит в том, что сам анализируемый объект – паровая пленка – возникает в результате воздействия теплового потока. По мере приближения к свободной поверхности жидкости гидростатический напор уменьшается, а толщина паровой пленки увеличивается (рис. 6б).

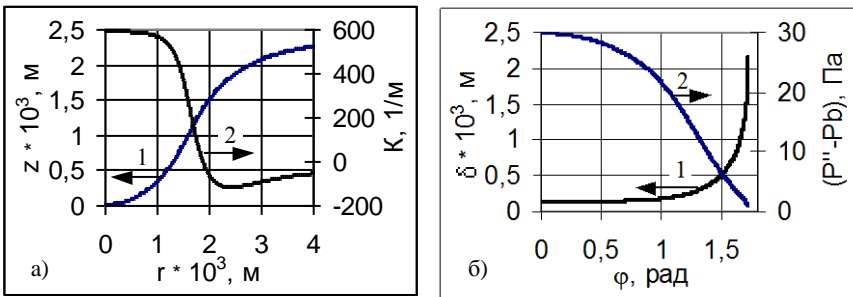


Рис. 6. Результаты расчета а) форма (1) и кривизна (2) межфазной поверхности, б) 1 – толщина пленки; 2 – разность давлений.

Результаты расчета при $T_w = 340\text{K}$ (рис. 7) показывают неплохое согласование с экспериментальными данными по плаванию горячих шаровых объектов в холодных жидкостях ⁴.

⁴ Синицын А.Г. Разработка метода расчета процесса замораживания капель применительно к криодисперсной технологии. Диссертация кандидата технических наук. М.: – МЭИ. 1990. – 142с.

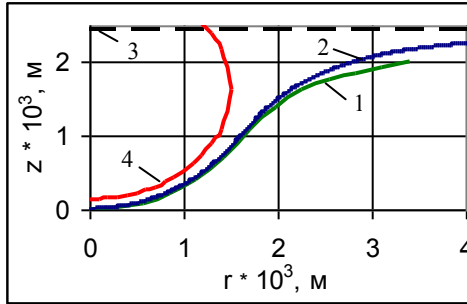


Рис. 7. Сравнение с опытными данными. 1 – экспериментальная кривая; 2 – расчет; 3 – уровень свободной поверхности жидкости; 4 – нагреватель.

В другой задаче подобного рода – экспериментальных исследованиях локальных процессов при смене режимов кипения⁵ – начальная температура горячей полусферы выбиралась из условия получения на ее поверхности устойчивого пленочного кипения воды (рис. 8). В общем случае жидкость может быть недогрета до состояния насыщения. Вследствие этого часть теплоты, поступающей от нагревателя к межфазной поверхности, распространяется по жидкости.

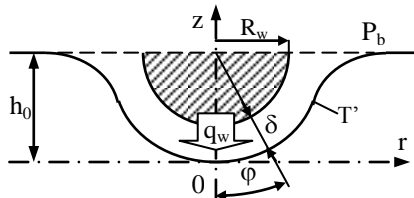


Рис. 8. Физическая модель

При этом возможно возникновение конвективных течений, обусловленных разностью температур жидкости, и, как следствие, возникающей разностью плотностей. В отличие от плавления капли воды в жидком азоте, где вся теплота, поступающая на межфазную поверхность, затрачивалась на испарение, в рассматриваемом процессе часть теплоты идет на нагрев жидкости, другая часть γ расходуется на образование пара, который движется в канале, образованном проницаемой границей раздела фаз пар – жидкость и непроницаемой поверхностью пар – нагреватель. Сравнение

⁵ Григорьев В.С., Жилин В.Г., Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Кубриков К.Г. Исследование особенностей развития и схода паровой пленки на полусферических поверхностях // CD-ROM publications. Труды V Минского международного форума по теплообмену. – ГНУ «ИТМО им.А.В. Лыкова» НАНБ. Минск, 2004. – 5-17.

результатов расчета с экспериментальными данными (рис. 9) показывает качественное согласование зависимости z от r . В эксперименте $R_w=5\text{мм}$, $T_w=270^\circ\text{C}$, $q_w=10^5\text{Вт/м}^2$. В ходе решения системы уравнений получены следующие значения характерных величин: $\gamma=37,43\%$, $\delta_0=0,035\text{мм}$, $1/K_0\approx 8,21\text{мм}$.

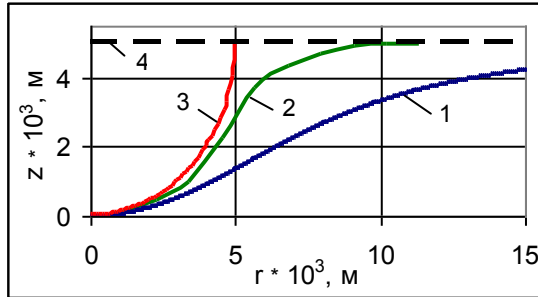


Рис. 9. Сравнение с опытными данными. 1 – расчет; 2 – экспериментальная кривая; 3 – очертания нагревателя; 4 – уровень свободной поверхности жидкости.

В главе 4 рассматривается движение сверхтекучего гелия внутри пористого тела при невесомости (рис. 10). При подаче тепловой нагрузки определенной величины на поверхности нагревателя образуется паровая пленка конечной толщины. В дальнейшем паровой объем увеличивается, заполняя внутреннюю полость пористой оболочки. Принимается, что на внешней поверхности пористого тела существует пленка жидкости вследствие хорошей смачиваемости He II. Давление пара около межфазной поверхности во внешнем объеме соответствует по линии насыщения температуре этой пленки.

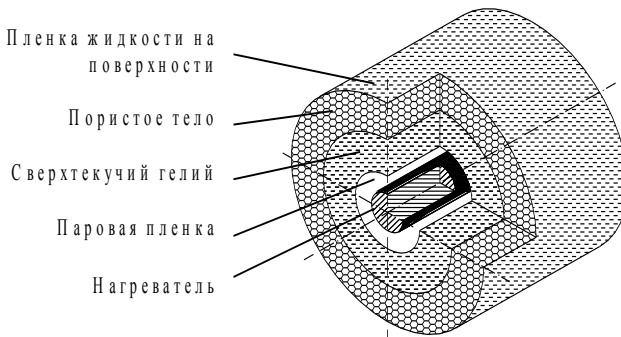


Рис. 10. Физическая модель

Для экспериментальных исследований на орбите необходимо достижение стационарного состояния паровой пленки, то есть, чтобы часть внутренней полости оболочки была заполнена жидкостью, а часть паром. При этом граница раздела фаз должна остаться видимой, как при исследованиях на Земле. Целью теоретического анализа является установление параметров пористого тела необходимых для формирования пленки конечного размера на нагревателе. Схематично модель рассматриваемой системы представлена на рис. 11.

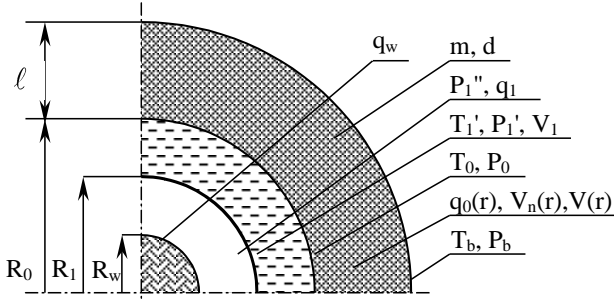


Рис. 11. Характеристики системы

Задача принимается одномерной и стационарной в кинетическом масштабе времени, жидкость считается несжимаемой, зависимость теплофизических свойств от температуры не учитывается.

Анализ движения межфазной поверхности на цилиндрическом нагревателе внутри пористой оболочки проводится на основе уравнения:

$$(\ddot{R}_1 R_1 + \dot{R}_1^2) \ln\left(\frac{R_0}{R_1}\right) + \frac{(\dot{R}_1 R_1)^2}{2} \left(\frac{1}{R_0^2} - \frac{1}{R_1^2}\right) = \frac{P_1' - P_0}{\rho'} \quad (21)$$

Начальные условия: при $\tau = 0$, $R_1 = R_w$, $\dot{R}_1 = 0$, где $\dot{R}_1 = V_1$.

Неравновесное граничное условие:

$$P_1'' = 0,5P_{s1} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\sqrt{\pi}q_1}{P_{s1}\sqrt{2RT_1'}}}\right) \quad (22)$$

Теплоперенос по жидкости в полости пористого тела описывается соотношением Гортера-Меллинка, полученным для режима взаимного трения двух компонент в стационарном состоянии:

$$q_1^3 = \frac{2}{R_1 \tilde{f}(T)} (T_1' - T_0) \left(1 - \left(\frac{R_1}{R_0}\right)^2\right)^{-1} \quad (23)$$

где $\tilde{f}(T)$ – постоянная Гортера-Меллинка, $K \cdot m^5 / \text{Вт}^3$.

Универсальное условие совместности на границе раздела фаз:

$$P_1 + \frac{\sigma}{R_1} = P_1 - 2\eta' \frac{\dot{R}_1}{R_1} \quad (24)$$

Описание тепломассопереноса при течении гелия в пористой структуре включает в себя несколько уравнений:

Термомеханическое соотношение:

$$P_b - P_0 = \rho' S (T_b - T_0) \quad (25)$$

где S – энтропия жидкости, Дж/(кг·К).

Тепловой поток в порах оболочки в первом приближении определяется текущей координатой и нагрузкой нагревателя:

$$q_0(r) = q_w \frac{R_w}{mr} \quad (26)$$

где m – пористость оболочки.

Скорость движения межфазной поверхности и скорость жидкости в капиллярах связаны между собой соотношением:

$$V_1 = V(r) \frac{mr}{R_1} \quad (27)$$

Плотность теплового потока в сверхтекучем гелии:

$$q_0(r) = \rho' S (V_n(r) - V(r)) T_0 \quad (28)$$

Уравнение Пуазейля для ламинарного движения жидкости в каналах круглого поперечного сечения:

$$P_0 - P_b = \frac{32\eta \ell V_n}{(2R_k)^2} \quad (29)$$

где R_k – радиус капилляров, м.

Для описания ламинарного течения нормальной компоненты в каналах пористой структуры используется уравнение фильтрации:

$$P_0 - P_b = \int_{R_0}^{R_0+\ell} \frac{\eta V_n(r) m}{k_{\text{пр}}} dr \quad (30)$$

где коэффициент проницаемости определяется выражением для слоя сферических засыпок:

$$k_{\text{пр}} = 5.97 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{(1-m)^2} d^2 \quad (31)$$

В качестве модели рассматривается пористое тело в виде системы прямых радиальных круглых каналов постоянного поперечного сечения. Увеличение тепловой мощности ведет к увеличению перепада давления на межфазной поверхности, обусловленного кинетическими эффектами, что приводит к

повышению разности давлений по жидкости. Пленка тем больше, чем больше тепловая нагрузка (рис. 12). За счет увеличения скорости движения межфазной поверхности, связанной со скоростью жидкости в капиллярах, быстрее достигается стационарное положение пленки.

Паровая пленка гелия на поверхности цилиндрического нагревателя коаксиального пористой оболочке может развиваться тремя путями:

- пленка не увеличивается в размерах из-за гидравлического сопротивления капилляров и действия сил поверхностного натяжения на межфазной поверхности пар – жидкость во внутреннем пространстве оболочки.

- паровая пленка увеличивается в размерах и заполняет все внутреннее пространство пористого тела, вытесняя жидкость через капилляры на внешнюю поверхность оболочки;

- по мере роста паровой пленки устанавливается соответствие между перепадом давления, действующим на жидкость, тепловым потоком в капиллярах и скоростью нормальной компоненты $He II$, что приводит к стационарному состоянию системы при постоянной толщине паровой пленки.

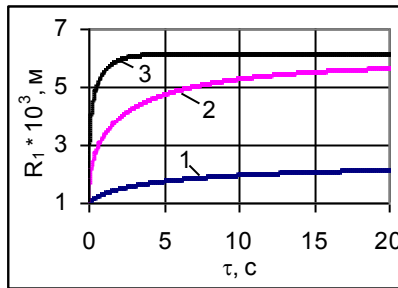


Рис. 12. Влияние тепловой нагрузки на рост паровой пленки.
 1 – $q_w = 10^2 \text{Вт/м}^2$; 2 – $q_w = 10^3 \text{Вт/м}^2$; 3 – $q_w = 10^4 \text{Вт/м}^2$.

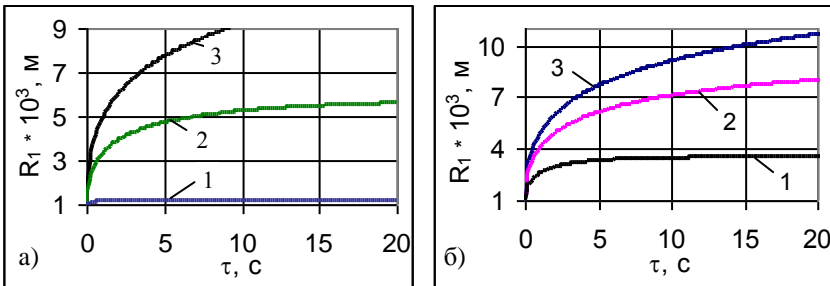


Рис. 13. Влияние гидравлического сопротивления оболочки на рост паровой пленки а) 1 – $l = 0,05 \text{м}$; 2 – $l = 0,01 \text{м}$; 3 – $l = 0,004 \text{м}$;
 б) 1 – $d = 0.1 \text{мм}$; 2 – $d = 0.08 \text{мм}$; 3 – $d = 0.05 \text{мм}$

Главной характеристикой, определяющей рост паровой пленки, является гидравлическое сопротивление пористого тела. Перепад давления по жидкости прямо пропорционален толщине оболочки (длине капилляров) и обратно пропорционален квадрату характерного размера каналов (29)-(30).

При уменьшении длины канала перепад давления в жидкости снижается и паровая область увеличивается (рис. 13а). С увеличением зерна сферических засыпок уменьшается гидравлическое сопротивление пористой оболочки (30)-(31), что приводит к увеличению стационарного значения радиуса пленки (рис. 13б).

Внешнее давление определяет, прежде всего, базовую температуру и, как следствие, теплофизические свойства жидкости. Уменьшение температуры на полградуса при уменьшении давления насыщенных паров в 6,6 раза, в свою очередь вызывает падение энтропии в 4,1 раза. Такое резкое изменение свойств рабочего тела отражается на характере эволюции паровой пленки (рис. 14).

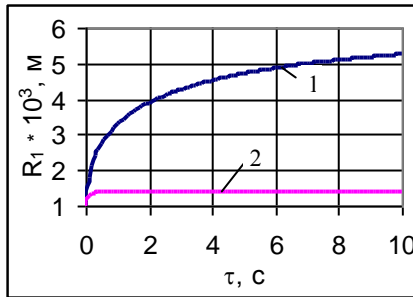


Рис. 14. Влияние температуры жидкости на рост паровой пленки:
1 – $P_b=3169\text{Па}$ ($T_b=2\text{K}$); 2 – $P_b=664.6\text{Па}$ ($T_b=1.57\text{K}$)

При росте паровой пленки в условиях невесомости отсутствуют колебания, что отличается от наземной ситуации, где пульсации являются основным динамическим процессом (рис. 15).

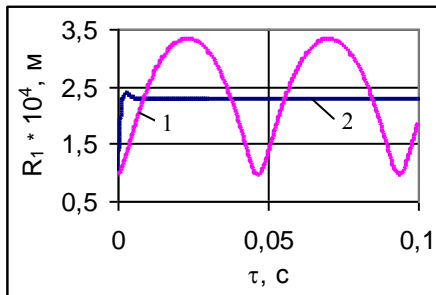


Рис. 15. Расчетное сравнение процессов: 1 – на Земле; 2 – в невесомости.

Это связано с тем, что перепад давления по жидкости связан с тепловой нагрузкой нагревателя, а также текущим положением межфазной поверхности. Система подстраивается под внешнее воздействие. На Земле в перепад давления входит составляющая, обусловленная действием поля силы тяжести и независящая от внутренних параметров системы. Затухание колебаний вызвано действием сил вязкого трения.

Оценка границ применимости по скорости нормального и сверхтекучего движений показывает, что тепловые нагрузки до $5 \cdot 10^3 \text{Вт/м}^2$ удовлетворяют условиям ламинарного течения в пористом теле.

Экспериментальных исследований по изучению эволюции паровой пленки при кипении гелия II на поверхности цилиндрического нагревателя внутри пористого тела при невесомости до настоящего времени не проводилось. Рассмотрим данные, полученные на Земле⁶. Результаты расчета динамики паровой пленки на поверхности цилиндрического нагревателя показывают (рис. 16), что колебания паровой пленки затухают, и она выходит на уровень примерно соответствующий экспериментальному значению.

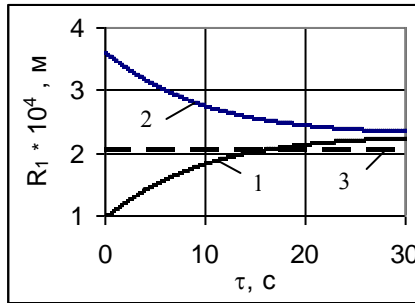


Рис. 16. Динамика паровой пленки при кипении гелия II на поверхности цилиндрического нагревателя. 1, 2 – нижняя и верхняя образующие; 3 – эксперимент.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Сопоставлены результаты расчетов динамики паровых пленок при погружении относительно горячих объектов в жидкости для методов, основанных на уравнениях механики сплошной среды и молекулярно-кинетической теории. Получены зависимости радиуса пленки пара от времени с учетом различных особенностей процессов теплопереноса, обуславливающих движение межфазной поверхности. Доля теплоты, затрачиваемой на испарение, зависит от теплообмена в жидкости. Стационарное состояние паровой пленки может быть достигнуто только при нулевом потоке массы через проникаемую границу раздела фаз пар –

⁶ Спиридонов А.Г. Экспериментальное исследование теплоотдачи к сверхтекучему гелию // Диссертация кандидата технических наук. – М.: МЭИ, 1981. – 168с.

жидкость. На основе модели, учитывающей неравновесные эффекты на межфазной поверхности пар – жидкость, проведена интерпретация опытных данных по кипению воды на тонких платиновых проволоках. Получено удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных результатов.

Разработана методика расчета формы стационарной осесимметричной межфазной поверхности, образовавшейся при погружении шарового нагревателя в жидкость. Описание процессов переноса на границе раздела фаз пар – жидкость основано на использовании универсальных условий совместности и неравновесного граничного условия. В результате численного решения системы уравнений получены параметры паровой пленки для капли воды диаметром 3 мм, имеющей комнатную температуру, плавающей в жидком азоте при атмосферном давлении, а также для медного полусферического нагревателя диаметром 0,01 м при температуре 270°C, погруженного в воду. Кривизна проницаемой для потока массы стенки паровой пленки зависит от теплового потока в отличие от задач гидростатического равновесия, где источника теплоты нет. Сопоставление расчетных кривых с экспериментальными данными показывает качественное и количественное согласование формы границы раздела фаз пар – жидкость в рассматриваемом диапазоне параметров.

Для проведения экспериментальных исследований динамики межфазной поверхности гелия II в условиях невесомости предложена схема ячейки с размещением цилиндрического нагревателя внутри коаксиальной пористой оболочки. При определенных структурных характеристиках материала пористой среды устанавливается стационарное состояние паровой пленки. Разность давлений по жидкости зависит от теплового потока. Размер паровой пленки тем больше, чем меньше гидравлическое сопротивление пористой оболочки. Сравнение результатов анализа эволюции паровой пленки на Земле и в условиях невесомости выявило принципиальное отличие характера протекания процессов тепломассопереноса, а именно отсутствие колебаний межфазной поверхности пар – жидкость в условиях невесомости. Пригодность предложенного метода подтверждается хорошим согласованием результатов расчета с экспериментом по пленочному кипению сверхтекучего гелия на Земле в стационарном режиме.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №05-02-16859).

Содержание диссертации опубликовано в следующих работах

1. Селянинова Ю.Ю., Крюков А.П. Расчет модели экспериментальной системы для изучения кипения сверхтекучего гелия в невесомости. // Восьмая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиотехника, электротехника и энергетика». Тезисы докладов. – М.: Издательство МЭИ, 2002. – Т.3. – С. 141–142.

2. Селянинова Ю.Ю., Крюков А.П. Движение межфазной поверхности He-II – пар внутри капиллярно-пористой структуры. // Девятая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиотехника, электротехника и энергетика». Тезисы докладов. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – Т.3. – С. 30–31.

3. Селянинова Ю.Ю., Крюков А.П. К расчету тепломассопереноса при кипении сверхтекучего гелия внутри структуры с регулярными каналами. // Труды XIV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» – М.: Издательство МЭИ, 2003. – Т.1. – С. 313–316.

4. Кипение He II в пористой структуре при микрогравитации: модельное представление / Дергунов И.М., Королев П.В., Крюков А.П., Селянинова Ю.Ю. // Физика низких температур (на английском языке Low temperature physics), 2003, – Т. 29; № 6. – С. 653–658.

5. Селянинова Ю.Ю., Крюков А.П. Влияние гидравлического сопротивления пористого тела на рост паровой пленки при кипении сверхтекучего гелия // Десятая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиотехника, электротехника и энергетика». Тезисы докладов. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – Т.3. – С. 27–28.

6. Селянинова Ю.Ю., Крюков А.П. Особенности тепломассопереноса при росте паровой пленки внутри пористой оболочки, заполненной гелием II. // Труды V Минского международного форума по тепломассообмену. - CD-ROM publications. Мн.: ГНУ «ИТМО им.А.В. Лыкова» НАНБ, 2004. – 5–33

7. Селянинова Ю.Ю., Крюков А.П. Подход к определению формы межфазной поверхности в условиях сильной неравновесности // Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиотехника, электротехника и энергетика». Тезисы докладов. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – Т.3. – С. 73–74.

8. Селянинова Ю.Ю. Крюков А.П. Определение формы осесимметричной межфазной поверхности в сильнонеравновесных 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.