

На правах рукописи

ДЕРГУНОВ Иван Михайлович

Исследование эволюции паровых пленок на поверхностях нагретых тел,  
погруженных в жидкости.

Специальность 01.04.14. — Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2001

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

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор КРЮКОВ А.П.

Официальные оппоненты — доктор технических наук, профессор ЯГОВ В.В.

— кандидат технических наук ИВОЧКИН Ю.П.

Ведущая организация — НПО Центральный котлотурбинный институт им. И.И. Ползунова

Защита диссертации состоится «2» декабря 2001 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.157.04 в Московском энергетическом институте (Техническом университете) по адресу: Москва, Красноказарменная ул., д. 14, малый актовй зал.

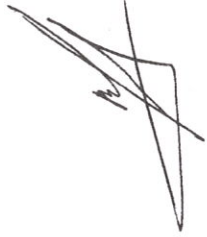
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ (ТУ).

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

Автореферат разослан «9» ноября 2001 года

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

МИКА В. И.



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** При эволюции паровой пленки, окружающей сильно нагретое тело, погруженное в жидкость, температура жидкости может значительно отличаться от температуры нагревателя. В такой ситуации перенос через межфазную поверхность может реализовываться в существенно неравновесных условиях, кроме того, возможно заметное изменение температуры жидкости вблизи границы раздела фаз.

Использовать известные расчетные модели для указанных условий не представляется возможным, поэтому существует необходимость создания методики расчета для исследования эволюции паровой пленки на горячем теле с учетом неравновесных эффектов и изменения температуры межфазной поверхности.

Изучение эволюции паровой полости на поверхности сильно нагретого тела с жидкостью в земных условиях и при микрогравитации составляет важное направление в рамках фундаментальной проблемы гидро-газодинамики и тепломассообмена, связанной с изучением явлений переноса на межфазной поверхности в условиях сильной неравновесности. Требуется корректное описание неравновесных процессов, происходящих в паре и на межфазной поверхности, обуславливает применение методов молекулярно-кинетической теории, что позволяет избежать трудностей, возникающих при использовании традиционных подходов.

**Цель работы** заключается в разработке модели эволюции паровой пленки на сильно нагретом теле, погруженном в жидкость, учитывающей неравновесные эффекты на межфазной поверхности и изменение температуры этой поверхности. Исследование на основе полученной модели влияния различных факторов и выделение наиболее значимых, изменение которых позволит управлять процессом и избежать нежелательных последствий.

**Научная новизна.** Предложена модель эволюции паровой пленки, окружающей сильно нагретое тело, погруженное в жидкость в условиях, когда использование известных подходов не оправдано. Разработанная расчетная методика имеет ряд особенностей: учитывается неравновесность в паре и на межфазной поверхности; принимается во внимание изменение температуры межфазной поверхности, что в отдельных случаях оказывает сильное влияние на характер эволюции паровой пленки; рассматривается движущаяся межфазная поверхность.

**Практическая ценность.** Процессы образования и развития пленки

пара на нагревателе могут происходить в различных технических устройствах и системах. В одних случаях образование паровой пленки на греющей поверхности не будет приводить к катастрофическим последствиям, например, при захолаживании элементов криосистем жидкими криогенными. В других случаях образование тонкого парового слоя может служить причиной ухудшения эксплуатационных характеристик системы, вплоть до тяжелых аварий. В установках, работающих при высоких температурах, в частности при контакте расплава активной зоны ядерного реактора с окружающей водой, это может способствовать тяжелой аварии с выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду. В низкотемпературных устройствах — локальные тепловыделения в элементах сверхпроводящих магнитных систем могут привести к разрушению сверхпроводящего кабеля и разрушению дорогостоящей магнитной системы.

С помощью разработанной модели можно проводить анализ эволюции паровой пленки на сильно нагретом теле с учетом неравносности, нагрева и движения межфазной поверхности для цилиндрической или сферической геометрий, жидкостей с различными свойствами при известной тепловой нагрузке или температуре горячего объекта. Кроме того, получены соотношения, которые дают возможность, основываясь на знании начальных условий, прогнозировать характер эволюции, а в отдельных случаях получать точное значение необходимых параметров из аналитических выражений. В целом это позволяет управлять процессом эволюции паровой пленки, определять длительность режима пленочного кипения.

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

Апробация работы. Результаты работы были доложены на Второй российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 1998 г.); на семинаре "Численное моделирование процессов тепло- и массообмена" в Институте проблем механики РАН (Москва, 1998 г.); на Втором международном семинаре по физике низких температур в условиях невесомости CWS-99 (Черноголовка, 1999 г.); на Первой российской конференции по космическому материаловедению КМ-99 (Калуга, 1999 г.); на VI и VII международных научно-технических

конференциях студентов и аспирантов "Радиотехника, электротехника и энергетика" (Москва, 2000 и 2001 г.); на VII Российском симпозиуме "Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно-чувствительных систем" (Москва, 2000 г.); на IV Минском международном форуме по теплообмену (Москва, 2000 г.); на семинаре научной школы Д.А. Лабунцова (Москва, 2000); на XIII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева "Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и теплообмена в энергетических установках" (Санкт-Петербург, 2001 г.)

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, имеет объем 160 страниц, включая 46 иллюстраций, 5 таблиц. Библиографический список содержит 83 наименования.

Автор защищает новую расчетную модель эволюции паровых пленок на сильно нагретых телах, погруженных в жидкости, учитывающую неравносность эффекты, изменение температуры межфазной поверхности и ее движение, и результаты, полученные на ее основе.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен обзор существующих моделей эволюции паровых объектов в жидкости. Среди прочих рассмотрены модели роста паровых пузырей в объеме жидкости и на поверхности<sup>1</sup>, модели эволюции паровой пленки на цилиндрическом нагревателе (Inoue et al, 1981), и на сферической частице (Домбровский, Зайчик 2000). Простых методик расчета эволюции паровой пленки на поверхности нагретого тела в условиях, когда перенос через границу пар-жидкость осуществляется в сильно неравносность условиях и возможно изменение температуры этой границы не обнаружено. Кроме того, для этих условий не оправдано использование известных моделей эволюции.

Обзор экспериментальных работ показал, что данные об эволюции паровых пленок на горячих телах в виде зависимости размера полости от времени имеют лишь в небольшом числе публикаций, отобранных для сопоставления с результатами проведенных расчетов.

<sup>1</sup> Ягов В.В. Зарождение и рост паровых пузырей в объеме жидкости и на твердой поверхности. // Парожидкостные потоки. — Минск, ИТМО. — 1977. — С. 34 — 63.

определить размер пленки, температуру границы раздела фаз, давление пара вблизи межфазной поверхности и другие характеристики в любой момент времени и при выходе на стационарный режим.

Проанализированы физические процессы, происходящие в системе. На основе этого анализа выбраны соответствующие подходы для описания процессов переноса в паре, на межфазной поверхности и в жидкости. В силу сложности всей задачи в целом, предлагаются несколько способов расчета переноса энергии по жидкости: постоянная температура — идеально теплопроводная жидкость, нестационарное уравнение теплопроводности, полное уравнение энергии.

Во второй главе сформулированы системы уравнений, описывающих эволюцию паровой пленки на сферической частице и на цилиндрическом нагревателе. Для описания движения межфазной поверхности в сферических координатах используется уравнение Рэлея (Лабунцов, Ягов, 1978; Накоряков и др., 1983)

$$\ddot{R}R + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{p'' - p_b - p_{\text{доп.}}}{\rho} - \frac{2\sigma}{R} - 4\eta \frac{\dot{R}}{R} \quad (1)$$

и аналогичное ему уравнение в цилиндрических координатах

$$\left(\ddot{R}R + \dot{R}^2\right) \ln\left(\frac{R_b}{R}\right) + \frac{(\dot{R}R)^2}{2} \left(\frac{1}{R_b^2} - \frac{1}{R^2}\right) = \frac{p'' - p_b - p_{\text{доп.}}}{\rho} - \frac{\sigma}{R} - 2\eta \frac{\dot{R}}{R} \quad (2)$$

Здесь где  $p''$  — давление внутри паровой пленки,  $p_b$  — давление над зеркалом,  $R$  — радиус паровой пленки;  $\ddot{R} = \frac{d^2R}{dt^2}$ ,  $\dot{R} = \frac{dR}{dt}$  — соответственно ускорение и скорость движения межфазной границы,  $R_b$  — внешний радиус области интегрирования;  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения;  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости жидкости,  $\rho$  — плотность жидкости.

Для определения давления внутри паровой пленки используется кинетическое соотношение, связывающее это давление с тепловым потоком на границе раздела фаз<sup>2</sup> при больших отклонениях от состояния термодинамического равновесия

<sup>2</sup> Khurtin P.V., Kryukov A.P. Some models of heat transfer at film boiling of superfluid helium near  $\lambda$ -point in microgravity. // Journal of Low Temperature Physics. — 2000. — Vol. 119, — No. 3/4. — P. 413 — 420.

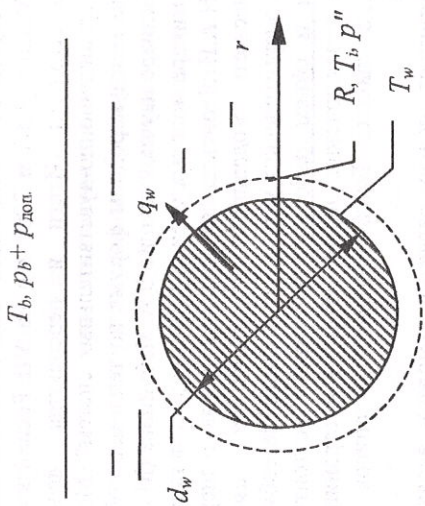


Рис. 1. Постановка задачи при заданной тепловой нагрузке на нагревателе.

Далее в этой главе сформулирована постановка задачи.

**Постановка задачи.** Рассматривается эволюция паровой полости на цилиндрическом нагревателе или нагретом теле сферической формы, погруженном в жидкость (см. рис. 1). Считаются известными: плотность теплового потока на нагревателе  $q_w$  или температура сферического тела  $T_w$ , радиус нагревателя или частицы  $R_b$ , давление и температура пара над свободной поверхностью жидкости  $p_b$  и  $T_b$ , а также величина дополнительного давления на пленку  $p_{\text{доп.}}$ , создаваемого гидростатическим или негидростатическими способами. В общем случае эти величины могут зависеть от времени. Ограничения по степени неравновесности исследуемых задач не накладываются, считается, что возможны ситуации, в которых температура нагревателя может быть значительно больше температуры жидкости.

Предполагается, что жидкость является несжимаемой, а пленка сохраняет цилиндрическую или сферическую форму. В первом приближении зависимость переносных свойств жидкости, за исключением теплопроводности, от температуры не учитывается.

Полагается, что в начальный момент времени пленка имеет конечную малую толщину; процесс ее образования в рамках настоящей работы не рассматривается.

Необходимо исследовать эволюцию паровой пленки, что позволит

$$p'' = 0.5 p_s(T_i) \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{q}{p_s(T_i) \sqrt{2 R_\mu T_i}}} \right) \quad (3)$$

или для небольших отклонений от состояния равновесия (Муратова, Лабунцов, 1969)

$$p'' = p_s(T_i) \left[ 1 + 0.44 \frac{q}{p_s(T_i) \cdot (2 \cdot R_\mu T_i)^{1/2}} \right] \quad (4)$$

Здесь  $q$  — удельный тепловой поток на границе раздела фаз;  $T_i$  — температура межфазной поверхности;  $R_\mu$  — индивидуальная газовая постоянная;  $p_s$  — давление насыщения.

Оба эти соотношения записаны для условий, когда поток массы через межфазную поверхность равен нулю. Справедливость этого положения показана при решении нестационарной кинетической задачи в постановке аналогичной рассматриваемой (Крюков, Шишкова, 1997).

Для описания переноса тепла в жидкости рассматриваются несколько моделей. Приближение идеально-теплопроводной жидкости

$$T(r) = T_b \quad (5)$$

Нестационарное уравнение теплопроводности в цилиндрических или сферических координатах

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^n \cdot \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (6)$$

где  $n = 1$  для цилиндрических и  $n = 2$  для сферических координат,  $r$  — текущая координата,  $C$  — теплоемкость и  $\lambda(T)$  — теплопроводность жидкости.

Для описания переноса тепла в сверхтекучем гелии (He II), следуя Дреснеру<sup>3</sup>, используется уравнение вида

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^n \cdot \sqrt{\frac{1}{f(T)}} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (7)$$

построенное на основе полуэмпирического закона Гортера-Меллинка (Gorter, Mellink, 1949). Здесь  $f(T)$  — функция Гортера-Меллинка.

Для замыкания системы записаны начальные и граничные условия.

<sup>3</sup> Dresner L. Transient Heat Transfer in Superfluid Helium. // Advances in Cryogenics Engineering. — 1982. — Vol. 27. — P. 411 — 419.

Для задачи об эволюции паровой пленки на теле сферической формы, погруженном в идеально теплопроводную невязкую жидкость, при постоянной величине удельного теплового потока  $q_w$  на поверхности нагретого тела получено аналитическое решение

$$\dot{R} = \sqrt{0.88 \frac{q_w r_w^2}{\rho (2R_\mu T_i)^{1/2}} \left( \frac{1}{R^2} - \frac{r_w}{R^3} \right) + \frac{2 p_s(T_i) - p_b - \rho g h}{3 \rho} \left( 1 - \frac{r_w}{R^3} \right)}. \quad (8)$$

Решение задачи в более общей постановке осуществляется численно. Для реализации численного решения проводится обезразмеривание уравнений. В работе приводится обоснование выбора численных методов решения системы, описывающей эволюцию паровой пленки, рассмотрены алгоритмы решения и их особенности.

**В третьей главе** приведены результаты расчетов для жидкостей с существенно отличающимися свойствами: сверхтекучего гелия, жидкого натрия и воды.

Получены решения задачи об эволюции паровой пленки на цилиндрическом нагревателе, погруженном в сверхтекучий гелий. Расчеты выполнены для температуры жидкости — 2К и давления над зеркалом — 3169 Па. Обнаружено, что решение имеет вид затухающих колебаний (см. рис. 2а, соответствует зависимости для  $q_w = 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> на рис. 2б). На рис. 2б показано влияние величины тепловой нагрузки на характер эволюции, представлены огибающие зависимости радиуса паровой пленки от времени. Видно, что изменение удельного потока тепла с нагревателя приводит к соответствующему изменению амплитуды колебаний и размера пленки в стационарном режиме. Расчеты проводились как в приближении идеально теплопроводной жидкости, так и с учетом нагрева межфазной поверхности. Установлено, что для He II при умеренных тепловых нагрузках ( $q_w < 5 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>) и малых размерах нагревателя ( $r_w < 5 \cdot 10^{-3}$  м) изменение температуры межфазной поверхности незначительно и можно использовать более простую модель с идеально теплопроводной жидкостью.

Результаты расчетов для высокотеплопроводной обычной жидкости — жидкого натрия показали их кардинальное отличие от результатов для сверхтекучего гелия (рис. 3).

Представленные результаты получены для цилиндрического нагревателя при условиях:  $r_w = 5 \cdot 10^{-3}$  м,  $R_b = 0.5$  м,  $h = 0.01$  м,  $T_b = 316$  °С,  $p_b = 3.3$  Па. Решение представляет собой незатухающие во времени колебания, но характер влияния тепловой нагрузки такой же, как для

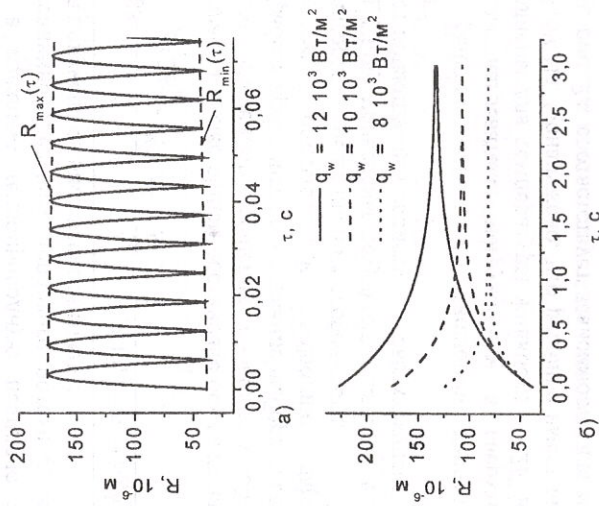


Рис. 2. Результаты решения для He II.  $r_w = 38,1 \cdot 10^{-6}$  м,  $R_b = 3,81 \cdot 10^{-2}$  м,  $h = 10^{-2}$  м.

He II. Это различие обусловлено сильным нагревом жидкости вблизи границы раздела фаз (см. рис 3б).

Решения на рис. 4 получены для условий  $T_w = 3000$  К,  $r_w = 10^{-5}$  м — рис. 4а,  $r_w = 5 \cdot 10^{-3}$  м — Рис. 4б,  $T_b = 373$  К,  $p_b = 10^5$  Па. Для частиц малого размера (рис. 4а) характерны колебательные режимы при практически неизменной температуре межфазной поверхности. Для частиц большого размера (рис. 4б) — начальное изменение температуры межфазной поверхности приводит к реализации режима без колебаний. При этом величина  $q$  определяется из решения соответствующей задачи о переносе тепла через слой пара.

Проведено исследование параметров, входящих в безразмерную систему уравнений, описывающую эволюцию паровой пленки на сильно нагретом теле, и выявлено, что наиболее существенное влияние на характер эволюции оказывают степень неравновесности, теплоемкость и

теплопроводность жидкости. Предложено ввести в рассмотрение безразмерный параметр, характеризующий степень отклонения от состояния термодинамического равновесия и представляющий собой отношение потока тепла, подводимого к границе раздела фаз, к тепловому потоку, обусловленному молекулярно-кинетическим переносом через межфазную поверхность, и назвать его числом Лабунцова  $La = m_q / m_p \sqrt{2R_\mu m_T}$ . Здесь  $m_x$  — масштаб величины  $x$ .

Влияние теплопроводности и теплоемкости характеризуется двумя

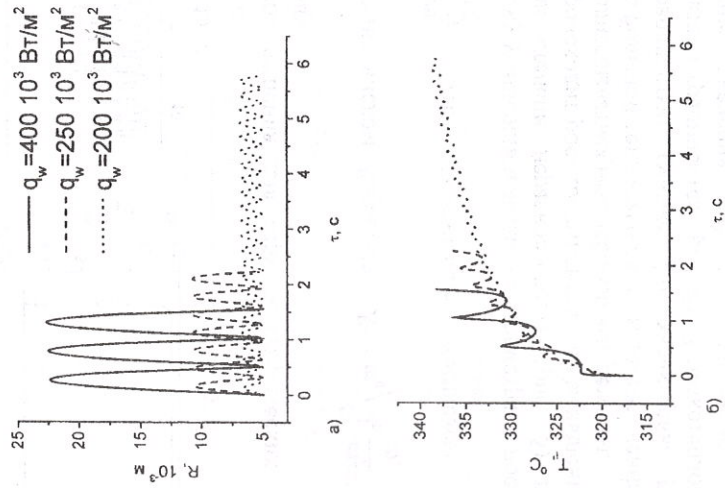


Рис. 3. Результаты решения для жидкого натрия при различных тепловых нагрузках.

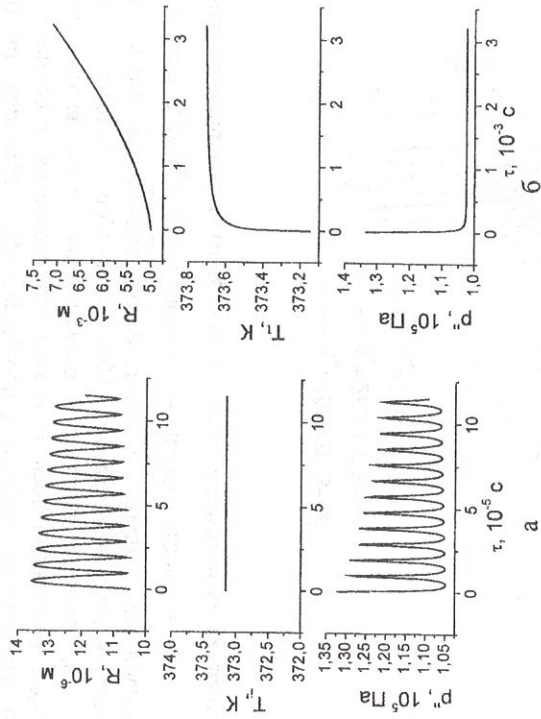


Рис. 4. Результаты решения для горячих сферических частиц, погруженных в воду.

другими параметрами: числом Кирпичева  $Ki = m_q / \lambda_0 \frac{m_T}{m_r}$  и числом

Фурье  $Fo = \frac{\lambda_0 m_T}{m_r c m_r^2}$ . Эти безразмерные комплексы входят в безразмерную систему уравнений и являются параметрами процесса.

При увеличении степени неравновесности (рис. 5) появляются колебания, затем происходит рост их амплитуды и уменьшение частоты. В пределе могут реализовываться неколебательные режимы.

Для жидкостей с большой теплоемкостью (малые значения  $Fo$ ) или с высокой теплопроводностью (малые  $Ki$ ) характерны режимы с колебаниями межфазной границы (см. рис. 6). В низкотеплопроводных жидкостях (большие значения  $Ki$ ) или жидкостях с низкой теплоемкостью (большие  $Fo$ ) сильный нагрев межфазной поверхности приводит к реализации режимов без колебаний.

Введен показатель, отражающий роль неравновесных эффектов на межфазной поверхности в сравнении с термическим сопротивлением

жидкости

$$K = Ki / La = \frac{m_p \sqrt{2R_\mu m_T}}{\lambda m_r / m_r} \tag{9}$$

При  $K > 1$  эволюцию определяет термическое сопротивление жидкости, при  $K < 1$ , лимитирующим фактором являются неравновесные

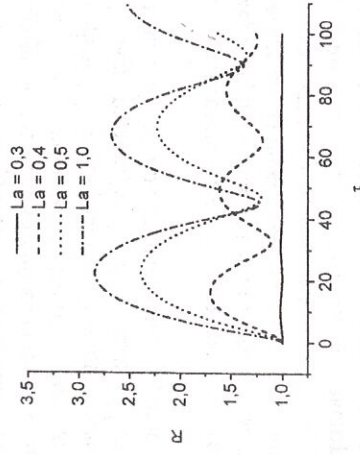


Рис. 5. Влияние степени неравновесности ( $La$ ) на зависимость  $R(\tau)$ .

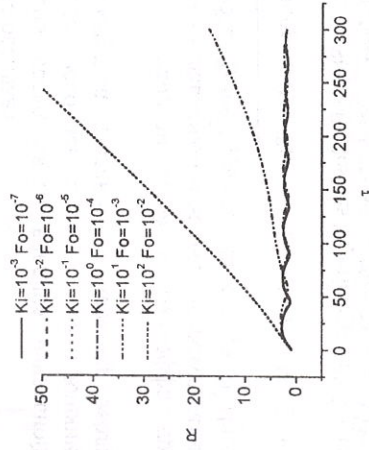


Рис. 6. Влияние теплопроводности ( $Ki$ ) и теплоемкости ( $Fo$ ) на зависимость  $R(\tau)$ .

эффекты на границе раздела фаз.

Проведено исследование устойчивости стационарного решения задачи об эволюции паровой пленки и получены соотношения определяющие области существования устойчивых решений.

Применение этих соотношений позволило помимо устойчивого колебательного и неустойчивого неколебательного режимов обнаружить промежуточный режим — резкое увеличение толщины и последующее постепенное ее уменьшение при увеличении теплового потока.

**В четвертой главе** осуществлено сопоставление с экспериментами: со стационарным по кипению  $\text{He II}^4$ , нестационарным по взаимодействию горячей капли расплава оксида железа с водой<sup>5</sup> и нестационарным экспериментом по взаимодействию капли расплавленного олова с водой при прохождении ударной волны низкой интенсивности<sup>6</sup>.

Сопоставление с экспериментом по сверхтекучему гелию проведено по значению размера паровой пленки в стационарном состоянии и по температуре нагревателя. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

При сопоставлении расчетных данных с экспериментальными данными Нельсона проведены расчеты для чистого пара (рис. 6) и для парогазовой смеси, заполняющей полость, образующуюся вокруг капли с температурой 2230 К (рис. 7). Отмечается соответствие результатов как по длительности циклов роста-схлопывания, так и по размеру полости, окружающей каплю расплава.

Также проведено исследование влияния начальной температуры жидкости, количества неконденсируемого газа и влияния его нагрева, инициирующего импульса давления на характер эволюции паровой полости.

Сопоставление с работой Хэна и Банкоффа проводилось по косвенным данным — давлению в жидкости; результаты представлены на рис. 8 для  $T_w=565^\circ\text{C}$ ,  $T_b=66^\circ\text{C}$ ,  $p_b=10^5$  Па,  $\Delta p=5,4 \cdot 10^5$  Па,  $r_w=0,01$  м.

<sup>4</sup> Амелистов Е.В., Григорьев В.А. Теплообмен с  $\text{He II}$ . — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 140 с.

<sup>5</sup> Nelson L. S., Duda P. M. Steam Explosions Experiments with Single Drops of Iron Oxide Melted with  $\text{CO}_2$ -laser. // High. Temp. — High Press., — 1982. — V. 14. — P. 259 — 281.

<sup>6</sup> Han S.H., Bankoff S.G. Thermal interactions of a molten tin drop with water triggered by a low-pressure shock. // Int. J. Heat and Mass Transfer. — 1987. — Vol. 30. — No.3. — P. 569 — 579.

Расчет по предложенной модели был проведен только для начальной стадии взаимодействия, так как капли по описанию авторов очень быстро теряла сферическую форму.

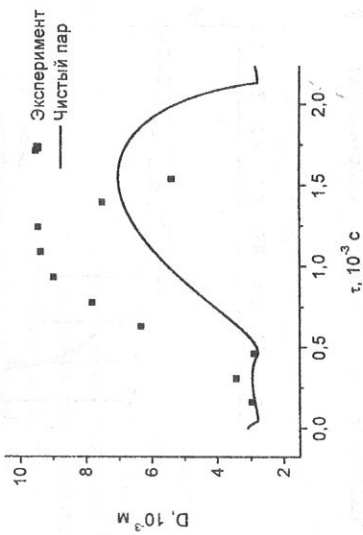


Рис. 6. Зависимости диаметра паровой пленки от времени: экспериментальная и расчетная.

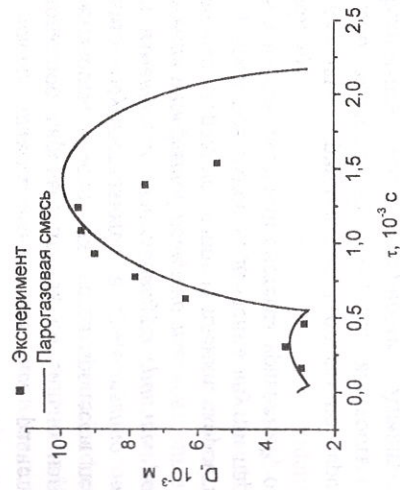


Рис. 7. Зависимости диаметра парогазовой пленки от времени, первый и второй циклы роста-схлопывания.



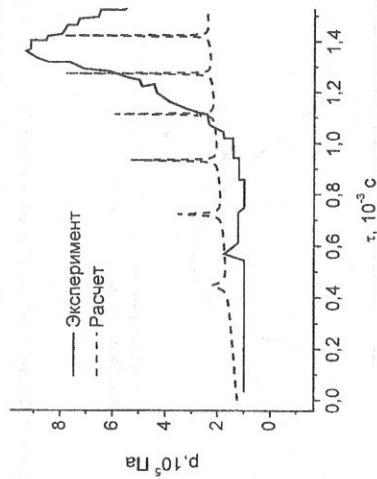


Рис. 8. Зависимости давления в жидкости, экспериментальная и расчетная зависимости.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Предложена новая, относительно простая расчетная модель, описывающая эволюцию паровых пленок на сильно нагретых телах, погруженных в жидкость, в условиях, когда процессы переноса через межфазную границу осуществляются в существенно неравновесных условиях, может изменяться температура границы раздела фаз и происходит движение межфазной поверхности.

Получены зависимости радиуса паровой пленки, скорости движения и температуры межфазной поверхности, давления внутри паровой пленки от времени при численном решении системы уравнений, описывающих исследуемую проблему.

Рассмотрены несколько приближений к описанию переноса тепла в жидкости: идеально теплопроводная среда, жидкость с конечным значением коэффициента теплопроводности. Анализ полученных решений показал, что на нагревателях малых размеров при умеренных удельных тепловых потоках и малых глубинах погружения греющей поверхности в жидкость модель идеальной теплопроводной среды с хорошей точностью позволяет описывать эволюцию паровой пленки.

С помощью разработанной модели получены решения задач для сред с кардинально отличающимися свойствами: Не II, натрия и воды.

Выявлено наличие как колебательных, так и режимов без колебаний.

Проведен анализ влияния исходных данных (тепловой нагрузки, дополнительного давления, объема жидкости и др.) на характер решения. Установлено, что наиболее сильно на характер эволюции влияет дополнительное давление и тепловая нагрузка.

Таким образом, для управления возникновением и ростом паровой пленки целесообразно изменять давление в системе и тепловую нагрузку.

На основании анализа влияния определяющих параметров и исследования устойчивости стационарного решения задачи об эволюции паровой пленки выявлено следующее:

- возможен промежуточный режим — резкий рост, а затем плавное уменьшение толщины паровой пленки;
- неравновесные эффекты на межфазной поверхности и изменение ее температуры оказывают существенное влияние на характер эволюции паровой полости на нагретом теле;
- в обычных жидкостях начальный этап роста определяется кинетическим механизмом, а затем и нагревом межфазной поверхности;
- в сверхтекучем гелии рост паровой пленки обусловлен главным образом неравновесностью на границе раздела пар-жидкость;
- при сильном изменении температуры межфазной границы реализуются режимы без колебаний, при небольшом изменении всегда присутствуют колебания межфазной поверхности.

Кроме того, получены соотношения, которые позволяют в ряде случаев по начальным условиям определить характер эволюции и возможность существования гладкой стационарной пленки. Одно из этих соотношений определяет роль неравновесных эффектов на границе раздела фаз в сравнении с термическим сопротивлением жидкости.

Выявлено, что поверхность натяжение, дополнительное давление, вязкость и инерционность жидкости, относятся к стабилизирующим факторам.

Выполнено сопоставление с экспериментами по сверхтекучему гелию в воде и получено удовлетворительное соответствие результатов. Также установлено, что сильное влияние на характер эволюции оказывают следующие факторы:

- присутствие в паровой пленке малого неконденсируемых газов;
- импульсы внешнего давления;
- подогрев жидкости и начальная температура межфазной

поверхности.

На основе полученной модели проведены расчеты и сформулированы рекомендации для проведения эксперимента по кипению сверхтекучего гелия в условиях невесомости.

Продоланная работа позволила определить роль неравновесных эффектов на межфазной поверхности пар-жидкость и выявить факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на исследуемый процесс.

Решение задачи об эволюции паровой пленки на горячей сферической частице, помещенной в воду, дает представление о начальной стадии такого опасного и нежелательного с точки зрения безопасности атомных реакторов процесса, как паровой взрыв.

Предложенная автором модель позволяет определить время выхода на стационарный режим при захлаживании различных сверхпроводящих магнитных устройств, а также предложить способы контроля и регулирования нестационарных процессов при возникновении паровой пленки на захлаживаемом объекте цилиндрической или сферической формы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты №99-02-16103, 01-02-06139 и частично №00-15-96543.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Горбунов А.А., Дергунов И.М., Крюков А.П. Эволюция паровой полости при кипении сверхтекучего гелия. // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. — М.: Издательство МЭИ, 1998. — Т. 4. — С. 80 — 83.
2. Дергунов И.М., Крюков А.П., Горбунов А.А. Эволюция паровой пленки при кипении сверхтекучего гелия в условиях невесомости. // Journal of Low Temperature Physics. — 2000. — Т. 119. — № 3/4. — С. 403 — 411. (на англ. яз.)
3. Горбунов А.А., Дергунов И.М., Крюков А.П. Рост паровой пленки на нагревателе, погруженном в высокотемпературную жидкость. // Труды IV Минского международного форума по теплообмену. — Минск: АНК «ИТМО им. А.В. Лыкова» НАНБ, 2000. — Т.5. — С. 42 — 51.
4. Горбунов А.А., Дергунов И.М., Крюков А.П., Нестеров С.Б., Шиншкова И.Н. Процессы переноса на границе раздела: газ —

конденсат гелия при фазовых переходах в земных условиях и невесомости. // VII Российский симпозиум "Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно-чувствительных систем". Сборник трудов. — М.: ИПМ РАН, 2000. — С. 203 — 219.

5. Дергунов И.М., Горбунов А.А., Крюков А.П. Динамика паровой пленки на нагревателе при изменяющейся тепловой нагрузке. // Труды XIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева "Физические основы экспериментальной и математического моделирования процессов газодинамики и теплообмена в энергетических установках". — М.: Издательство МЭИ, 2001. — Т.1. — С.304 — 307.

Печ. л. 1,26 Тираж 100 Заказ 75

Отпечатано в Полиграфическом Центре МЭИ(ТУ)