

Кипение He II в пористой структуре при микрогравитации: модельное представление

И.М. Дергунов, П.В. Королев, А.П. Крюков, Ю.Ю. Селянинова

*Московский энергетический институт, кафедра низких температур
ул. Красноказарменная, 14, г. Москва, 111250, Россия
E-mail: apk@mcsa.ac.ru*

Статья поступила в редакцию 19 декабря 2002 г.

Представлены результаты моделирования кипения сверхтекучего гелия в условиях микрогравитации. Анализируется эволюция паровой пленки на поверхности цилиндрического нагревателя, расположенного внутри толстостенного цилиндра с пористыми стенками. Для описания процессов тепло- и массопереноса на межфазной поверхности применяются методы молекулярно-кинетической теории. Решается уравнение движения межфазной поверхности пар—жидкость. Изучено влияние параметров эксперимента на характеристики паровой пленки. Проведено сравнение расчетных данных для микрогравитации и земных условий.

PACS: 05.70.Ln, 05.70.Jk

1. Введение

Образование и рост паровых пузырей на поверхности нагревателя, погруженного в жидкость, при кипении изучается довольно длительное время. Для описания этих процессов предложено несколько моделей. Однако основное внимание в этих моделях уделялось ситуации, когда тепло переносилось к межфазной поверхности жидкость—пар со стороны жидкости. Но при больших плотностях тепловых потоков имеет место обратная ситуация: нагреватель окружен слоем пара, а тепло переносится к окружающей жидкости через межфазную поверхность пар—жидкость. Хорошо известно, что процесс кипения He II сопровождается образованием паровой пленки вокруг нагревателя, т.е. осуществляется только в форме пленочного кипения. Таким образом, тепло переносится к He II через межфазную поверхность пар—жидкость. Процессы переноса тепла и массы на этой поверхности взаимосвязаны. Эффективность теплопереноса в сверхтекучем гелии очень высокая, и благодаря этому ограничения по теплопереносу от нагревателя к границе сверхтекучего гелия при высоких тепловых потоках должны определяться явлениями на межфазной поверхности пар—He II в отличие от обычных жидкостей. Температура поверхности нагревателя может быть значительно больше температуры межфазной поверхности пар—He II, что приводит к возникнове-

нию неравновесной ситуации у поверхности нагревателя, погруженного в сверхтекучий гелий. Для этих условий применение методов механики сплошной среды не всегда оправданно, а подход молекулярно-кинетической теории дает возможность изучить корректно процессы при любой степени отклонения от равновесия.

Эволюцию межфазной поверхности пар—He II для земных условий мы анализировали ранее. На Земле разность давлений в жидкости зависит от ускорения свободного падения. Соответственно, как пиковый, так и восстановительный тепловые потоки определяются гидростатическим напором [1]. При малой глубине погружения нагревателя в He II толщина паровой пленки быстро возрастает с увеличением теплового потока, что приводит к неустойчивости формы. Чтобы исследовать паровые пленки большой толщины при разных тепловых потоках, необходимо проводить исследования в условиях микрогравитации. Такие условия могут быть реализованы, например, в экспериментах на Международной космической станции (МКС). Для простоты дальнейший анализ процессов переноса тепла и массы рассматривается в одномерном приближении.

2. Постановка задачи

Необходимо создать систему, которая может обеспечить разность давлений при микрогравитации,

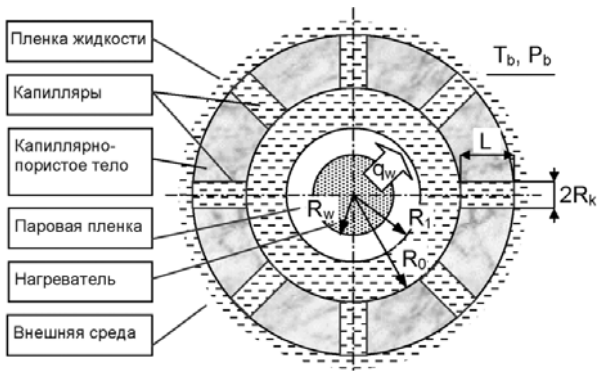


Рис. 1. Модель экспериментальной ячейки.

аналогичную гидростатической разности в земных условиях. Для моделирования процессов кипения сверхтекучего гелия в условиях микрогравитации, используется капиллярно-пористая среда (рис. 1). Цилиндрический нагреватель радиусом R_w располагается внутри коаксиальной толстостенной цилиндрической трубы (оболочки) радиусом R_0 и толщиной L . В этой оболочке проделаны каналы радиусом R_k . Количество каналов определяется пористостью μ — отношением поперечного сечения всех капилляров к внутренней поверхности оболочки. Все внутреннее пространство и капилляры пористого тела заполнены сверхтекучим гелием. Ячейка находится в условиях теоретической невесомости. Благодаря хорошей смачиваемости внешняя поверхность пористой трубы также покрыта пленкой сверхтекучей жидкости.

При плотности теплового потока q_w выше некоторой критической на поверхности нагревателя образуется паровая пленка радиусом R_1 . Давление пара во внешнем объеме экспериментальной ячейки поддерживается на постоянном уровне P_b . В расчете анализируется эволюция паровой пленки с изменением плотности потока, давления и геометрических размеров ячейки. При этом считаются известными или заданными другие необходимые теплофизические и гидродинамические параметры.

3. Описание модели

Полное математическое описание представленной модели экспериментальной ячейки состоит из трех частей. Первая часть — описание паровой пленки включает уравнения сохранения для этой среды в цилиндрических координатах, а также уравнение состояния. Эту часть расчетов можно провести, воспользовавшись кинетическим уравнением Больцмана. Вторая часть — описание поведения жидкости во внутренней полости. Для этого записывается система уравнений сохранения для несжимаемой жидкости в цилиндрических коорди-

натах. При этом принимаются во внимание характерные черты гидродинамики и теплопереноса в сверхтекучем гелии. И, наконец, третья часть расчетов, которая позволяет определить параметры системы в капиллярах пористого тела, включает уравнения сохранения для несжимаемой жидкости, текущей в каналах круглого сечения с учетом специфики теплопереноса и гидродинамики в He II. Эта система уравнений замыкается универсальными и специальными условиями совместности на межфазных поверхностях в полости и на внешней поверхности капиллярно-пористого тела. Тепловой поток на поверхности нагревателя и давление пара во внешней области рассматриваются в качестве граничных условий задачи. При проведении численных расчетов эти величины считаются заданными.

Таким образом, предложенное математическое описание состоит из достаточно большого числа дифференциальных уравнений в частных производных. Представляется, что получить аналитическое решение описанной системы весьма затруднительно. Численное же решение полной системы уравнений связано с накоплением вычислительных ошибок. К тому же алгоритмизация решения системы дифференциальных уравнений в частных производных довольно трудоемкий процесс. Поэтому для упрощения системы уравнений мы вводим определенные допущения: а) рассматривается одномерная задача в цилиндрической системе координат; б) предполагается, что внешний теплоподвод и потери тепла пренебрежимо малы; в) теплофизические свойства жидкости не зависят от температуры; г) вся энергия, выделяемая нагревателем, удаляется за счет испарения He II на внешней поверхности капиллярно-пористого цилиндра.

Движение границы раздела пар — жидкость описывается обыкновенным дифференциальным уравнением [2]:

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

Здесь R_1 — радиус паровой пленки, м; $\ddot{R} = d^2 R / d\tau^2$, $\dot{R} = dR / d\tau = V_1$ — ускорение и скорость движения межфазной поверхности, м/с², м/с; R_0 — внутренний радиус капиллярно-пористой трубы, м; P_1' — давление жидкости вблизи межфазной поверхности, Па; P_0 — давление на внутренней поверхности капиллярно-пористого тела, Па; ρ' — плотность жидкости, кг/м³.

Начальные условия: при $\tau = 0$, $R_1 = R_w$, $\dot{R} = 0$, где R_w — радиус нагревателя.

Неравновесные эффекты на межфазной поверхности описываются формулой, полученной на базе кинетического уравнения Больцмана [3]:

$$P_1'' = 0,5P_{S1} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\sqrt{\pi}q_1}{P_{S1}\sqrt{2RT_1'}}} \right), \quad (2)$$

где P_1'' — давление в паровой пленке, Па; $P_{S1} = P_S(T_1')$ — давление насыщения при соответствующей температуре, Па; q_1 — тепловой поток, приходящий на межфазную поверхность от нагревателя, Вт/м²; R — газовая постоянная для гелия, Дж/(кг·К); T_1' — температура жидкости вблизи межфазной поверхности, К.

Процессы тепломассопереноса и гидродинамики описываются некоторыми специальными уравнениями для сверхтекучего гелия. Соотношение для потока энергии в He II без учета диссипативных процессов дает взаимосвязь между тепловым потоком и скоростью жидкости в капиллярах [4]:

$$q_0 = \rho'S(V_n - V)T, \quad (3)$$

где q_0 — тепловой поток в капиллярах, Вт/м²; S — энтропия жидкости, Дж/(кг·К); V_n — скорость нормального компонента He II в капиллярах, м/с; T_b — температура жидкости на внешней поверхности пористого тела, К; T_0 — температура жидкости на внутренней поверхности пористой трубы, К. Таким образом, $V_n - V$ — относительная скорость жидкости в капиллярах, м/с; $T = \sqrt{T_0T_b}$ — средняя температура жидкости в капилляре, К.

Скорость движения жидкости и разность давлений в канале взаимосвязаны. Ускорение жидкости незначительно. Течение нормальной компоненты считается установившимся. Считается также, что реализуется ламинарное течение. Движение нормального компонента описывается уравнением Хагена — Пуазейля [5]:

$$P_0 - P_b = \frac{32\eta L V_n}{(2R_k)^2}, \quad (4)$$

где $L = R_b - R_0$ — длина капилляра, м (R_b — внешний радиус пористой трубы); η — вязкость нормальной компоненты He II, Па·с; R_k — радиус капилляра, м.

Разность давлений в капиллярах связана с разностью температур следующим соотношением [5]:

$$P_b - P_0 = \rho'S(T_b - T_0). \quad (5)$$

Уравнения (3)–(5) показывают, что теплоперенос связан с динамическими процессами в капиллярах.

Теплоперенос в полости пористой трубы, заполненной сверхтекучим гелием, описывается уравнением Гортера — Меллинка [6]:

$$q_1^3 = \frac{2}{R_1 \tilde{f}(T)} (T_1' - T_0) \left(1 - \left(\frac{R_1}{R_0} \right)^2 \right)^{-1}, \quad (6)$$

где $\tilde{f}(T)$ — интегральная функция взаимного трения Гортера — Меллинка. Система уравнений (1)–(6) замыкается соотношениями сохранения:

$$q_1 = q_w \frac{R_w}{R_1}, \quad q_0 = q_w \frac{R_w}{\mu R_0}, \quad V_1 = V \frac{\mu R_0}{R_1}. \quad (7)$$

Универсальное условие совместности для потока импульса на межфазной поверхности имеет вид

$$P_1' + \frac{\sigma}{R_1} = P_1'' - 2\eta \frac{\dot{R}_1}{R_1}. \quad (8)$$

Система уравнений (1)–(8) описывает процессы переноса в экспериментальной ячейке: а) теплоперенос в паровой пленке, в полости, окруженной цилиндрической оболочкой, и в капиллярах, заполненных жидкостью; б) динамические эффекты, обусловленные течением жидкости и поверхностным натяжением; в) кинетические эффекты на межфазной поверхности.

Аналитическое решение рассмотренной системы затруднительно, поэтому для решения этой задачи использовались численные методы.

4. Результаты и обсуждение

Задача о пленочном кипении сверхтекучего гелия в модели пористой структуры при микрогравитации решается впервые. К особенностям этой задачи следует отнести то, что разность давлений в жидкости зависит не только от геометрических параметров ячейки, но также от теплового потока и внешних условий. Температура жидкости зависит от внешнего давления. Разность давлений в жидкости связана с кинетическими эффектами на межфазной поверхности (2). Существенно, что основное влияние на эволюцию паровой пленки оказывает тепловой поток.

Результаты анализа поведения нестационарных характеристик процесса представлены ниже. Основные динамические процессы происходят в начальный момент времени. При включении теплового потока выше некоторого критического (в данном рассмотрении априори предполагается, что поверхность нагревателя окружена паровой пленкой) паровая пленка растет, давление пара увеличивается, жидкость ускоряется. По мере увеличения толщины пленки тепловой поток, поступающий на межфазную поверхность, и сила поверхностного натяжения уменьшаются.

Такие характеристики эволюции паровой пленки, как скорость межфазной поверхности, давление

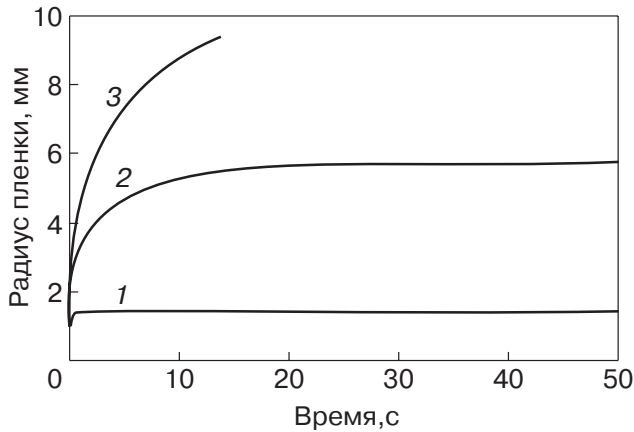


Рис. 2. Влияние радиуса капилляра на эволюцию паровой пленки: $R_k = 5$ (1); 10 (2); 15 (3) мкм.

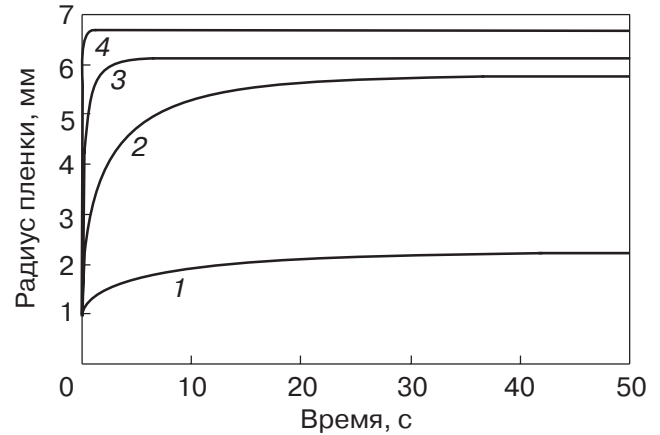


Рис. 3. Влияние теплового потока на эволюцию паровой пленки: $q_w = 10^2$ (1); 10^3 (2); 10^4 (3); 10^5 (4) Вт/м².

пара в пленке и стационарное значение радиуса пленки, зависят от параметров ячейки. В качестве примера одна из этих зависимостей показана на рис. 2. Эти результаты получены для следующих начальных данных: $q_w = 1000$ Вт/м²; $R_w = 0,001$ м; $R_0 = 0,01$ м; $\mu = 0,5$; $L = 0,01$ м; $P_b = 3169$ Па; $T_b = 2$ К.

Гидравлическое сопротивление каналов зависит от диаметра (4). Стационарное состояние пленки устанавливается для некоторых значений радиуса капилляров ($R_k = 5$ мкм, ..., $R_k = 10$ мкм). Разность давлений в капиллярах соответствует скорости нормального компонента, определяемой тепловым потоком. Это видно из уравнений (3)–(5). Разность давлений жидкости в полости капиллярно-пористой трубы становится равной нулю на стационарной стадии. Нормальная компонента в капиллярах движется навстречу сверхтекучей компоненте, которая не обладает вязкостью. Этот противоток обеспечивает неподвижность всей жидкости.

Если радиус капилляров достаточно мал ($R_k < 5$ мкм), то паровая пленка не может расти. Гидравлическое сопротивление и поверхностное натяжение становятся больше разности давлений между паровыми пространствами. При этом сверхтекучая жидкость перегревается, переходит в состояние He I и затем испаряется. Если размер капилляров достаточно большой ($R_k = 15$ мкм), то толщина паровой пленки быстро увеличивается. В этом случае стационарные условия не достигаются, и жидкость вытекает из внутренней полости.

Аналогичные данные были получены для других геометрических параметров. Из этих расчетов следует, что значение стационарного радиуса пленки увеличивается, когда внутренний радиус оболочки, радиус нагревателя и пористость растут, а длина капилляров уменьшается. Выбор размера нагревателя

определяется также объемом внутренней полости. Эволюция паровой пленки определяется тепловым потоком и давлением в криостате. Эти величины могут быть изменены в ходе эксперимента.

Влияние плотности теплового потока на эволюцию паровой пленки показано на рис. 3. Начальные данные взяты такие же, что и в расчетах, представленных на рис. 2 для $R_k = 10$ мкм. Стационарный радиус пленки и скорость роста паровой пленки увеличиваются при повышении теплового потока, а время нестационарной стадии уменьшается. Кинетические эффекты на межфазной поверхности определяются тепловым потоком (2). При этом разность давлений в капиллярах зависит от теплового потока и радиуса пленки. При относительно небольшом тепловом потоке ($q_w < 77$ Вт/м²) гидравлическое сопротивление и поверхностное натяжение препятствуют росту паровой пленки.

Влияние давления пара в криостате на эволюцию паровой пленки показано на рис. 4. Начальные данные те же, что и ранее, но плотность потока $q_w = 1000$ Вт/м². Расчеты показывают, что стационарный радиус увеличивается с ростом давления пара. Время нестационарной стадии тоже растет. Эта тенденция может быть объяснена следующими причинами. Температура жидкости зависит от давления пара. На внешней поверхности сверхтекучая жидкость поддерживается в состоянии близком к состоянию насыщения. Свойства сверхтекучего гелия: плотность, вязкость, поверхностное натяжение и энтропия зависят от температуры. Давление насыщенных паров сильно зависит от температуры. Поэтому если давление пара уменьшается, например в 4,7 раза, как на рис. 4, то энтропия жидкости становится меньше в 4,1 раза. При постоянном тепловом потоке разность давлений увеличивается в соответствии с соотношениями (3), (4). В итоге, дополнитель-

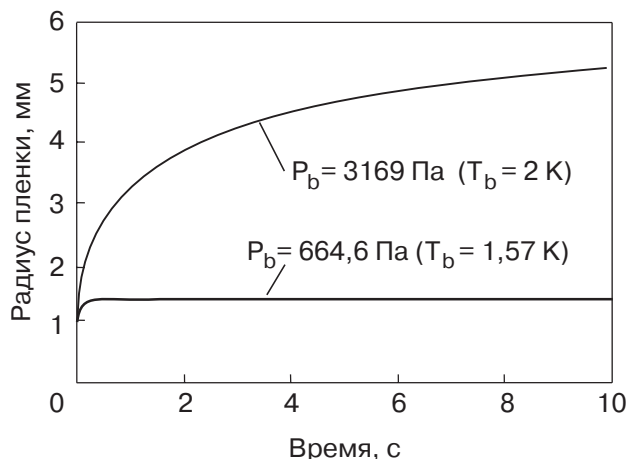


Рис. 4. Влияние давления пара на эволюцию паровой пленки.

ное давление — аналог гидростатического напора для земных условий, увеличивается тоже. Следовательно, стационарный размер паровой пленки должен быть меньше для $P_b = 664,6$ Па, чем для $P_b = 3169$ Па.

Эти результаты показывают, что размеры паровых пленок очень чувствительны к изменению теплового потока q_w и давления пара в криостате P_b . Таким образом, при экспериментальном исследовании необходимо строго контролировать значения этих величин.

Сравнение результатов расчета эволюции паровой пленки при микрогравитации и в земных условиях представлено на рис. 5. Радиус нагревателя, тепловой поток и температура жидкости в обоих расчетах были взяты равными ($q_w = 18100$ Вт/м²; $P_b = 664,6$ Па; $R_w = 95,5$ мкм). Другие параметры выбирались так, чтобы значения стационарных радиусов этих пленок совпадали ($R_0 = 0,02$ м; $\mu = 0,5$; $L = 0,1092$ м; $R_k = 10$ мкм; глубина погружения в земных условиях $h = 0,028$ м).

В условиях микрогравитации стационарное состояние достигается быстро. Разность давлений в жидкости зависит от теплового потока, скорости жидкости и текущего положения межфазной поверхности. В противоположность земным условиям при микрогравитации поведение системы определяется главным образом тепловым потоком. В земных условиях разность давлений в жидкости является функцией глубины погружения нагревателя и не зависит от теплового потока. Следует заметить, что на Земле стационарное состояние достигается после затухания колебаний, обусловленного действием сил вязкого трения. Это затухание происходит за временной масштаб значительно больший, чем время, представленное на рис. 5.

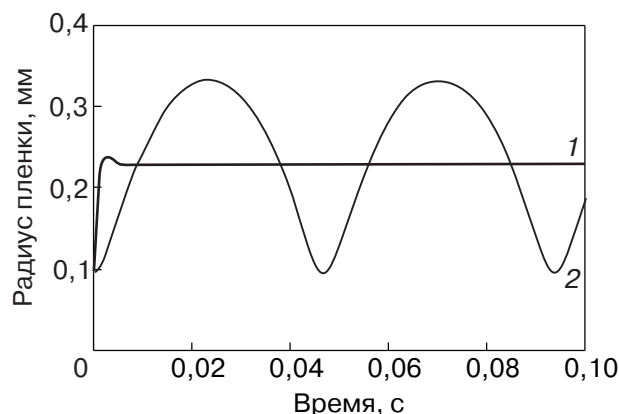


Рис. 5. Сравнение динамики паровой пленки при микрогравитации (1) и в земных условиях (2).

5. Заключение

Как показали расчеты, возможно развитие паровой пленки по трем сценариям:

- 1) размеры паровой пленки не увеличиваются из-за гидравлического сопротивления капилляров и действия поверхностного натяжения;
- 2) паровая пленка достаточно быстро увеличивается в размерах, при этом жидкость вытесняется из капилляров на внешнюю поверхность окружающей оболочки;
- 3) устанавливается стационарное состояние пленки.

Разность давлений в жидкости обусловлена кинетическими эффектами на межфазных поверхностях. Эта разность зависит от теплового потока.

Приведенные расчеты в рамках предложенной модели экспериментальной ячейки, предназначенной для исследований в условиях микрогравитации, показывают, что колебания паровой пленки при включении нагревателя не возникают.

Работа поддерживается Российским фондом фундаментальных исследований. Проект № 02-02-16311.

1. А.Р. Kryukov and S.W. Van Sciver, *Cryogenics* **21**, 525 (1981).
2. I.M. Dergunov, А.Р. Kryukov, and А.А. Gorbunov, *J. Low Temp. Phys.* **119**, 403 (2000).
3. P.V. Khurtin and А.Р. Kryukov, *J. Low Temp. Phys.* **119**, 413 (2000).
4. П.В. Королев, А.П. Крюков, *Вестник МЭИ* №1, 43 (2002).
5. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, *Гидродинамика. Теоретическая физика*, Т. 6, Наука, Москва, (1986).
6. С.С. Gorter and J.H. Mellink, *Physica* **15**, 285 (1949).

**Superfluid helium boiling in porous structure
under microgravity: model representation**

**I.M. Dergunov, P.V. Korolyov, A.P. Kryukov,
and Yu.Yu. Selyaninova**

The results of model calculation of superfluid helium boiling under microgravity conditions are reported. The evolution of a vapour film on the

cylindrical heater surface inside the porous thick-walled structure is analyzed. The molecular-kinetic theory methods are used to describe heat- and mass-transfer within helium interface. The equation of vapour-liquid interface motion is solved. The effect of experimental parameters on the vapour film properties is studied. The calculation data for microgravity and terrestrial conditions are compared.