

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЯЧЕЙКЕ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПЛАНИРУЕМЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ КИПЕНИЯ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ НА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

А.П. Крюков, Ю.Ю. Пузина  
(ФГБОУ ВПО «НИУ МЭИ»)

*Рассматривается вариант конструкции экспериментальной ячейки для исследования кипения сверхтекучего гелия при невесомости с размещением шарового нагревателя внутри цилиндрической пористой структуры. Цель исследования – определение структурных характеристик, при которых возможна визуализация динамики паровой плёнки на поверхности шара. При этом основное внимание уделяется процессам тепломассопереноса в сверхтекучем гелии, находящемся в стеснённом состоянии. Представляется интерпретация на основе предложенного подхода недавно опубликованных экспериментальных данных по кипению сверхтекучего гелия в условиях микрогравитации.*

**Ключевые слова:** *сверхтекучий гелий, невесомость, кипение, движение межфазной поверхности, пористая структура.*

### Введение

Использование сверхтекучего гелия (He-II) в космических приложениях позволяет улучшить качество получаемых результатов за счёт увеличения точности работы измерительных датчиков. Актуальность применения технологии криостатирования на орбите, в том числе на Международной космической станции, справедлива как для фундаментальных научных исследований, так и для повседневных приложений. Низкотемпературная технология достигла значительного прогресса за последние четверть века. Повышение надёжности и простота эксплуатации криогенного оборудования позволили устанавливать и успешно эксплуатировать его на борту космических аппаратов (КА).

Среди успешных проектов первого десятилетия XXI века следует отметить запуск двух космических телескопов «Гершель» и «Планк», который состоялся в 2008 году. Полезная нагрузка «Гершеля» состоит из трёх установок: гетеродинного датчика для излучения в дальнем инфракрасном диапазоне (HIFI), фотокамеры со спектрометром низкого разрешения (PACS) и ресивера спектральных и фотометрических изображений (SPIRE). КА обеспечивает условия для астрономических наблюдений в инфракрасном и субмиллиметровом диапазоне длин волн, что требует сверхнизких температур. Охлаждение на уровне 300 мК осуществляется двумя рефрижераторами сорбции гелия, которые не имеют движущихся частей и могут работать продолжительное время [1]. Криостат, заполненный на старте жидким гелием в объёме 2300 л при температуре 1,65 К, определяет время жиз-

ни обсерватории (ожидаемое – около четырёх лет) и обеспечивает работоспособность и устойчивость как систем наведения, так и научной инструментальной базы.

Для выполнения научной миссии обсерватории «Планк» измерение изменения температуры космического пространства должно происходить с беспрецедентной чувствительностью до  $\Delta T/T \sim 2 \times 10^{-6}$ . Детекторы двух инструментариев «Планка» охлаждаются один до температуры 20 К, а другой до 0,1 К. Сорбционный криокулер с использованием водорода в качестве рабочего тела разработан для обеспечения общей мощности охлаждения 1 Вт при температуре менее 19 К [2]. На второй ступени охлаждения рефрижератор с использованием эффекта Джоуля-Томпсона в замкнутом цикле работает на  $^4\text{He}$ . На финальной стадии охлаждения до 0,1 К осуществляется при смешении изотопов  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$ . Для этого три танка высокого давления заполняются  $^4\text{He}$  и один танк высокого давления –  $^3\text{He}$ . Газ по тонким трубкам, которые выполняют функции теплообменников с окружающей средой и с системами предварительного охлаждения, поступает к детекторам измерительной аппаратуры, где в результате термодинамического эффекта смешения достигается требуемый уровень температур.

Подобного рода системы являются сопроводительным оборудованием КА без функций фундаментальных научных исследований. Тем не менее они представляют и собственный научно-технологический и образовательный интерес.

Экспериментальное моделирование условий невесомости может происходить не только в глубоком космосе на орбитальной станции, но и на бор-

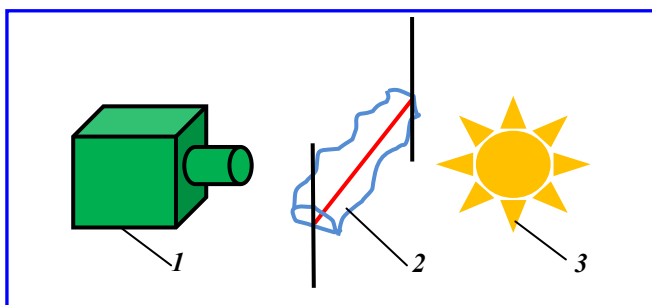


Рис. 1. Система наблюдений «на просвет»: 1 – видеокамера; 2 – объект исследования; 3 – источник света

ту самолёта, так называемые «flight» режимы. Кроме этого существует возможность кратковременной реализации условий невесомости при свободном падении объекта изучения. Такой подход используется в экспериментах японских авторов [3]. В статье [3] рассматривается изготовление криостата для проведения экспериментов по росту паровой плёнки на поверхности тонкой проволоки диаметром 50 мкм из манганина. Установка выполнена на компактной платформе диаметром 720 мм и высотой 980 мм. В состав входит криостат, вакуумный насос, высокоскоростные видеокамеры и необходимые электрические провода. Суммарная масса установки, смонтированной на платформе, составляет 80 кг. Криостат оснащён оптическими окнами для визуализации плёночного кипения He-II. Установка была испытана, чтобы проверить тепловые показатели и уровень безопасности в условиях микрогравитации с использованием 10 м свободного падения в колонне башни, оснащённой рельсовыми направляющими. Успешная эксплуатация системы на уровне температур от 1,94 до 2,05 К в условиях микрогравитации ниже  $10^{-3}$  ускорения свободного падения была подтверждена. Время свободного падения составляет 1,37 с, что на порядок меньше, чем параболический полёт ( $\approx 20$  с). Авторы приводят только первичные результаты, однако уже на сегодняшний момент можно сделать предварительные оценки по скорости движения межфазной поверхности. Тем не менее следует отметить, что краткосрочность этих экспериментов обуславливает нестационарный характер поведения паровой плёнки, тогда как особый интерес представляет собой возможность существования гладкой устойчивой стационарной паровой плёнки в течение нескольких секунд или даже нескольких десятков секунд.

#### Постановка задачи

Исследование динамики паровой плёнки при кипении He-II в условиях невесомости позволит не только проанализировать неравновесные эффекты

вблизи межфазной поверхности, но и количественно оценить характеристики процессов теплопереноса при движении квантовой жидкости внутри пористого тела. В последнем случае динамика квантовой жидкости в каналах пористой среды обусловлена наличием теплового потока. При рассмотрении такого рода экспериментальной ячейки [4] предлагается следующая схема: нагреватель проволочного типа помещается внутри коаксиальной пористой трубки регулярной структуры, всё свободное пространство которой заполняется He-II. При подаче тепловой нагрузки на поверхности нагревателя образуется замкнутая коаксиальная межфазная поверхность пар – жидкость. Численный анализ показал возможность достижения стационарного состояния паровой плёнки при определённых сочетаниях структурных и геометрических параметров пористого тела. Дополнительную сложность конструкторской реализации такой схемы экспериментальной ячейки создаёт необходимость визуализации динамики межфазной поверхности.

В большинстве случаев при исследованиях динамики границы раздела фаз пар – жидкость используется система видеофиксации «на просвет» (рис. 1). Такой способ сбора информации показывает удовлетворительные результаты не только для обычных и органических жидкостей, в частности для воды [5], спирта [6] и бензола [7], но и для криогенных рабочих тел: фреона [8], азота [9], гелия [10]. В последнем случае съёмка паровой плёнки на поверхности проволочного нагревателя производится во фронтальном направлении, что исключается при наличии пористой оптически непрозрачной трубки.

Собственная апробация системы видеофиксации «на просвет» дала возможность изучения динамики паровой плёнки при кипении He-II на поверхности шара [11]. Также исследовалось движение He-II в канале с паром при наличии осевого теплового потока [12]. Наблюдения производились через четыре стеклянные стенки сосудов Дьюара. Перед источником света размещался инфракрасный фильтр (ванна с медным купоросом) для предотвращения вскипания гелия. Внешний сосуд Дьюара заполнялся азотом.

Таким образом, для улучшения качества предполагаемых результатов целесообразным представляется переход от цилиндрической геометрии нагревателя, для которой видеосъёмка необходимо производить с торца объекта, к шаровой. При этом пористое тело по-прежнему имеет вид толстостенной цилиндрической трубы. Такой переход позволит также увеличить габаритные размеры экспери-

ментальной ячейки, что также способствует улучшению перспективы получения удовлетворительных результатов экспериментов.

В качестве материала пористой трубки предлагается использовать пакет тканых металлических сеток как общепотребительного технологического материала [13] с постоянными в пределах допусков структурными характеристиками: пористостью  $m$ , диаметром нити  $d_y$ , удельной поверхностью  $a$ . В связи со всеми вышеприведёнными факторами аналитическая задача исследования ставится следующим образом.

Шаровой нагреватель радиусом  $R_w$  осесимметрично помещается в свободное пространство пористой трубки внутренним радиусом  $R_0$ , толщиной  $L$  и длиной  $H$ . При подаче тепловой нагрузки  $q_w$  на поверхности шара образуется паровая плёнка с характерным размером  $R_1$  (рис. 2). Давление во внешнем объёме поддерживается на постоянном уровне  $P_b$ , соответствующем по линии насыщения температуре жидкости  $T_b$ . Целью численного анализа является установление таких параметров экспериментальной ячейки, при которых возможно достижение стационарного положения паровой плёнки.

Так как предыдущие расчёты показали, что скорость движения Не-II в каналах пористой структуры определяется тепловым потоком, следовательно, можно рассчитывать, что изменение геометрии нагревателя не повлечёт за собой нарушений в работе экспериментальной ячейки. Характер и количественные показатели изменений будут зависеть от сочетания геометрических размеров системы: нагревателя и пористой трубки. Последняя закрывается с торцов оптически прозрачными пластинами для осуществления видеосъёмки.

### Движение межфазной поверхности

Система уравнений формулируется в предположении квазистационарности процессов тепломассопереноса в Не-II. Жидкость считается несжимаемой, зависимость свойств от локальной температуры не рассматривается.

Динамика межфазной поверхности пар – жидкость анализируется на основании модели [14] с условием отсутствия гидростатической разности давлений по жидкости:

$$\ddot{R}_1 R_1 + 1,5 \dot{R}_1^2 = \frac{P_1' - P_0}{\rho'}, \quad (1)$$

где  $P_1'$  – давление жидкости вблизи межфазной поверхности, Па;  $P_0$  – давление жидкости на внутренней поверхности пористого тела, Па;  $\rho'$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

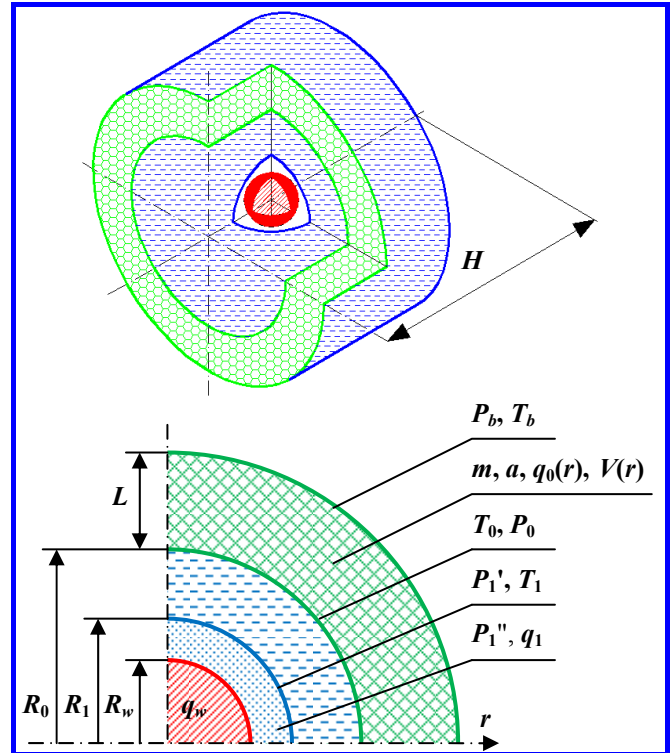


Рис. 2. Схема экспериментальной ячейки и основные параметры

Соответствующие начальные условия – равно нулю толщины паровой плёнки ( $R_1 - R_w$ ) и скорости движения межфазной поверхности  $\dot{R}_1 = V_1$ :

$$\text{при } \tau = 0, R_1 = R_w, \dot{R}_1 = 0. \quad (2)$$

Давление пара в плёнке  $P_1''$  определяется уравнением, полученным при решении кинетического уравнения Больцмана моментным методом для задач испарения-конденсации [15]:

$$P_1'' = 0,5 P_{S1} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{\sqrt{\pi} q_1}{P_{S1} \sqrt{2RT_1'}}} \right), \quad (3)$$

где  $P_{S1}$  – давление, соответствующее по линии насыщения температуре межфазной поверхности  $T_1'$ , Па;  $q_1$  – тепловой поток на межфазной поверхности, Вт/м<sup>2</sup>;  $R$  – индивидуальная газовая постоянная, Дж/(кг·К).

На границе раздела фаз также записывается условие совместности:

$$P_1' + \frac{2\sigma}{R_1} = P_1'' - 4\eta' \frac{\dot{R}_1}{R_1}, \quad (4)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение, Н/м;  $\eta'$  – вязкость жидкости, Па·с.

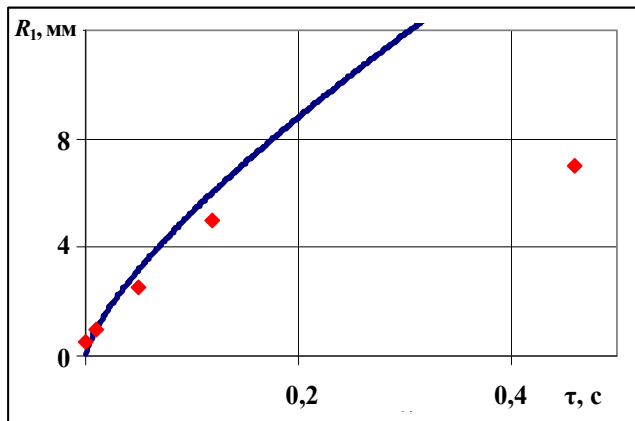


Рис. 3. Сопоставление расчётных и экспериментальных данных: линия – расчёт; точки – эксперимент

Тепловой поток  $q_1$  на межфазной поверхности определяется балансом:

$$q_1 = q_w \frac{R_w^2}{R_1^2}. \quad (5)$$

Теплоперенос по жидкости в полости пористого тела описывается соотношением Гортера – Меллинка, преобразованным для случая сферической геометрии:

$$q_1^3 = \frac{5}{R_1 \tilde{f}(T)} (T_1' - T_0) \left( 1 - \left( \frac{R_1}{R_0} \right)^5 \right)^{-1}, \quad (6)$$

где  $\tilde{f}(T)$  – функция Гортера – Меллинка,  $\text{К} \cdot \text{м}^5 / \text{Вт} \cdot \text{с}^3$ ;  $T_0$  – температура жидкости на внутренней поверхности пористого тела,  $\text{К}$ .

Если представить, что пористая оболочка отсутствует, то система уравнений (1) – (6) описывает динамику паровой плёнки в невесомости без ограничивающего тела (для этого величины с индексом «0» нужно приравнять к базовым с индексом «b»).

### Сравнение с экспериментальными данными

Анализ вышеупомянутых экспериментальных данных [3] показывает, что на основании видеозаписи роста паровой плёнки на поверхности проволоки и температурных показателей можно осуществлять моделирование процессов переноса в двухфазной системе. Для этого используются уравнения (1) – (6), записанные для случая цилиндрической геометрии, при этом считается, что индекс «0» относится к базовым параметрам. Из рас-

смотренных приведённых тестовых показателей эксперимента следует, что невесомость наступает через 1,18 с после включения нагревателя. Стадия предварительного нагрева, когда на поверхности проволоки образуются пузыри, при моделировании в первом приближении не рассматривается. Авторы [3] интерпретируют этот эффект наличием области нормального гелия вокруг нагревателя, которая образуется под воздействием теплового потока. Величины этого теплового потока недостаточно для образования сплошной плёнки пара, т. е. она меньше пиковой. За начало отсчёта принят момент начала падения криостата вместе с экспериментальной ячейкой. Далее расчёт проводится с заданием теплового потока на нагревателе (граничные условия II рода). Величина теплового потока рассчитывается по приведённой термограмме и соответствующему размеру паровой плёнки. Интересно отметить, что резкий рост температуры нагревателя на начальном этапе эксперимента переходит в дальнейшем к её плавному увеличению.

На рис. 3 приведено сопоставление расчётной кривой с экспериментальными точками. Несмотря на достаточно сильное расхождение временных зависимостей, следует отметить, что отличия по скорости роста паровой плёнки составляют примерно 50%, что допускается в задачах, связанных с кипением. В то же время приближённый характер тестовых экспериментов оставляет перспективу более точной оценки входящих в расчёт характерных величин процесса (исходных данных).

Таким образом, предложенная методика расчёта движения межфазной поверхности прошла апробацию на экспериментальных данных и может быть использована в дальнейшем при анализе подобного рода задач.

### Тепломассоперенос в пористой структуре

Процессы тепломассопереноса при течении жидкости внутри пористого тела описываются следующим образом. Особенностью He-II является связь теплового потока в каналах пористой структуры  $q_0(r)$  со скоростью движения нормальной компоненты  $V_n(r)$ , что следует из уравнений двухжидкостной гидродинамики Л.Д. Ландау. Выражение с учётом скорости движения жидкости  $V(r)$  в целом получено в [16]:

$$q_0(r) = \rho' S (V_n(r) - V(r)) \sqrt{T_b T_0}, \quad (7)$$

где  $S$  – энтропия жидкости,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

Также необходимо использовать термомеханическое соотношение:

$$P_b - P_0 = \rho' S(T_b - T_0). \quad (8)$$

Гидравлическое сопротивление пористой трубки зависит от структурных и механических характеристик материала, что выражается в полуэмпирической зависимости, полученной на основе псевдогомогенной модели фильтрации для ламинарного режима течения нормальной компоненты:

$$-\frac{dP}{dr} = k\eta' \frac{a^2}{m^3} V_n(r), \quad (9)$$

где  $k$  – константа Козени – Кармана;

Замыкание системы уравнений должно производиться на основании балансовых соотношений по потоку тепла и массы. Однако здесь возникает трудность, связанная с различием геометрии нагревателя и ограничивающего тела. Вся теплота от нагревателя поступает на внутреннюю поверхность пористого тела. С одной стороны, возможно предположение о равномерном распределении теплового потока по этой поверхности, то же касается и массыдвигающейся жидкости. С другой стороны, поскольку разные точки внутренней поверхности пористого тела находятся на разном расстоянии от источника теплоты в центре, то и распределение теплового потока и, соответственно, скорости жидкости в каналах пористой структуры может быть неравномерным, а согласовываться должны только интегральные характеристики. В первом приближении рассмотрим ситуацию, когда распределение потоков тепла и массы происходит равномерно по поверхности. Основанием этому можно считать высокую эффективность теплопереноса по жидкости, так что изменение температуры во внутреннем пространстве пористой трубки не превосходит сотых долей градуса. Тогда соответствующие выражения примут вид:

$$q_0(r) = q_w \frac{2R_w^2}{mH} \frac{1}{r}; \quad (10)$$

$$V(r) = V_1 \frac{2R_1^2}{mH} \frac{1}{r}. \quad (11)$$

Таким образом, сформулировано замкнутое математическое описание процессов тепломассопереноса при плёночном кипении He-II внутри по-

ристого тела при невесомости (1) – (11). Решение осуществляется с применением современных численных методов решения обыкновенных дифференциальных уравнений II порядка.

### Анализ результатов расчётов

На рис. 4 представлены результаты расчётов динамики межфазной поверхности при плёночном кипении He-II на поверхности шара ( $R_w = 2,5$  мм) внутри пористого тела при невесомости. Рассматриваются несколько значений величины тепловой нагрузки нагревателя  $q_w$  как величины, которую можно регулировать во время проведения эксперимента. В качестве материала пористой оболочки был выбран пакет тканой металлической сетки саржевого переплетения С-200 как материала, обладающего наиболее низкой пористостью в своём классе ( $m = 0,298$ ,  $a = 2,65$ ,  $d_y = 140$  мкм). Размеры пористой оболочки подобраны таким образом, чтобы достигалось стационарное состояние паровой плёнки ( $R_0 = 0,02$  м,  $L = 0,04$  м,  $H = 0,05$  м). Так же как и для случая цилиндрического нагревателя, достижение стационарного состояния паровой плёнки обеспечивается за счёт противотечения нормальной и сверхтекучей компоненты в каналах сложной формы пористой структуры. При этом нормальное движение обеспечивает перенос теплоты в радиальном направлении, тогда как сверхтекучее движение к нагревателю компенсирует перенос массы. Увеличение тепловой нагрузки нагревателя  $q_w$  приводит к повышению давления пара в плёнке, следовательно, и к увеличению размера плёнки  $R_1$ .

Из анализа численных результатов становится очевидным, что достижение паровой плёнки размера в несколько миллиметров за время в несколь-

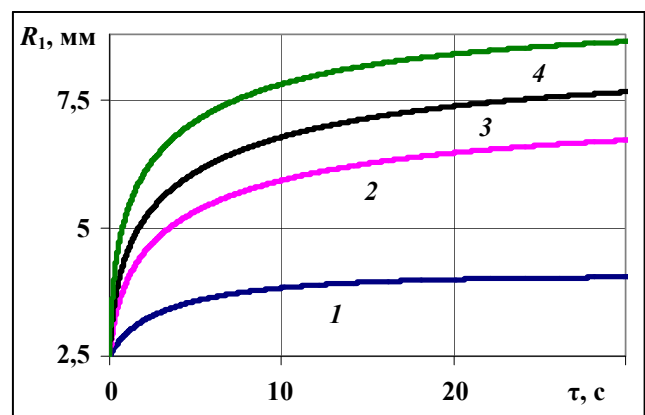


Рис. 4. Зависимость радиуса паровой плёнки от времени: 1 –  $q_w = 100$  Вт/м<sup>2</sup>; 2 –  $q_w = 300$  Вт/м<sup>2</sup>; 3 –  $q_w = 500$  Вт/м<sup>2</sup>; 4 –  $q_w = 1$  кВт/м<sup>2</sup>

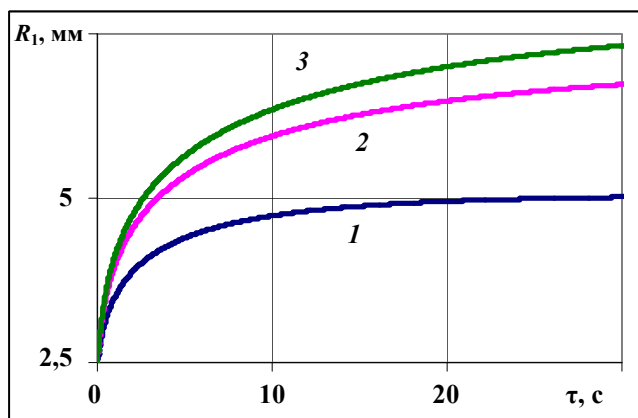


Рис. 5. Влияние продольного размера пористой трубки  $H$ : 1 – 2 см; 2 – 5 см; 3 – 7 см

ко десятков секунд при столь малой нагрузке в условиях полной земной гравитации невозможно. Вот почему таким важным представляется проведение экспериментов в условиях невесомости, что позволит выявить тонкие эффекты, связанные как с движением границы раздела фаз, свободным от влияния термического сопротивления жидкости, так и в каналах пористой структуры при течении квантовой жидкости.

Отличием физической модели, рассматриваемой в настоящей работе, от модели с цилиндрическим нагревателем является появление дополнительного характерного размера системы – длины пористой трубки  $H$ . Ограничения на размер пористой трубки накладываются вследствие необходимости визуализации паровой плёнки. Внутренний размер пористой структуры  $R_0$  выбирается таким образом, чтобы свободное пространство, заполненное He-II, определялось макроразмерами (по крайней мере миллиметрами). То же касается и длины оболочки  $H$ . Пористая трубка не должна быть слишком длинной, так как это затрудняет получение контрастной картины течения и приводит к существенной неравномерности распределения теплового потока по внутренней поверхности. Однако сокращение длины приводит к влиянию на характер эволюции паровой плёнки концевых эффектов, обусловленных наличием оптически проницаемых заглушек с торцов экспериментальной ячейки.

Анализ временных зависимостей (рис. 5) показывает, что увеличение линейного размера трубки  $H$  приводит к увеличению радиуса паровой плёнки  $R_1$ . Это связано с тем, что чем длиннее трубка, тем меньший удельный тепловой поток  $q(r)$  распространяется в каналах пористой структуры, следовательно, и скорость движения жидкости  $V(r)$  снижа-

ется. Последний фактор ведёт к уменьшению гидравлического сопротивления пористой оболочки в целом, что, в свою очередь, обуславливает возрастание радиуса плёнки.

### Заключение

В результате численного анализа рассматриваемой экспериментальной ячейки (см. рис. 2) показано, что достижение стационарного состояния паровой плёнки возможно при определённом сочетании структурных и геометрических параметров пористой оболочки. При этом также существенным оказывается влияние тепловой нагрузки нагревателя.

Сопоставление результатов расчётов по предложенной модели движения межфазной поверхности на цилиндрическом нагревателе показывает удовлетворительное согласование величины скорости процесса с известными экспериментальными данными. Это подтверждает работоспособность методики расчёта, основанной на сочетании методов молекулярно-кинетической теории и механики сплошных сред.

Среди основных направлений развития тематики данной работы следует отметить создание конструкции экспериментальной ячейки для исследования плёночного кипения He-II на поверхности цилиндра или шара в лабораторных условиях на кафедре низких температур МЭИ. При этом нагреватель размещается внутри пористой структуры, подобно тому, как это необходимо сделать для условий невесомости. Тестовые эксперименты позволят удостовериться в соответствии получаемых эксплуатационных характеристик прогнозируемым результатам по динамике межфазной поверхности. Проведение согласованного математического моделирования позволит также выявить отличия процессов на Земле и при невесомости, сопоставить процессы плёночного кипения без пористой структуры (в свободном объёме) и в условиях течения сверхтекучей жидкости в каналах пористой среды под влиянием расширения паровой плёнки и радиального теплового потока.

*Работа выполнена в рамках исследований по гранту РФФИ № 11-08-00724.*

### Список условных обозначений

- $a$  – удельная поверхность;
- $\tilde{f}(T)$  – функция Гортера – Меллинка,  $\text{К}\cdot\text{м}^5/\text{Вт}^3$ ;
- $H$  – длина пористой оболочки, м;
- $k$  – константа Козени – Кармана;
- $L$  – толщина пористой оболочки, м;
- $m$  – пористость;

$P$  – давление, Па;  
 $q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $R$  – индивидуальная газовая постоянная, Дж/(кг·К);  
 $R_i$  – радиус, м;  
 $r$  – радиальная координата, м;  
 $S$  – энтропия, Дж/(кг·К);  
 $T$  – температура, К;  
 $V$  – скорость движения жидкости, м/с.

Греческие символы:

$\eta$  – динамическая вязкость жидкости, Па·с;  
 $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости, Н/м;  
 $\tau$  – время.

Индексы:

' – относится к параметрам жидкости;  
 " – относится к параметрам пара;  
 0 – на внутренней поверхности пористой трубки;  
 1 – на межфазной поверхности;  
 b – во внешнем пространстве экспериментальной ячейки;  
 n – *normal* – относится к нормальной компоненте He-II;  
 s – параметры по линии насыщения;  
 w – радиальная координата, м.

### Литература

- Herschel flight models sorption coolers / L. Duband [at al.] // *Cryogenics*. – 2008. – Vol. 48. – Iss. 3–4. – P. 95–105.
- Design and performance of the dilution cooler system for the Planck mission / S. Triqueneaux [at al.] // *Cryogenics*. – 2006. – Vol. 46. – Iss. 4. – P. 288–297.
- Development of a small He II cryostat with optical windows for a microgravity experiment / N. Kimura [at al.] // *Cryogenics*. – 2011. – Vol. 51. – Iss. 1. – P. 74–78.
- Обоснование экспериментальных исследований процессов теплопереноса при кипении сверхтекучего гелия в условиях микрогравитации на международной космической станции. / А. П. Крюков, Ю. Ю. Пузина // *Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ*. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – Т. 112. – № 5. – С. 45–53.
- Визуализация кипения недогретой воды / Ю. А. Зейгарник, Д. Н. Платонов, К. А. Ходаков [и др.] // *ТВТ*. – 2011. – Т. 49. – № 4. – С. 584–588.
- Исследование структуры двухфазной пристенной области при гетерогенном взрывном кипении / Б. П. Авксентюк, В. В. Овчинников // *Труды РНКТ-5*. – М. : МЭИ, 2010. – Т. 4. – С. 33–36.
- Особенности взрывного вскипания жидкостей на плёночном микронагревателе / Ю. Д. Варламов, Ю. П. Мещеряков, М. Р. Предтеченский [и др.] // *ПМТФ*. – 2007. – № 2. – С. 81–89.
- Интенсификация теплообмена при плёночном кипении фреона-113 на поверхности вертикального цилиндра с луночным рельефом / В. М. Жуков, Ю. А. Кузма-Кичта, А. М. Агалцов // *Труды РНКТ-5*. – М. : МЭИ, 2010. – Т. 6. – С. 65–68.
- Павленко А. Н. Переходные процессы при кипении и испарении : дисс. ... д-р физ.-мат. наук / А. Н. Павленко. – Новосибирск : Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе, 2001. – 449 с.
- Спиридонов А. Г. Экспериментальное исследование теплоотдачи к сверхтекучему гелию : дисс. ... канд. техн. наук / А. Г. Спиридонов. – М. : МЭИ, 1981. – 168 с.
- Экспериментальное исследование кипения He-II на шаре / А. П. Крюков, А. Ф. Медников // *ПМТФ*. – 2006. – Т. 47. – № 6. – С. 78–84.
- Экспериментальное исследование движения гелия II в капилляре при наличии паровой полости вблизи нагревателя / П. В. Королёв, А. П. Крюков, А. Ф. Медников // *Вестник МЭИ*. – 2006. – № 4. – С. 27–33.
- Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических летательных аппаратов / В. В. Багров, А. В. Курпатенков, В. В. Поляев [и др.]. – М. : УНПЦ Энергомаш, 1997. – 328 с.
- Динамика паровой плёнки при остывании горячих металлических сфер, погружённых в сверхтекучий гелий / М. Биглари, И. М. Дергунов, А. П. Крюков // *Труды XIV школы-семинара молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках»*. – М. : МЭИ, 2003. – Т. 1. – С. 179–182.
- Кинетический анализ процессов испарения и конденсации / Т. М. Муратова, Д. А. Лабунцов // *ТВТ*. – 1969. – Т. 7. – № 5. – С. 959–967.
- Движение сверхтекучего гелия в капилляре с паром при наличии продольного теплового потока / П. В. Королёв, А. П. Крюков // *Вестник МЭИ*. – 2002. – № 1. – С. 43–46.

Поступила в редакцию 26.10.2011

*Алексей Павлович Крюков, д-р техн. наук, профессор, e-mail: KryukovAP@mail.ru.  
 Юлия Юрьевна Пузина, канд. техн. наук, научн. сотрудник, e-mail: Puzina2006@rambler.ru.  
 Т. (495) 362-78-41.*