

УДК 536.24

ОБОСНОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ КИПЕНИИ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ НА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

А.П. Крюков, Ю.Ю. Пузина
(ГОУВПО МЭИ (ТУ))

Исследуется динамика границы раздела фаз пар-жидкость при кипении сверхтекучего гелия ($He-II$) на поверхности цилиндрического нагревателя в условиях теоретической невесомости. Для обеспечения условий, необходимых для устойчивого кипения, используется коаксиальная пористая оболочка с известными структурными характеристиками. Решается уравнение, описывающее движение межфазной поверхности пар-жидкость. Расчет процессов переноса на межфазной поверхности проводится с использованием методов молекулярно-кинетической теории. Движение жидкости в порах описывается уравнениями, учитывающими особенности теплопереноса в $He-II$, а также специфику строения материала оболочки. Представляются результаты решения системы уравнений для разработанной физической модели. Исследуется влияние структурных характеристик пористого тела на динамику паровой пленки. На основании полученных численных данных проводится сопоставление процессов, которые могут протекать на Земле и в условиях невесомости.

Ключевые слова: сверхтекучий гелий ($He-II$), кипение при микрогравитации, рост паровой пленки, движение межфазной поверхности, пористая структура, молекулярно-кинетическая теория.

Введение

Среди основных задач Федеральной космической программы России на 2006 – 2015 гг. предусмотрено создание, развертывание и эксплуатация элементов российского сегмента международной космической станции (РС МКС) для проведения фундаментальных и прикладных исследований; реализация долгосрочной программы научно-прикладных исследований и экспериментов. В настоящей статье рассматривается подход к исследованию кипения сверхтекучего гелия при микрогравитации, которые обеспечиваются на борту Международной космической станции. Эти эксперименты направлены на выявление особенностей процессов переноса на межфазной поверхности.

Низкотемпературные эксперименты на борту МКС направлены на изучение неравновесных явлений вблизи точки фазового перехода: а) критические явления вблизи T_λ в $He-II$ – определение изменений теплофизических свойств вблизи границы раздела сверхтекучая жидкость – нормальная жидкость, где существенную роль играют нелинейные явления (минимальные ускорения необходимы для уменьшения вариаций давления вдоль столба жидкости); б) термодинамические измерения вблизи критической точки жидкость – газ в 3He – определение критических параметров в непосредственной близости к критической точке T_{cr} . Дополнительные

эксперименты в этой серии – измерения теплоемкости вблизи T_λ при постоянном тепловом потоке и изучения формы кривой сосуществования жидкость – пар вблизи T_{cr} в 3He .

Переход в сверхтекучее состояние 4He является наиболее типичным фазовым переходом второго рода. Межфазная поверхность сверхтекучий – нормальный (SN) компонент не проявляется в состоянии равновесия из-за отсутствия поверхностной энергии для непрерывного фазового перехода. Однако неравновесная межфазная поверхность может существовать, когда есть тепловой поток или сила тяжести. Авторы [1] отмечают, что эта неравновесная межфазная поверхность действует как обычная граница раздела между двумя стабилизированными фазами в месте осуществления фазового перехода первого рода. Межфазная поверхность SN также важна в криогенике, когда магнит со сверхпроводящей обмоткой эффективно охлаждается. В настоящее время межфазный переход при изменении теплового потока не был оптически исследован. Поэтому такое исследование особенно необходимо. Кроме того, чтобы понять поведение сверхтекучего 4He при охлаждении в условиях микрогравитации, необходимо исследовать механизм образования межфазной поверхности в условиях отсутствия силы тяжести. Авторы первоначально изготовили охлаждающийся сосуд как сепаратор жидкой и паро-

вой фазы при микрогравитации. Они визуализировали границу раздела фаз сверхтекучий – нормальный компонент, используя теневой графический метод. Они применяли крупномасштабные тепловые пульсации, используя нагреватель, чтобы произвести пузыри.

Межфазная поверхность была встревожена из-за восходящего перемещения этих произведенных пузырей. Авторы создали волны на межфазной поверхности через тепловой импульс, и наблюдали скорость распространения. Скорость была порядка 1 см/с.

Одно из наиболее значительных достижений в технологии низкотемпературного гелия – это использование сохраненного He-II как хладагента для проведения в космосе астрофизических экспериментов [2]. Развитие технологии заключается в том, чтобы поместить большое количество (объем 1000 л) He-II в космос и сохранять его в течение длительных периодов времени (вплоть до нескольких лет). Криогенные системы, связанные с этой технологией, имеют несколько общих черт. Ячейки хранения сконструированы таким образом, что они обладают чрезвычайно высокой тепловой эффективностью.

Для достижения длинного периода хранения, необходимого для успешного выполнения задач космического рейса, требуется тщательный подготовительный период.

Эти усилия являются существенными для успеха космических исследований, поскольку почти невозможно пополнить бортовые сосуды, а у активного охлаждения недостаточная мощность для удовлетворения потребности охлаждающегося оборудования. Другая важная технология, позволяющая работать в космическом пространстве – пористый сепаратор фаз. Это устройство, использующее уникальное свойство He-II, называемое эффектом фонтанирования, позволяет удерживать жидкий гелий в пределах сосуда, отводя пар, образовавшийся при поглощении теплоты He-II.

Хотя технология сохранения He-II, кажется, имеет успех в большом количестве космических экспериментов, проблемы, связанные с запуском больших сосудов дьюара He-II в космос, приводят ко многим вопросам безопасности и надежного функционирования таких систем.

В результате неясно, до какой степени в будущем космические запуски будут использовать эту технологию. Будущие гелиевые криогенные системы для орбитального базирования могут повлечь за собой активное использование регенеративных криокулеров, работа которых основана на цикле

Гиффорда – Мак-Магона, с возможностью запуска при температуре окружающей среды, сопровождаемые охлаждением и выполнением экспериментов и операцией на месте.

Известно, что кипение He-II реализуется только в пленочном режиме, а ограничения теплопереноса обусловлены процессами на межфазной поверхности. В большинстве расчетных теоретических моделей форма межфазной поверхности задается для пузырей – сферическая, для пленок – цилиндрическая. В условиях искажающего влияния гравитационных сил происходит видоизменение паровых структур, что ведет к появлению трудно контролируемых режимов кипения, 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 He-II к λ -точке.

В условиях невесомости из-за отсутствия сил, препятствующих росту пленки, неограниченное возрастание ее делает невозможным детальное исследование процессов переноса на межфазной поверхности.

В связи с этим представляет интерес пористая структура, которая, оставляя возможность для теплопереноса в жидкости, ограничивает неконтролируемый рост парового пространства. Такая модель позволит изучить динамику межфазной поверхности и процессов переноса без влияния силы тяжести.

Изучение закономерностей теплообмена при пленочном кипении He-II в условиях невесомости представляет особый интерес в связи с возможностью получения информации о специфике процессов переноса на межфазной поверхности. Сверхтекучий гелий обладает высокой эффективностью теплопереноса по жидкости, вследствие чего динамика двухфазных систем определяется только неравновесными эффектами через границу раздела фаз пар – жидкость.

Полученные результаты могут быть использованы при решении следующих проблем:

- определения условий возникновения парового взрыва как результата развития неустойчивости межфазной поверхности пар-жидкость, разработки методов предотвращения аварийных ситуаций;
- проектирования оборудования для экспериментальных исследований кипения He-II в невесомости;
- оптимизации режимов работы и конструкции теплообменных аппаратов специального назначения, в том числе капиллярных фазоразделителей, теплообменников с пористыми стенками и др.

Физическая и математическая модели

Рассматривается цилиндрический нагреватель заданного размера R_w , помещенный внутрь коаксиальной пористой оболочки с фиксированными структурными характеристиками (R_0, L, m), внутреннее пространство которой заполняется He-II (рис. 1). При подаче тепловой нагрузки определенной величины q_w на поверхности нагревателя образуется паровая пленка конечной толщины (радиусом R_1). В дальнейшем паровой объем увеличивается, заполняя внутреннюю полость пористой оболочки. Исследуется динамика межфазной поверхности на поверхности цилиндрического нагревателя в условиях невесомости.

Принимается, что на внешней поверхности пористого тела существует пленка жидкости вследствие хорошей смачиваемости He-II. Давление пара около межфазной поверхности во внешнем объеме P_b соответствует по линии насыщения температуре этой пленки T_b . Для исследования тепломассопереноса необходимо определить динамические характеристики системы и влияние на них параметров пористой оболочки.

Для экспериментальных исследований на орбите необходимо достижение стационарного состояния паровой пленки, т. е., чтобы часть внутренней полости оболочки была заполнена жидкостью, а часть паром. Целью теоретического исследования является установление параметров пористого тела, необходимых для формирования пленки конечного размера на нагревателе.

Предполагается, что жидкость является несжимаемой. Зависимость свойств жидкости от температуры не учитывается. Задача является стационарной в кинетическом масштабе времени и одномерной.

Математическое описание строится в допущении о квазистационарности процессов переноса. При описании переноса тепла и массы через межфазные поверхности использовались формулы, полученные молекулярно-кинетическим методом, свободным от ограничений по степени термодинамической неравновесности процессов переноса, а также соотношения, описывающие тепломассоперенос в He-II.

Динамика поверхности раздела фаз: пар – жидкость исследуется на основе аналога уравнения Рэлея в цилиндрических координатах с учетом влияния поверхностного натяжения и вязкости, для которого формулируются соответствующие начальные и граничные условия [3]. Давление в паровой пленке P'' определяется по уравнению, полученному при решении кинетического уравнения Больцмана моментным методом для задач испаре-

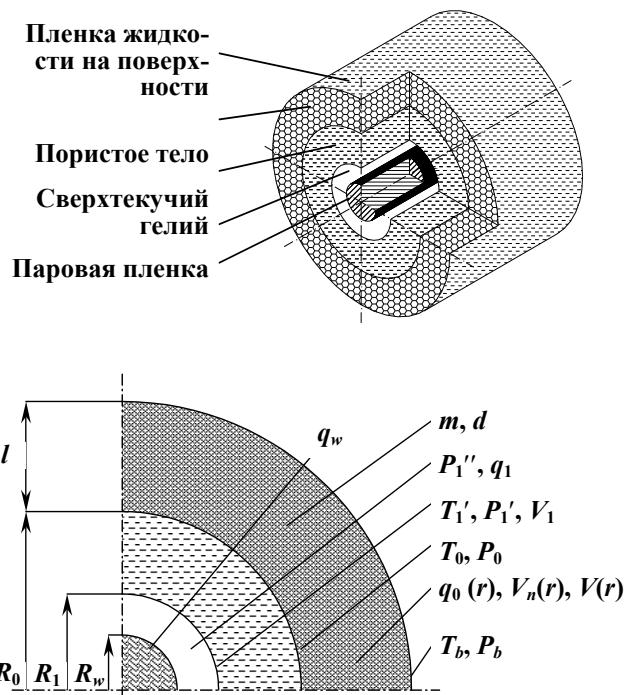


Рис. 1. Физическая модель и параметры

ния-конденсации [4]. Это неравновесное граничное условие позволяет установить связь актуального давления пара в пленке с давлением, соответствующим по линии насыщения температуре жидкости вблизи межфазной поверхности T_1' , а также потоками тепла q_1 и массы j_1 через нее. Теплоперенос по жидкости в полости пористого тела описывается соотношением Гортера – Меллинка, полученным для режима взаимного трения двух компонент He-II в стационарном состоянии [5]. Система замыкается балансовыми соотношениями.

Движение жидкости в капиллярах пористого тела описывается соотношениями, учитывающими особенности тепломассопереноса в He-II [6]: термомеханическим соотношением; выражением для плотности теплового потока в He-II q_0 , зависящей от относительной скорости движения нормальной компоненты $(V_n - V)$ [7]; гидравлическим сопротивлением пористой структуры, которое зависит от структурных и геометрических характеристик материала оболочки.

Модели пористой среды

При выборе пористой структуры следует исходить из комплексной оценки ее качеств, таких как:
 – транспортные свойства по отношению к тепло- и массопереносу;
 – надежность;
 – технологичность изготовления;
 – моделирование рабочих условий.

К транспортным свойствам можно отнести эффективную теплопроводность и способность к передаче тепла в осевом направлении без наступления критической ситуации (перегрев стенки, резкое повышение термического сопротивления оболочки). Надежность в данном случае является характеристикой вероятности выхода структуры из строя из-за протекания разнородных процессов, на которые влияют факторы, различные для разных периодов работы системы. Опасным является разрушение пористой структуры или закупорка пор (каналов) вследствие массопереноса. Технологичность изготовления включает в себя несколько характеристик. Это трудозатраты на изготовление и очистку структуры, оснащение экспериментальной ячейки, необходимость иметь оснастку большей или меньшей сложности, количество брака из-за невоспроизводимости необходимых характеристик, стоимость изготовления. Моделирование рабочих условий заключается, прежде всего, в возможности распространения данных наземных испытаний на работу в условиях невесомости.

При разработке низкотемпературных капиллярных структур возникают специфические задачи:

- изучение механизма переноса при наличии силы тяжести и экстраполяция данных, полученных в наземных условиях на случай, когда сила тяжести отсутствует;
- достижение оптимальных характеристик капиллярной структуры;
- выбор материалов, совместимых друг с другом;
- ресурсные испытания.

Изготовление экспериментальной ячейки включает следующие операции:

- изготовление нагревателя и торцевых заглушек;
- изготовление капиллярной структуры;
- удаление загрязнения с поверхностей деталей системы;
- сборка конструкции;
- заполнение теплоносителем;
- герметизация;
- проверочные испытания.

При заполнении системы теплоносителем необходимо:

- обеспечить достаточно глубокую очистку конструкционных материалов от нежелательных примесей;
- обеспечить достаточное количество теплоносителя в ячейке;
- осуществить герметизацию системы;
- обеспечить смачивание теплоносителем капиллярной структуры и нагревателя.

Широкий диапазон структурных, теплофизических, гидравлических, химических, оптических и других свойств пористых материалов, простота изготовления из них элементов конструкций, высокая интенсивность теплообмена – все это дает возможность использовать пористые теплообменные элементы в различных экстремальных условиях. Одновременно с интенсивным теплообменом при помощи пористых элементов можно реализовать процессы фильтрации, разделения фаз, дросселирования и др.

Для низкотемпературных систем применяются канавочные, гофрированные и пластинчатые капиллярные структуры. Механически стабильной капиллярной структурой являются радиальные канавки в корпусе трубы. Канавки могут быть прямоугольными, треугольными, трапециевидными или овальными. Изготовление канавок может осуществляться протяжкой, экструзией, фрезерованием, штамповкой, гофрированием, вытравливанием и другими способами на заготовке. Канавочные капиллярные структуры изготавливают и посредством набора пластинок, собранных с помощью колец и помещенных внутри корпуса. Капиллярные каналы при этом образуются посредством зазора между пластинами. Вышеперечисленные типы капиллярной структуры обладают следующими преимуществами:

- постоянное поперечное сечение канала;
- отсутствие тупиковых и раздваивающихся каналов;
- надежность.

К недостаткам можно отнести сложность изготовления радиальных каналов и достаточно большие размеры капилляров (порядка сотен микрон). Гидравлическое сопротивление прямых радиальных каналов постоянного поперечного сечения определяется уравнением Хагена – Пуазейля для ламинарного движения жидкости [6].

Из рассмотрения известных моделей фильтрации следует, что ввиду сложности учета раздельного влияния и многообразия факторов, определяющих потери давления, целесообразно представлять пористую среду псевдогомогенной системой, а реальные свойства учитывать комплексно путем введения специальных параметров. Тогда для описания течения жидкости внутри пористой среды, аналогично [8], используется традиционное уравнение фильтрации для ламинарного режима [9]. Коэффициент проницаемости k определяется структурой пористого тела [10]. Также необходимо учитывать увеличение свободного пространства пор по мере удаления от нагревателя.

Во многих случаях в качестве капиллярных фазоразделителей используются тканые металлические сетки [11]. В принципе возможно применение других материалов – пористых металлов, которые могут быть изготовлены из порошков, а также сплошных металлов, в которых выполнены отверстия или каналы малого диаметра.

Пористые металлы из тканых сеток характеризуются весьма высоким гидравлическим сопротивлением, что объясняется, прежде всего, повышенной в сравнении с исходной сеткой толщиной и пониженной пористостью. Материалы из порошков обладают незначительной прочностью и могут быть источником мелких частиц, способных отрицательно влиять на работоспособность конструкции.

Для обозначения в литературе сеток с нулевыми ячейками используется термин «фильтровые сетки». Такие сетки характеризуются тем, что проволоки одного из направлений (утка) прилегают друг к другу настолько плотно, что между ними практически отсутствуют просветы.

По сути дела, этот материал является тканью из металлического моноволокна. Обычные ткани изготавливаются из крученых нитей, которые состоят из большого числа элементарных волокон. Существует три типа переплетения плотных сеток: плотно, двусторонняя саржа и односторонняя саржа.

Тканые сетки являются регулярными структурами, и их параметры в пределах некоторых допусков постоянны. Металлические сетки, собранные в пакет, являются необходимым по условиям эксперимента в невесомости пористым телом. Для характеристик тканых металлических сеток различного переплетения отечественного производства можно провести расчет разности давлений по пакету при течении He-II. Однако реальные свойства тканых сеток возможно таковы, что стационарное состояние паровой пленки не достигается.

Наиболее общей зависимостью, позволяющей вычислить разность давлений Δp на пористом образце толщиной l для малой скорости V набегающего потока, является установленное экспериментально соотношение [11], использующее полуэмпирический коэффициент k – константу Козени – Кармана, которая зависит от пористости. При определении константы Козени – Кармана учет экранирования проволоками друг друга целесообразен, а для сеток с малой (меньшей 0,4) пористостью просто необходим. Теоретические и экспериментальные значения k удовлетворительно согласуются в требуемом диапазоне параметров.

Границы применимости

При определенной скорости нормального движения возможен переход от ламинарного к турбулентному течению потока, который ведет себя как обыкновенная жидкость в каналах. Критическое значение числа Рейнольдса определяется по скорости нормальной компоненты и равно 1200 [12]. Так как скорость движения жидкости в каналах зависит в том числе и от тепловой нагрузки нагревателя, то можно установить критическое значение теплового потока $q_{wcr} = 8,3 \cdot 10^5$ Вт/м² для прямых радиальных каналов $d_k = 20$ мкм.

Для пористых тел сложной конфигурации характер течения непростой, и для них критическое значение числа Рейнольдса, которое оценивается по скорости жидкости в каналах V_{cr} , равно 10 [13]. Расчеты по разработанной модели показывают, что максимальное значение скорости жидкости в каналах не превосходит нескольких миллиметров в секунду, что соответствует числам Рейнольдса порядка единицы. Движение в каналах пористой структуры остается ламинарным в исследуемом диапазоне параметров.

Критическое значение скорости сверхтекучего движения, при котором проявляется взаимодействие компонент, определяется эмпирическим соотношением [12] и зависит от диаметра канала. При размере капилляра $d_k = 20$ мкм значение критической скорости $V_{scr} = 4,73$ см/с. По этому значению скорости определяется критический тепловой поток $q_{wcr} = 5127$ Вт/м². Эта величина меньше, чем критический тепловой поток для нормальной компоненты.

Анализ результатов решения

При решении сформулированной системы уравнений были получены различные характеристики процесса роста паровой пленки на поверхности нагревателя, а также проведено параметрическое исследование задачи.

Влияние теплового потока

Особенностью данной задачи является связь теплового потока с перепадом давления по жидкости. Это обусловлено эффектами на межфазной поверхности, описываемыми на основании методов молекулярно-кинетической теории, и спецификой теплопереноса в каналах рассматриваемой структуры. По мере роста паровой пленки тепловой поток, приходящий на межфазную поверхность q_1 , уменьшается, также как и влияние сил поверхностного натяжения. В конце концов, перепад давления по жидкости в полости пористого тела становится

равным нулю, что обуславливает неподвижное состояние пленки. Перепад давления в каналах пористого тела действует на нормальную компоненту сверхтекучей жидкости, которая является носителем теплового потока и движется в противотоке со сверхтекучей компонентой, не имеющей вязкости. Это противотечение обеспечивает неподвижность жидкости в целом. Стационарное состояние пленки устанавливается, когда перепад давления в каналах достигает такой величины, которая соответствует скорости движения нормальной компоненты жидкости, определяемой тепловым потоком. В итоге влияние располагаемой разности давления уравнивается действием сил вязкости. Специфика He-II состоит в том, что гидродинамика и теплоперенос определяются одним и тем же потоком массы в отличие от обычной жидкости.

Расчет показывает, что при определенных геометрических характеристиках построенной физи-

ческой модели ($R_w = 0,001$ м; $R_0 = 0,01$ м; $L = 0,01$; $m = 0,5$; $R_k = 10^{-5}$ м; $P_b = 3169$ Па ($T_b = 2$ К)) возможно достижение стационарного состояния паровой пленки (рис. 2). Кроме этого возможны и другие варианты развития паровой пленки на поверхности цилиндрического нагревателя в зависимости от параметров процесса. Так, например, при малых размерах нагревателя и заданном тепловом потоке пленка не может увеличиваться в размерах из-за действия сил поверхностного натяжения и вязкого трения. При больших размерах нагревателя пленка растет достаточно быстро, вытесняя жидкость через каналы во внешнюю область, пар заполняет весь объем внутренней полости, стационарное состояние не достигается.

С увеличением тепловой нагрузки время выхода на стационарный режим уменьшается (рис. 2). Это обусловлено вышеописанными эффектами: система «подстраивается» под внешнее воздействие. Скорость жидкости в капиллярах определяется величиной тепловой нагрузки нагревателя, а чем быстрее происходит рост паровой пленки, тем быстрее система приходит в положение баланса потоков тепла и массы, при неподвижном положении межфазной поверхности.

Попробуем установить аналогию между действием сил вязкости в капиллярах и действием сил гравитации в условиях наземного эксперимента. Перепад давления по жидкости в стационарном состоянии при выбранном наборе исходных данных (кривая 2 на рис. 2) составляет 0,846 Па, что эквивалентно погружению на глубину 0,591 мм ($\Delta P = \rho gh$). Осуществление такого минимального погружения в земных условиях нагревателя размером 1 мм технически невозможно, следовательно, исследование при таких тепловых нагрузках является сложной задачей, а условия невесомости предоставляют такую возможность.

Влияние геометрии пористой среды

Главной характеристикой, определяющей рост паровой пленки, является гидравлическое сопротивление пористого тела. Перепад давления по жидкости прямо пропорционален толщине оболочки (длине каналов) и обратно пропорционален размеру каналов. Это утверждение справедливо не только для капиллярной модели, но также и для пористых тел сложной конфигурации. При уменьшении длины канала перепад давления в жидкости прямо пропорционально снижается и паровая область увеличивается (рис. 3).

Чем больше размер пленки в стационарном состоянии, тем больше времени необходимо на дос-

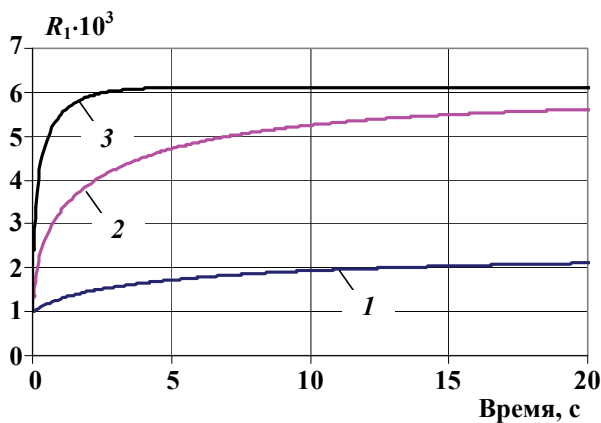


Рис. 2. Влияние теплового потока при q_w (Вт/м²):
1 – 10²; 2 – 10³; 3 – 10⁴

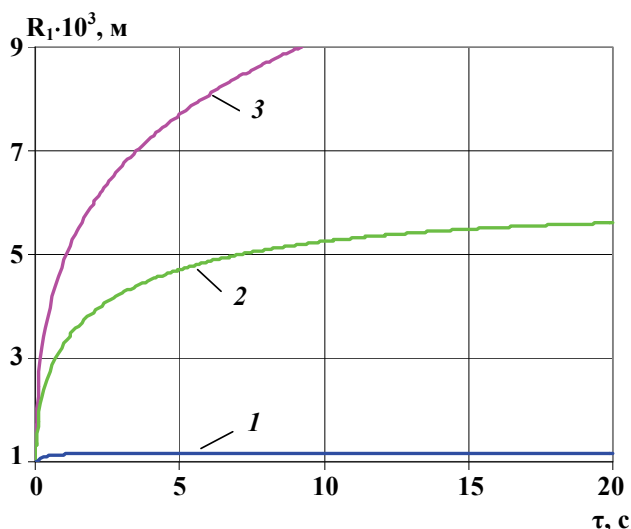


Рис. 3. Влияние толщины оболочки на рост паровой пленки L (м): 1 – 0,05; 2 – 0,01; 3 – 0,004

тижение этого положения, так как при постоянной тепловой нагрузке скорость движения жидкости, а, следовательно, и межфазной поверхности лимитирована.

Возможна и ситуация, когда жидкость вытесняется паром из внутренней полости, баланс между разностью давлений, обусловленной действием сил вязкого трения, и перепадом давлений пара, обеспеченным неравновесными эффектами, не достигается.

Как видно из графиков, широкий диапазон изменения рабочих параметров приводит к различным характеристикам процессов в системе. Существует возможность подбора параметров рабочей системы под желаемые временные и геометрические характеристики процесса эволюции паровой пленки He-II на поверхности нагревателя. При этом необходимо учитывать влияние исходных данных на процесс эволюции паровой пленки. Полученные результаты распространяются также и на пористые среды сложной конфигурации, так как процессы теплопереноса в пористом теле определяются одними и теми же эффектами.

Сравнение моделей пористой среды

Выбор пористой оболочки для экспериментальных исследований определяется не только требуемыми характеристиками процесса, но и технико-экономическими показателями, а также массогабаритными ограничениями.

На рис. 4 представлено сопоставление результатов расчета эволюции паровой пленки для разных моделей пористой оболочки: для тканой металлической сетки одностороннего саржевого переплетения ($d_y = 140$ мкм); прямых радиальных каналов постоянного поперечного сечения (в данном случае круг $d = 50$ мкм); монодисперсного слоя сферических засыпок ($d = 100$ мкм). Все характерные размеры выбраны одинаковыми.

Результаты расчетов процесса роста паровой пленки на поверхности цилиндрического нагревателя при кипении He-II в условиях невесомости для разных моделей пористого тела качественно не отличаются, а количественно зависят от структурных параметров.

Это позволяет сделать вывод о том, что независимо от выбора модели пористого тела, требуемые характеристики процесса можно достичь путем подбора соответствующих геометрических характеристик оболочки.

Особое внимание при расчете следует обратить на условия проведения экспериментов. Внешнее давление определяет, прежде всего, базовую тем-

пературу и, как следствие, теплофизические свойства жидкости. Незначительное изменение плотности и вязкости жидкости не ведет к кардинальным переменам в характеристиках процесса. Тем не менее, уменьшение температуры на полградуса при уменьшении давления насыщенных паров в 6,6 раза, в свою очередь вызывает падение энтропии в 4,1 раза.

Понижение температуры на полградуса ведет к резкому уменьшению стационарного значения размера пленки в 3,8 раза. Это связано с тем, что уменьшение энтропии ведет к ускорению жидкости, скорость движения которой определяется действующим тепловым потоком. Увеличение скорости ведет к увеличению гидравлического сопротивления капилляра.

Для конструкторской разработки экспериментальной ячейки, соответствующей представленной физической модели, необходимо решить комплексную задачу оптимизации системы по нескольким параметрам.

Сопоставление процессов на Земле и в условиях невесомости

Используются результаты расчета эволюции паровой пленки на поверхности цилиндрического нагревателя в условиях полной земной гравитации, полученные с использованием исходных данных эксперимента [14] по получению гладкой стационарной пленки ($R_w = 95,5$ мкм; $q_w = 18,1$ кВт/м²; $h = 8$ мм; $P_b = 664$ Па).

Сравниваются нестационарные характеристики процесса на Земле и в условиях теоретической невесомости с таким подбором параметров пористой структуры, чтобы стационарные положения пленки совпадали (рис. 5).

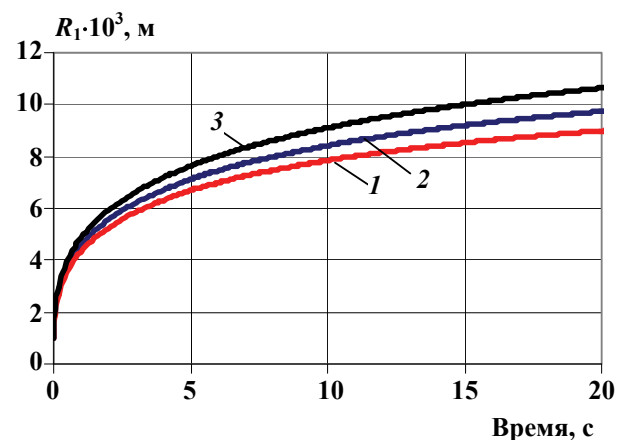


Рис 4. Сравнение пористых сред: 1 – каналы; 2 – сетки; 3 – слой сферических засыпок

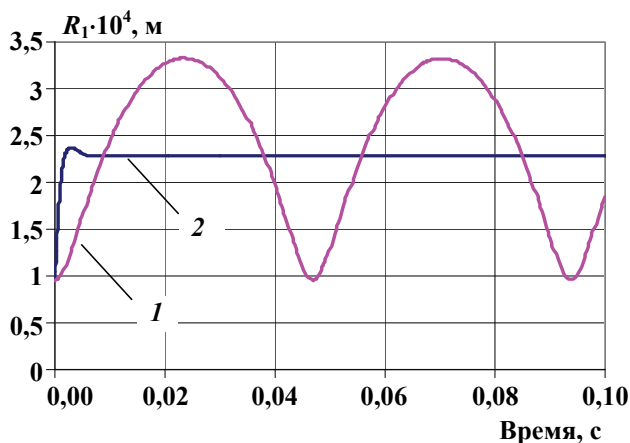


Рис. 5. Сравнение процессов: 1 – расчет процесса в условиях земной гравитации; 2 – расчет процесса при невесомости

Выбор параметров пористой оболочки обеспечивает необходимый размер пленки.

Главным отличием временных характеристик процесса является отсутствие колебаний в условиях невесомости. Это обуславливается тем, что перепад давления по жидкости связан с тепловой нагрузкой нагревателя и текущим положением межфазной поверхности. Поведение системы определяется внешним воздействием. На Земле в перепад давления входит составляющая, обусловленная действием поля силы тяжести и независимая от внутренних параметров конструкции. Затухание колебаний обеспечивается действием сил вязкого трения.

Заключение

Для создания условий, необходимых для обеспечения устойчивого кипения He-II в условиях невесомости, предлагается использовать пористую оболочку.

В результате решения системы уравнений, описывающей представленную физическую модель, получены зависимости радиуса паровой пленки от времени при различных наборах исходных данных. Проведенные расчеты показывают, что перепад давления по жидкости внутри, связанный со скоростью движения нормальной компоненты, зависит от величины теплового потока.

Стационарное положение паровой пленки при кипении сверхтекучего гелия внутри пористой оболочки в условиях невесомости может быть достигнуто с использованием любой из рассмотренных моделей пористой среды при реализации соответствующих расчетных режимов течения в ней нормальной компоненты.

Размер паровой пленки тем больше, чем меньше гидравлическое сопротивление пористой оболочки. Качественно результаты, полученные для различных моделей пористой среды, не отличаются, а количественно зависят от структурных характеристик материала оболочки.

Кроме этого, возможны и другие варианты динамики паровой пленки на поверхности цилиндрического нагревателя в зависимости от геометрических характеристик и материала капиллярно-пористой оболочки, а также других параметров процесса.

Так, например, при малых тепловых потоках пленка не может увеличиваться в размерах из-за действия сил поверхностного натяжения и вязкого трения. При больших тепловых потоках пленка растет достаточно быстро, вытесняя жидкость через капилляры во внешнюю область, пар заполняет весь объем внутренней полости.

Анализ оригинальной модели процесса роста паровой пленки на поверхности цилиндрического нагревателя показал принципиальное отличие характера протекания процессов на Земле и в условиях невесомости.

Численные данные показывают возможность достижения паровой пленкой стационарного состояния при определенном сочетании структурных характеристик и геометрических параметров пористой оболочки, что обуславливает возможность проведения соответствующих экспериментальных исследований на борту Международной космической станции.

Список обозначений:

- h – глубина погружения нагревателя, мм;
- k – коэффициент проницаемости;
- L – толщина оболочки, м;
- m – пористость;
- q – удельный тепловой поток, Вт/м²;
- P – давление, Па;
- R_i – радиус, м;
- r – радиальная координата, м;
- T – температура, К;
- V – скорость, м/с;

Индексы:

- b – параметры на удалении;
- cr – критические параметры;
- n – нормальное движений сверхтекучей жидкости;
- w – параметры нагревателя;
- λ – вблизи лямбда точки;

1 – параметры межфазной поверхности пар-жидкость;
 0 – параметры на внутренней поверхности оболочки;
 ' – параметры жидкости;
 " – параметры пара.

Литература

1. Research Activities of Topical Groups in JAXA Observation of the Interfacial Wave Propagating at Superfluid-Normal Interface of Helium-4 / Taniguchi Jiro et al. // Journal of the Japan Society of Microgravity Application, 2006. – Vol. 23. – № 3. – P. 134 – 138.
2. Van Sciver S.W. Advances in Helium Cryogenics / S.W. Van Sciver // Cryogenic Engineering: Fifty Years of Progress. – Springer, 2007. – P. 161 – 178.
3. Горбунов А.А. Эволюция паровой полости при кипении сверхтекучего гелия / А.А. Горбунов, И.М. Дергунов, А.П. Крюков // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. – М.: Издательство МЭИ, 1998. – Т. 4. – С. 80 – 83.
4. Some models of Heat Transfer at Film Boiling of Superfluid Helium Near λ -point in Microgravity / P.V. Khurtin, A.P. Kryukov // Journal of Low Temperature Physics. – 2000. – Vol. 119. – № 3/4. – P. 413 – 420.
5. On the irreversible processes in liquid helium II / C.J. Gorter, J.H. Mellink // Physica. – 1949. – Vol. XV. – № 3 – 4. – P. 285 – 304.
6. Ландау Л.Д. Теоретическая физика. В 10 т. Т.6. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1988. – 736 с.
7. Движение сверхтекучего гелия в капилляре с паром при наличии продольного теплового потока / П.В. Королев, А.П. Крюков // Вестник МЭИ. – 2002. – №1. – С. 43 – 46.
8. Кипение He-II в пористой структуре при микрогравитации: модельное представление / И.М. Дергунов, П.В. Королев, А.П. Крюков [и др.] // Физика низких температур (на английском языке Low temperature physics). – 2003. – Т. 29. – № 6. – С. 653 – 658.
9. Павлюкевич Н.В. Введение в теорию тепло- и массопереноса в пористых средах / Н.В. Павлюкевич. – Мн.: Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАНБ, 2002. – 141 с.
10. Гидравлическое сопротивление и тепломассообмен / Г.А. Витков, Л.П. Холпанов, С.Н. Шерстнев. – М.: Наука, 1994. – 288 с.
11. 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.
12. Van Sciver S.W. Helium Cryogenics / S.W. Van Sciver. – London: Plenum press, 1986. – XXII. – 429 p.
13. Белов С.В. Пористые металлы в машиностроении / С.В. Белов. – М.: Машиностроение, 1981. – 247 с.
14. Спиридонов А.Г. Экспериментальное исследование теплоотдачи к сверхтекучему гелию / А.Г. Спиридонов // Дисс. канд. тех. наук. – М.: МЭИ, 1981. – 168 с.

Поступила в редакцию 18.06.2009

*Алексей Павлович Крюков, д-р техн. наук, профессор, т. 362-78-41, e-mail: KryukovAP@mail.ru.
 Юлия Юрьевна Пузина, канд. техн. наук, инженер, т. 362-78-41, e-mail: Puzina2006@rambler.ru.*