

## ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ДВИЖЕНИЮ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ В КАПИЛЛЯРЕ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПЛАНИРУЕМЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ НА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

И.Н. Голованов, П.В. Королев, Ю.Ю. Пузина  
(ГОУВПО «Московский энергетический институт  
(технический университет)»)

*Анализируются проблемы обеспечения условий, необходимых для экспериментального исследования кипения сверхтекучего гелия в невесомости на Международной космической станции. Описывается экспериментальная установка, на которой проводятся опыты по движению сверхтекучего гелия в каналах с паром при наличии теплового потока. Соответствующее математическое описание формулируется на основании сочетания методов механики сплошных сред, молекулярно-кинетической теории и двухжидкостной гидродинамики Л.Д. Ландау. Модель с прямыми радиальными каналами рассматривается как вариант использования пористой оболочки для удержания объема жидкости при микрогравитации, реализуемой в космическом аппарате. Представлены результаты проведенных экспериментов и обоснование проведения дальнейших испытаний.*

**Ключевые слова:** сверхтекучий гелий (He-II), невесомость, кипение, микроканалы, движение межфазной поверхности, пористая структура, двухжидкостная гидродинамика, молекулярно-кинетическая теория.

**Введение.** В рамках развития Российского сегмента Международной космической станции планируется создание низкотемпературной лаборатории. Эксперименты по исследованию фундаментальных основ процессов теплопереноса направлены в том числе и на анализ поведения сверхтекучего гелия, который является уникальным по своим свойствам хладагентом с высокой эффективностью переноса тепла по жидкости, что особенно актуально в космическом пространстве, где отсутствуют естественные теплостоки конвективного типа. В работе [1] рассматривается 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.

Основным планируемым результатом исследований кипения He-II при микрогравитации станет информация о процессах переноса на межфазной поверхности в условиях существенной неравновесности. Многие современные технологии, такие как тепловая и атомная энергетика, химические, в частности нефтехимические производства, трубопроводный транспорт и др. в большой мере основаны на использовании многофазных систем, прежде всего газожидкостных. При этом в качестве теплоносителей выступает не только гелий, используемый, например, в системах криостатирования сверхпроводящих магнитов, но и жидкие металлы в теплообменной аппаратуре атомных станций, а также вода.

Силовые элементы циркуляционных контуров атомных станций работают в тяжелых условиях: высокий уровень температур и давлений; значительные термические напряжения, обусловленные большими тепловыми нагрузками и градиентами температуры; высокие скорости теплоносителя, способствующие появлению вибраций. Поэтому во время эксплуатации серьезное внимание обращается на поддержание заданного безопасного теплогидравлического режима [2]. В контексте вероятности возникновения аварийной ситуации с тяжелыми последствиями, связанными с разрушением активной зоны, возрастает объем исследований, посвященных паровому взрыву – явлению резкого (быстрого) образования большого количества пара, сопровождающееся местным повышением давления, вследствие перехода тепловой энергии (затрачиваемой на испарение жидкости и расширение пара) в механическую [3]. При этом особое внимание привлекает как динамика паровой пленки, так и возможность ее разрушения, а также распределение параметров (давления, температуры) в жидкости. Анализ самых различных (разнородных) экспериментов, в которых наблюдаются кратковременные достаточно сильные повышения давления (пики давления) показывает, что такого рода эволюции характерны заключительным стадиям схлопывания пузырей рэлеевского типа. Таким образом, механизм возникновения ударной волны связывается с процессами теплопереноса на межфазной поверхности. Решение сопряженных задач с движением межфазной поверхности в условиях значительных отклонений параметров от состояния локального термодинамического равновесия способствует интерпретации технологических процессов и природных явлений.

Постановка граничных условий на межфазной поверхности пар – жидкость при решении сопряженных задач тепломассопереноса является центральным вопросом физических и математических моделей гидрогазодинамики. Условия совместности по потокам тепла, массы, импульса замыкают системы уравнений сохранения для каждой из фаз. Вместе с тем, высокоинтенсивные процессы в системах с проницаемой для потока массы границей раздела фаз необходимо анализировать с использованием методов молекулярно-кинетической теории, которые позволяют найти взаимосвязь параметров пара с температурой межфазной поверхности и соответствующим давлением по линии насыщения, предоставляя тем самым возможность определить потоки массы и тепла на этой поверхности.

В методах механики сплошной среды при постановке граничных и начальных условий для системы уравнений сохранения задается массовый поток или скорость пара вблизи межфазной поверхности. При этом зачастую принимается, что вся теплота, поступающая от нагревателя, затрачивается на испарение жидкости. В большинстве случаев это является оправданным, так как тепловой поток, отводящийся теплопроводностью по слою жидкости, а также на нагрев жидкости и пара, существенно меньше теплового потока на испарение. Тем не менее, встречаются ситуации, когда такие допущения не являются достоверными, например при недогреве жидкости до состояния насыщения. Ограничения по степени неравновесности, накладываемые на применение сплошносредного подхода, отсутствуют при использовании кинетического уравнения Больцмана. Таким образом, особенности тепломассопереноса, обусловленные нестационарными неравновесными процессами, поддаются качественной и количественной оценке.

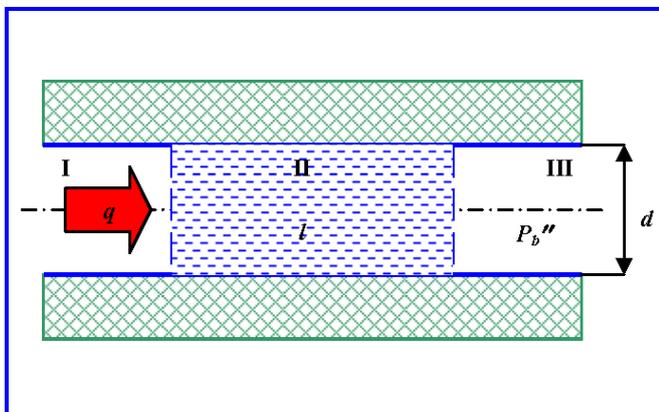


Рис. 1. Постановка задачи

**Процессы переноса в сверхтекучем гелии.** Эксперименты по исследованию пленочного кипения He-II на Земле показывают, что величина тепловой нагрузки определяется глубиной погружения нагревателя  $h$  в сверхтекучий гелий, т.е. значением гидростатического давления. Разработаны теоретические модели, обосновывающие такую закономерность и позволяющие проводить соответствующие расчеты. В частности, из этих моделей следует, что при  $h$  стремящемся к нулю пропадает основная причина прекращения роста паровой пленки в сверхтекучем гелии. Проверка правомерности этих моделей для микрогравитации может быть реализована в виде эксперимента по росту паровых пленок большой толщины, что не может быть сделано на Земле. С другой стороны, необходимое воздействие на пленку (в земных условиях гидростатический напор) для осуществления пленочного кипения при больших значениях тепловой нагрузки может быть реализовано в условиях микрогравитации за счет особенностей течения сверхтекучего гелия в микропористых структурах.

Возможная конструкция экспериментальной установки для изучения процесса пленочного кипения сверхтекучего гелия в невесомости рассматривается в [1]. Цилиндрический нагреватель помещен внутри коаксиальной пористой оболочки, внутреннее пространство которой заполняется сверхтекучим гелием. При подаче тепловой нагрузки на поверхность нагревателя образуется паровая пленка. В дальнейшем паровой объем увеличивается, заполняя внутреннюю полость пористой оболочки.

На начальном этапе расчетно-экспериментальных исследований реальное пористое тело, имеющее каналы сложной структуры, заменяется макетом с прямыми радиальными капиллярами, не связанными друг с другом. В первую очередь решаются проблемы, связанные с процессами тепломассопереноса при течении He-II в капиллярах такого модельного тела. Для проектирования экспериментальной ячейки необходимо иметь представление о поведении сверхтекучего гелия, заполняющего пористую оболочку, при поступлении теплового потока на ее внутреннюю сторону. С целью получения этой информации решается задача о движении гелиевой перемычки в капилляре, заполненном паром, при подаче теплового потока на одну из межфазных поверхностей.

Рассматривается движение объема сверхтекучего гелия в круглом цилиндрическом канале (капилляре) диаметром  $d$  (рис. 1). Объем сверхтекучего гелия имеет известную длину  $l$ . В непосредственной близости (в макроскопическом смысле) от правой границы раздела фаз поддерживается постоянное давление пара  $P_b''$ .

Принимаются следующие допущения задачи:

Боковая поверхность канала адиабатически изолирована, т.е. поток теплоты через стенку канала считается нулевым. Предполагается, что на стенках канала в заполненных паром областях (I) и (III) существует пленка He-II микроскопической или макроскопической толщины, которая не испаряется под действием теплового потока. Это позволяет считать кривизну межфазных поверхностей приблизительно одинаковой, так что капиллярные силы, действующие на мениски, почти полностью взаимно компенсируются, и ими можно пренебречь, что, в свою очередь, дает возможность рассматривать границы раздела фаз как плоские поверхности, перпендикулярные оси капилляра, на которых давление претерпевает скачок. Именно поэтому межфазные поверхности, реальная форма которых неизвестна, изображены в виде прямых пунктирных линий (см. рис. 1).

В тех случаях, когда эффектами термодинамической неравновесности на границах раздела фаз можно пренебречь, величина плотности теплового потока через эти поверхности не оказывает влияния на решение. Вследствие этого становится возможной такая постановка задачи, при которой форма межфазных поверхностей не имеет значения. Подобная формулировка возможна, когда капиллярные силы пренебрежимо малы по сравнению с силами вязкого трения, несмотря на то, что границы раздела фаз имеют разную кривизну. Например при ламинарном нормальном движении такая ситуация имеет место, если выполняется условие [4]

$$|\bar{V}_n| l / d \gg \sigma / \eta_n, \quad (1)$$

где  $\bar{V}_n$  – средняя по сечению скорость нормального компонента сверхтекучего гелия;  $l$  – длина участка капилляра, заполненного жидким гелием;  $d$  – диаметр капилляра;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $\eta_n$  – коэффициент первой вязкости. При турбулентном нормальном движении силы поверхностного натяжения также могут быть пренебрежимо малы по сравнению с силами вязкого трения, если выполняется условие

$$|\bar{V}_n| \gg 10 \sqrt[7]{\frac{d}{\eta_n \rho^3 \left(\frac{\sigma}{l}\right)^4}}. \quad (2)$$

В этом случае форма межфазных поверхностей может быть любой. Поскольку в этой ситуации не

нужно знать величину плотности теплового потока через межфазные поверхности, теплота не обязательно должна подводиться к одной из межфазных поверхностей. Тепловой поток может генерироваться за счет разности температур между концами канала. Кроме того, пренебрегая неравновесными эффектами, можно не учитывать поток массы с правой межфазной границы. Квазиравновесное приближение означает, что температуры пара в полостях принимаются равными температурам межфазных поверхностей, а давления пара – давлениям соответствующим этим температурам по линии насыщения.

Принимается, что теплофизические свойства He-II не зависят от температуры. Течение жидкости – квазистационарное, инерционными силами можно пренебречь.

При распространении теплоты вдоль оси канала реализуются различные режимы течения нормального и сверхтекучего компонента в зависимости от плотности теплового потока  $q$ , диаметра капилляра и средней температуры жидкости. Для случая ламинарного нормального и безвихревого сверхтекучего движений в работе [5] получено выражение «критической» длины жидкостной перемычки, при превышении которой будет наблюдаться обращенное (к источнику теплоты) течение He-II:

$$L_0(d, T) = \frac{\left(0,6 + \frac{\Lambda}{8RT}\right) ST d^2 \rho' \sqrt{2\pi RT_i}}{\left(1 - \frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \frac{\Lambda}{ST}\right) \Lambda \frac{32\eta}}. \quad (3)$$

Видно, что эта величина пропорциональна квадрату диаметра капилляра и слабо зависит от плотности теплового потока (через изменение температур). Таким образом:

$$V' = \frac{q}{\rho' ST} \left(\frac{L_0}{l} - 1\right). \quad (4)$$

При  $l > L_0$  гелиевая перемычка должна двигаться к нагревателю, а при  $l < L_0$  – от нагревателя. Отметим, что созданная модель адекватно описывает реальный процесс только в том случае, если между нагревателем и He-II постоянно существует пленка пара, хотя бы микроскопической толщины. Следует добавить, что только при наличии паровой пробки макроскопической толщины жидкий гелий будет иметь возможность в течение некоторого периода времени двигаться к нагревателю, и процесс будет протекать так, как он описан.

Такое поведение перемычки He-II вовсе не является очевидным. Паровую полость (I) можно рассматривать как пузырь, перекрывающий все сечение капилляра. К пару, содержащемуся в пузыре, подводится теплота. Вполне естественно считать, что объем паровой полости в любом случае должен увеличиваться. Однако проведенный анализ показывает, что, по-видимому, возможна ситуация, когда полость будет уменьшаться в размерах. В этом случае реализуется неидеальный термомеханический эффект, и перемычка He-II движется к источнику теплоты, несмотря на то, что паровой объем замкнут и к нему подводится теплота.

Перемычка определенной постоянной длины в капилляре определенного диаметра может пребывать в состоянии покоя, не будучи ограничена твердыми стенками, перекрывающими сечение капилляра, даже при наличии теплового потока.

Далее поставленная задача была решена для случаев, когда режим течения нормального компонента He-II является ламинарным, а сверхтекучего – вихревым. При этом, также как и в первом случае, учитываются эффекты термодинамической неравновесности на межфазных поверхностях пар – жидкость, капиллярные силы не учитываются. Изменение направления движения He-II в сторону, противоположную направлению распространения теплового потока, происходит при выполнении двух неравенств:

$$\begin{cases} l > L_0 \\ \bar{q}d < (\bar{q}d)_{rev}^{lam} \sqrt{1 - \frac{L_0}{l}}, \end{cases} \quad (5)$$

где

$$(\bar{q}d)_{rev}^{lam} = \frac{1}{\rho'S} \sqrt{\frac{32\eta_n}{f_{GM}T} \left[ \left( \frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \frac{ST}{\Lambda} - 1 \right]}. \quad (6)$$

Из анализа второго условия со всей очевидностью следует, что при  $l \leq L_0$  перемычка He-II будет двигаться от источника теплоты при любом диаметре канала и любой величине плотности теплового потока. Таким образом, приходим к заключению о том, что движение к источнику теплоты возможно только при одновременном выполнении двух указанных условий.

Для скорости движения перемычки He-II при ламинарном режиме течения нормального компонента и вихревом режиме сверхтекучего движения получается следующее соотношение

$$\bar{v}' = \frac{\bar{q}}{\rho'ST} \left[ \left( \frac{\bar{q}d}{(\bar{q}d)_{rev}^{lam}} \right)^2 + \frac{L_0}{l} - 1 \right]. \quad (7)$$

В случае турбулентного режима течения нормального компонента и безвихревого сверхтекучего движения условие обращенного течения He-II запишется следующим образом:

$$\bar{q}d > 1190\eta_n ST \left( \frac{L_0}{l} \right)^{4/3}. \quad (8)$$

А в случае турбулентного нормального и вихревого сверхтекучего движений обращенное течение должно наблюдаться при условии:

$$\left( (\bar{q}d)_{rev}^{lam} \right)^2 \frac{L_0}{l} + (\bar{q}d)^2 < \left( (\bar{q}d)_{rev}^{turb} \right)^{5/4} (\bar{q}d)^{3/4}, \quad (9)$$

где

$$(\bar{q}d)_{rev}^{turb} = 0,235 \sqrt{\frac{\eta_n}{\rho'^8 S^{11} T^7 f_{GM}^4} \left[ \frac{ST}{\Lambda} \left( \frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) - 1 \right]^{4/5}}. \quad (10)$$

Видно, что при вихревом сверхтекучем движении и турбулентном режиме течения нормального компонента критерий противонаправленного движения потоков тепла и перемычки сверхтекучей жидкости, учитывающий кинетические эффекты, невозможно записать в виде простого неравенства.

**Экспериментальная установка.** Подготовка стенда к измерениям часто сопряжена с рядом технических трудностей: начиная от сложности применения традиционных подходов из-за специфики эксперимента и заканчивая невозможностью изготовления отдельных составляющих измерительной схемы. Использование персональных компьютеров и развитие цифровых методов измерений открывают широчайшие возможности для исследований, однако «цифровые» алгоритмы используемых приборов добавляют сложностей с юстировкой и интерпретацией результатов. При исследовании процессов тепломассопереноса в сверхтекучем гелии особенностью проведения экспериментов являются, с одной стороны, низкотемпературные измерения при температуре 1 – 2 К. С другой стороны, целью работы ставится анализ поведения He-II под воздействием тепловых потоков, что обуславливает специфику использования источников теплоты и измерения тепловой мощности.

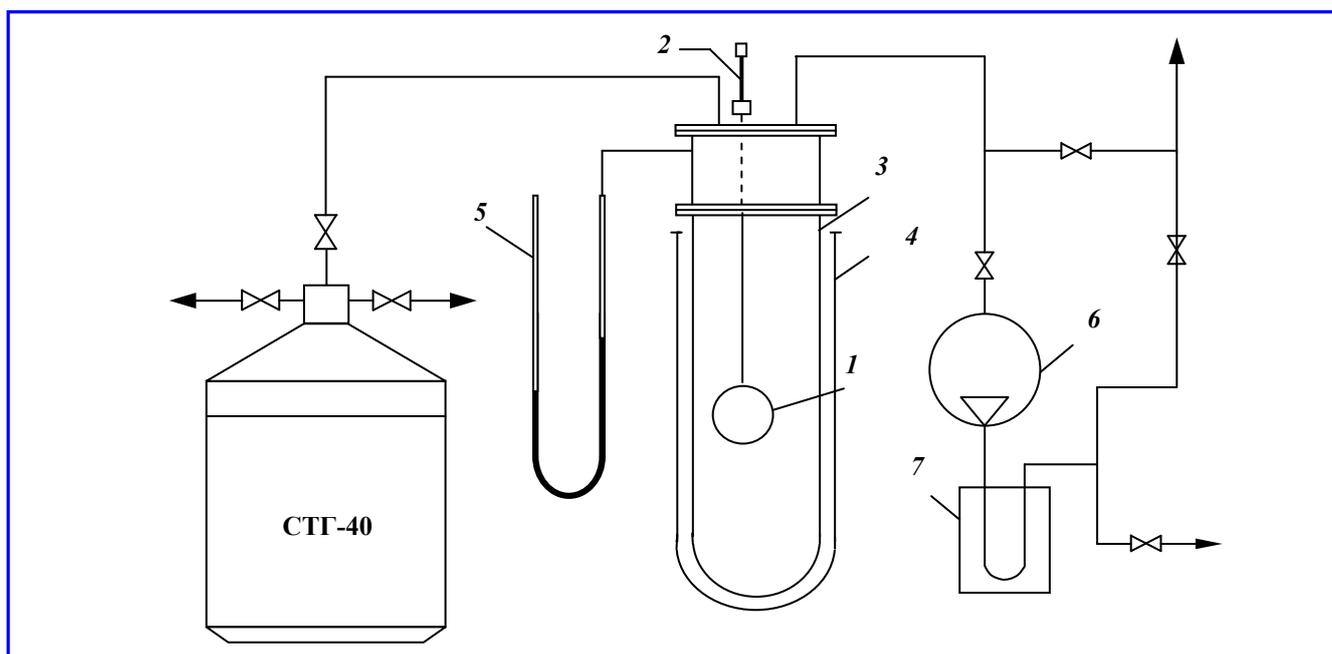


Рис. 2. Схема экспериментального стенда: 1 – экспериментальная ячейка; 2 – подвес; 3 – гелиевый сосуд Дьюара; 4 – азотный сосуд Дьюара; 5 – манометр ртутный; 6 – насос вакуумный НВЗ-20; 7 – азотная ловушка

Для исследования поведения He-II в капиллярах и пленочного кипения He-II на сферических нагревателях создан экспериментальный стенд, включающий в себя систему криостатирования, систему оптического наблюдения и видеозаписи, систему подачи тепловой нагрузки и измерения температур (рис. 2).

Криостат, позволяющий обеспечить необходимый уровень температур ниже 2,17 К, представляет собой гелиевую пару – два стеклянных сосуда Дьюара разных диаметров (внутренний гелиевый и внешний азотный). Внутренний гелиевый сосуд имеет внутренний диаметр 55 мм. Внешний сосуд заполняется жидким азотом, который выполняет функцию защитного теплового экрана.

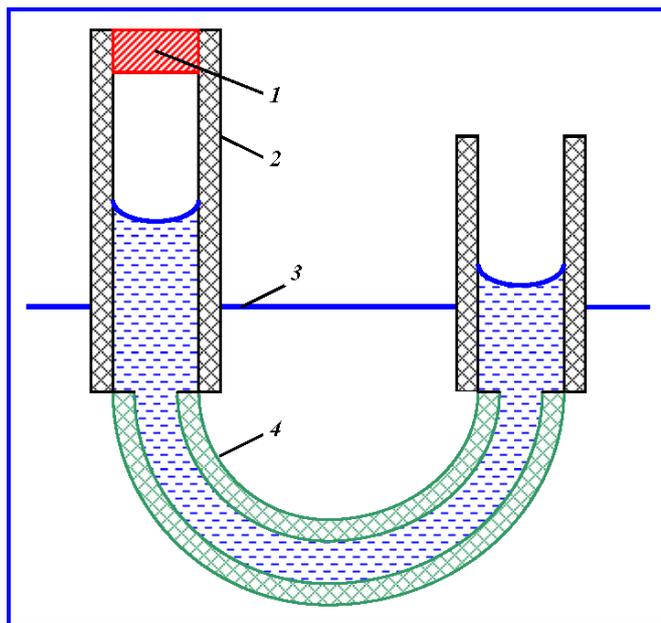
Оба сосуда Дьюара имеют смотровые щели шириной около 20 мм. Это позволяет проводить наблюдение и видеосъемку процессов в экспериментальной ячейке, которая находится во внутреннем сосуде, на просвет. Внутренний сосуд соединяется с линией откачки, ведущей к механическому вакуумному насосу НВЗ-20. Рабочий диапазон температур в гелиевом сосуде Дьюара достигается путем откачки паров. Вспомогательный нагреватель, помещенный на дно сосуда с жидким гелием, и система вентилей позволяют поддерживать температуру на требуемом уровне. Давление во внутреннем сосуде контролируется

с помощью присоединенного к нему ртутного чашечного манометра МЧР-4.

Предварительная «промывка» газообразным гелием внутреннего сосуда Дьюара для удаления паров воды и других примесей осуществляется из транспортного сосуда для жидкого гелия СТГ-40. Заправка жидким гелием реализуется с помощью переливного сифона из того же транспортного сосуда СТГ-40. После заправки внутреннего сосуда Дьюара жидким гелием он подключается к системе откачки, и путем откачки паров гелия достигается температура  $\lambda$ -перехода.

Также собрана система одновременного перемещения видеокамеры и экспериментальной ячейки. Это необходимо для того, чтобы не терять из видоискателя объект съемки при любых перемещениях экспериментальной ячейки, например, при заправке экспериментальной ячейки жидкостью и подаче тепловой нагрузки на нагреватель.

Оптическая система состоит из микроскопа МБС-10, видеокамеры SONY и источника света. Источник света располагается перед одной из смотровых щелей в стенке сосуда. Микроскоп с присоединенной к нему видеокамерой установлен у противоположной щели. При анализе результатов экспериментов характерным масштабом служат известные наружный и внутренний диаметры капилляра.



**Рис. 3. Экспериментальная ячейка: 1 – нагреватель; 2 – концевые прозрачные трубки; 3 – уровень жидкости во внутреннем криостате; 4 – капилляр**

Экспериментальная ячейка состоит из капилляра, концевых прозрачных трубок и нагревателя (рис. 3). Капилляр изготовлен из полимерного материала РЕЕК (полиэтерэтеркетон) и имеет внутренний диаметр 54 мкм, а внешний – 1,6 мм. Так как теоретические расчеты предсказывают различное поведение гелия в зависимости от величины теплового потока и длины перемычки, в экспериментах используются два капилляра – длиной 10 см и 2 м. Наиболее интересными представляются наблюдения при температуре гелия около 1,5 К.

Для удержания гелиевой перемычки и обеспечения теплоотвода к одной из межфазных поверхностей жидкость – пар капилляр длиной 10 см изогнут в виде полукольца радиусом 25 мм, а капилляр длиной 2 м скручен в спираль радиусом также 25 мм. Диаметр внутреннего канала много меньше внешнего размера трубки. Необходимо разместить капилляр внутри криостата. Для этого капилляр изгибают с максимально возможным радиусом из-за незначительной гибкости материала. Это позволяет избежать пережатия канала и изменения внутреннего размера при изгибе.

Для наблюдения характера движения перемычки к концам капилляра прикреплены прозрачные трубки с внутренним диаметром 1 мм, выполненные из прозрачного материала (фторопласта марки FEP – полимер на основе тетрафторэтилена). Внешний диаметр этих трубок такой же, как и

внешний диаметр капилляра – 1 мм. Для их соединения используются резиновые хомуты. В такой трубке невооруженным глазом виден мениск. При заполнении капилляра ячейка опускается ниже уровня жидкости. После того, как сверхтекучий гелий заполнит капилляр, вставка поднимается выше уровня гелия для проведения собственно эксперимента при подаче тепловой нагрузки. Гелий полностью заполняет капилляр и частично прозрачные концевые трубки. Следует отметить, что длина перемычки в капилляре, которая влияет на характер движения объема сверхтекучего гелия в капилляре в теоретических расчетах, равна длине капилляра. Вопрос расположения нагревателя также разрешает концевая прозрачная трубка. Он просто вставляется в неё и представляет собой константановую проволоку диаметром 50 мкм и длиной 40 мм, намотанную на медную, покрытую лаком иглу диаметром 0,5 мм.

Измерения электрических величин (термоЭДС термопар, ток и напряжение нагревателя, давление во внутреннем сосуде) осуществляется в автоматическом режиме с помощью аналогово-цифрового преобразователя ZET 210, подключенного к персональному компьютеру через USB-интерфейс. Однако уже при первых тестовых измерениях обнаружилась большая погрешность таких измерений, которая имеет нелинейный характер: её не удается компенсировать ни постоянной составляющей, ни коэффициентом умножения. Приемлемой точности по всем каналам удастся достичь путем изменения коэффициента нелинейности в настройках АЦП и вариативностью постоянной составляющей отклонения.

Температура нагревателя и температура стенки капилляра измеряется двумя термопарами медь – медь + железо + литий, наилучшим образом подходящими для измерения температур на уровне 2 К [6]. В качестве естественных источников постоянной температуры, по которым производилась индивидуальная градуировка всего измерительного тракта каждой термопары, были выбраны: температура перехода в сверхтекучее состояние – 2,17 К; температура нормального кипения азота – 77,36 К; температура окружающей среды.

Для анализа движения сверхтекучего гелия в капилляре используется цифровая видеокамера, подключенная к компьютеру. Изображение записывается в виде последовательности файлов, каждый из которых является кадром видеосъемки. В рассматриваемом случае это очень удобно для кадровой оценки направления и скорости движения перемычки He-II в капилляре.

**Результаты экспериментов.** Ранее авторами экспериментально изучалось поведение сверхтекучего гелия в капиллярах диаметром 250 мкм разной длины: 8 м и 8 см при подводе к He-II теплоты [7, 8]. Схема эксперимента аналогична представленной на рис. 3. Результаты исследований показывают, что при определенных условиях возможно схлопывание подогреваемой паровой пробки в канале, заполненном He-II, таким образом предсказанный расчетным путем эффект (3) получил подтверждение. В частности, в капилляре диаметром 250 мкм и длиной 8 м происходит движение перемычки сверхтекучего гелия к нагревателю, в то время как в коротком капилляре (8 см) в зависимости от условий эксперимента перемычка двигалась от нагревателя или совершала негармонические колебания. Аналогичные эксперименты с обыкновенным жидким гелием, а также с жидким азотом показали, что при любых условиях проведения экспериментов перемычка всегда движется от нагревателя.

В ходе экспериментов на длинном капилляре (длиной 8 м) в результате непосредственных наблюдений и в ходе анализа видеозаписей было обнаружено, что при подаче тепловой нагрузки на нагреватель, мениск перемещается в сторону источника теплоты, достигая верхнего положения через несколько секунд. При этом после снятия нагрузки (выключения нагревателя) жидкость опускается вниз, что видно также отражается на поведении мениска. Во время эксперимента температура жидкого гелия не изменялась и была равна 1,6 К. Такое поведение He-II может быть объяснено только квантовой природой этой жидкости.

После получения экспериментальных данных на длинном капилляре были проведены опыты с короткой перемычкой He-II. Цель этих экспериментов – получение информации о движении в капилляре того же диаметра перемычки He-II существенно меньшей длины. Во время эксперимента температура жидкого гелия не изменялась и была равна 1,4 К. После подачи тепловой нагрузки мениск в концевой трубке, соединенной с нагревателем, очень быстро уходит вниз. В открытом колене концевой трубки появляется капля жидкого гелия. Потом эта капля исчезает, а в открытой концевой трубке мениск перемещается вниз. Все это происходит за интервал времени 1,5 с после подачи тепловой нагрузки. После этого мениски в поле зрения микроскопа не наблюдались. Следовательно, в отличие от длинной перемычки He-II при подаче тепловой нагрузки межфазная поверхность жидкость – пар перемещается от нагревателя. Об этом свидетельствуют: 1) хорошо наблюдаемое быстрое перемещение границы раздела фаз в закрытой концевой трубке по

направлению от нагревателя; 2) визуально фиксируемое выливание He-II из открытой концевой трубки, обусловленное движением перемычки этой жидкости от нагревателя; 3) отсутствие в закрытой концевой трубке межфазной поверхности при дальнейшем наблюдении, сопровождаемое перемещением мениска вниз в открытой концевой трубке. Последнее может быть объяснено наличием испарения на межфазной поверхности в открытой концевой трубке, обусловленного подводом тепла от нагревателя через перемычку He-II. В экспериментах с коротким капилляром в некоторых случаях наблюдался колебательный режим движения жидких перемычек. Условия появления колебаний к настоящему времени не установлены.

**Направления дальнейших исследований.** Рассмотренные выше эксперименты проводились для условий ламинарного и турбулентного режимов течения нормального компонента и только безвихревого сверхтекучего движения. В дальнейшем ставится цель исследовать движение He-II в капилляре при вихревом режиме сверхтекучего движения. Для этого необходимо усовершенствование экспериментального оборудования и методики определения тепловых потоков в системе. Кроме этого, сочетание вихревого сверхтекучего движения и турбулентного нормального течения реализуется только при температуре жидкости ниже 1,5 К. Этой температуре по линии насыщения соответствует давление 480 Па, следовательно, во внутреннем криостате давление должно поддерживаться на этом уровне или ниже. Таким образом, необходимо расширить диапазон проведенных исследований по температуре, при этом прецизионно провести измерения температуры элементов экспериментальной ячейки в автоматическом режиме сбора данных.

На следующем этапе исследований планируется сконструировать и собрать экспериментальную ячейку для изучения процессов теплопереноса при кипении сверхтекучего гелия в невесомости и провести пробные эксперименты в земных условиях. Предполагается поместить цилиндрический нагреватель в свободном пространстве внутри пористого тела, выполненного из тканых металлических сеток в виде цилиндрической оболочки. Данную ячейку, помещенную во внутренний сосуд Дьюара, необходимо разместить горизонтально для обеспечения возможности наблюдения через смотровые щели в сосудах.

Для реализации эксперимента предлагается использовать цилиндрические нагреватели диаметром от 1 – 12 мм и длиной 20 – 25 мм и трубки из пористого материала с внешним диаметром 50 мм

и толщиной стенки 10 – 15 мм. Процессы внутри криостата визуализируются видеокамерой, контроль температуры предлагается осуществлять 3 – 5 датчиками, расположенными на нагревателе и пористой оболочке.

Во время проведения одного сеанса измерений процессы в экспериментальной ячейке будут протекать в следующей последовательности. При подаче тепловой нагрузки определенной величины на поверхности нагревателя образуется паровая пленка конечной толщины. В дальнейшем паровой объем увеличивается, заполняя внутреннюю полость пористой оболочки. Результатом одного сеанса подачи тепловой нагрузки будет видеоряд с записью процесса роста паровой пленки, по которому воспроизводится зависимость радиуса от времени. Кроме видеоряда должны также записываться давление во внешней области, тепловая нагрузка и температура нагревателя. Таким образом, испытания экспериментальной ячейки на действующей лабораторной установке позволят, с одной стороны, расширить фундаментальную базу знаний о процессах теплопереноса через межфазную поверхность и поведении сверхтекучего гелия в стесненных условиях, с другой стороны, подтвердить работоспособность подобного рода систем для использования в системах криостатирования, в том числе с целью дальнейшего развития низкотемпературной базы на Международной космической станции.

*Авторы выражают признательность профессору Крюкову А.П. за внимание и поддержку, оказанную им в настоящей работе.*

#### Список условных обозначений

$d$  – диаметр капилляра, м;  
 $f_{GM}$  – функция Гортера – Меллинка,  $K \cdot m^5 / \text{Вт}^3$ ;  
 $h$  – высота столба жидкости, м;  
 $L_0$  – критическая длина перемычки, при которой происходит обращение движения, м;  
 $l$  – длина жидкой перемычки (объема жидкости), м;  
 $P$  – давление, Па;  
 $q$  – плотность теплового потока,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  
 $R$  – индивидуальная газовая постоянная,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  
 $S$  – энтропия,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  
 $T$  – температура, К;  
 $V$  – скорость движения жидкости, м/с;  
 $\eta$  – динамическая вязкость жидкости, Па·с;

$\Lambda$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг;  
 $\rho$  – плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  
 $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости, Н/м;  
 Индексы:  
 $'$  – относится к параметрам жидкости;  
 $''$  – относится к параметрам пара;  
 $0$  – начальные параметры;  
 $i$  – interface относится к правой межфазной поверхности;  
 $i_0$  – относится к левой межфазной поверхности;  
 $lam$  – для ламинарного режима течения;  
 $n$  – normal относится к нормальной компоненте He-II;  
 $s$  – superfluid относится к сверхтекучей компоненте;  
 saturated параметры по линии насыщения;  
 $rev$  – reverse значения величин при которых происходит обращение течения He-II.  
 $turb$  – для турбулентного режима течения.

#### Литература

1. Крюков А.П., Пузина Ю.Ю. Обоснование экспериментальных исследований процессов теплопереноса при кипении сверхтекучего гелия в условиях микрогравитации на международной космической станции // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – Т. 112. – № 5. – С. 45 – 53.
2. Петухов Г.С. Теплообмен в ЯЭУ / Г.С. Петухов, Л.Г. Генин, С.А. Ковалев [и др.]. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 548 с.
3. Кириллов П.Л. Теплообмен в ядерных энергетических установках / П.Л. Кириллов, Г.П. Богословская. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 456 с.
4. Авербах В.С. Движение капли жидкости в капилляре под действием статического и акустического поля / В.С. Авербах, С.Н. Власов, Ю.М. Заславский; Институт прикладной физики РАН – 1998. – Препринт.
5. Королев П.В. Движение сверхтекучего гелия в капилляре с паром при наличии продольного теплового потока / П.В. Королев, А.П. Крюков // Вестник МЭИ. – М., 2002. – № 1. – С. 43 – 46.
6. Вепшек Я. Измерение низких температур электрическими методами / Я. Вепшек – М.: Энергия, 1980. – 224 с.
7. Экспериментальное изучение движения He-II в капиллярах / П.В. Королев, П.В. Медников, А.П. Крюков // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках: Труды XV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – Т. 1. – С. 216 – 219.
8. Экспериментальное исследование движения гелия II в капилляре при наличии паровой полости вблизи нагревателя / П.В. Королев, А.П. Крюков, А.Ф. Медников // Вестник МЭИ. – М., 2006. – № 4. – С. 27 – 33.

Поступила в редакцию 14.12.2010

*Иван Николаевич Голованов, аспирант, e-mail: igolovanov@inbox.ru.  
 Павел Викторович Королев, канд. техн. наук, доцент, e-mail: Korolyov2007@yandex.ru.  
 Юлия Юрьевна Пузина, канд. техн. наук, научн. сотрудник, e-mail: Puzina2006@rambler.ru.  
 Т. (495) 362-78-41.*