

КОНСТРУКЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КИПЕНИЯ ГЕЛИЯ-II В УСЛОВИЯХ НЕВЕСОМОСТИ

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

Анализируются проблемы, связанные с проектированием экспериментальной ячейки для исследования плёночного кипения гелия-II в условиях микрогравитации. Рассматривается вариант с использованием пористой оболочки из тканых металлических сеток для удержания объёма сверхтекучей жидкости вблизи нагревателя при микрогравитации, реализующейся, например, в условиях космического полёта. Описывается модель опытного образца экспериментальной ячейки для наземных испытаний.

Ключевые слова: гелий-II, тепломассоперенос, двухфазная система, движение межфазной поверхности, пористая структура.

Введение

В современной теплофизике одной из актуальных фундаментальных проблем является взаимодействие нагревателя с холодной жидкостью. При этом особое внимание уделяется высокоинтенсивным микропроцессам на межфазной поверхности, которые определяют поведение системы в целом. При попадании сильно нагретого тела в холодную жидкость на поверхности образуется паровая плёнка в случае, когда температура объекта превышает температуру предельного перегрева жидкости. В дальнейшем паровая плёнка увеличивается в размерах, при этом температура нагревателя уменьшается. В результате паровая плёнка теряет устойчивость, и происходит касание горячего нагревателя и холодной жидкости. Последующий импульс давления, возникающий при сходе паровой плёнки, может разрушить не только горячий объект, если он представляет собой жидкую каплю, но также и повредить сам рабочий объём. Подобного рода процессы наблюдаются экспериментально. Так в работе [1] рассматривается смена режимов кипения на полусферическом нагревателе, погружённом в недогретую воду. Импульс давления, возникающий после схода паровой плёнки, достигает величины 1 МПа. Интерпретация этих экспериментов представлена в [2, 3]. Другим примером взаимодействия горячего объекта и холодной жидкости являются эксперименты [4], в которых плёночное кипение недогретой воды исследовалось на поверхности шара.

Рассмотренные задачи [1 – 4] отличаются от традиционной постановки с одной стороны тем, что теплота к межфазной поверхности подводится со стороны пара, с другой стороны – недогретой до состояния насыщения жидкостью. В традиционном варианте при подаче тепловой нагрузки на нагреватель жидкость прогревается до состояния насы-

щения, после чего на поверхности нагревателя образуется паровый пузырь, который увеличивается в размерах, отрывается от поверхности нагрева и поднимается вверх. На всех стадиях этого процесса теплота к межфазной поверхности подводится со стороны жидкости вследствие низкой температуропроводности пара. При плёночном кипении, когда существование паровой плёнки обеспечивается разностью температур между нагревателем и жидкостью, теплота к межфазной поверхности от нагревателя передаётся со стороны пара. В то же время, если жидкость является насыщенной, то вся теплота от нагревателя затрачивается на испарение. Если жидкость недогрета до состояния насыщения, то теплота от нагревателя затрачивается в основном на нагрев жидкости. При этом эффективность теплопереноса в жидкости может быть настолько высокой, что испарение с границы раздела фаз отсутствует. Данные о высокой эффективности теплопереноса при плёночном кипении недогретой воды подтверждаются экспериментами [1, 4].

Одной из высокоэффективных теплопередающих сред считается гелий-II. Его особенностью является отсутствие режима пузырькового кипения. Плёночное кипение гелия-II на поверхности тонкого нагревателя исследовалось экспериментально [5]. Показано, что помимо режима гладкой устойчивой коаксиальной нагревателю паровой плёнки, существует режим так называемого шумового режима кипения при больших глубинах погружения и, соответственно, высоких плотностях тепловой нагрузки. В этом случае паровая плёнка теряет очертания и становится существенно не симметричной (всплывшей). Несмотря на особенности теплопереноса в гелии-II вид кривой кипения носит вполне традиционный характер, где пиковая нагрузка характеризует момент появления

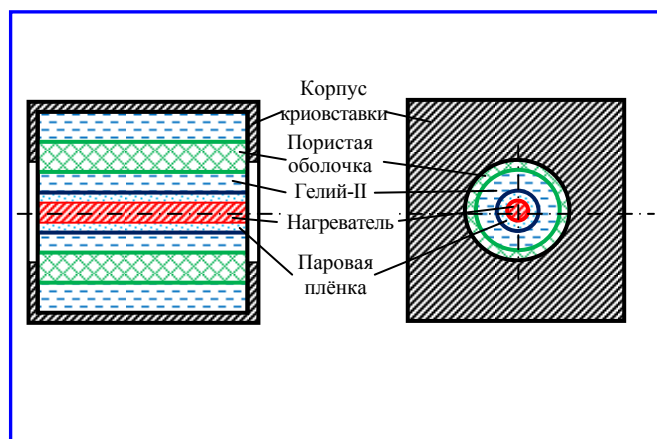


Рис. 1. Схематическое изображение криовставки

паровой плёнки, а восстановительная – момент схлопывания паровой плёнки. Для определения последней величины была разработана методика расчёта [6], основанная на уравнении Гортера-Меллинка для описания теплопереноса по жидкости, а также неравновесном граничном условии, записанном в форме Д.А. Лабунцова. Позднее эта методика расчёта была развита на нестационарную стадию процесса с описанием эволюции паровой плёнки [7]. Было показано, что динамика межфазной поверхности носит слабозатухающий колебательный характер. Расчётное значение размера стационарной паровой плёнки совпадало с экспериментами.

В это же время возникает идея проведения экспериментов по исследованию кипения гелия-II в условиях невесомости. Это позволило бы исследовать динамику межфазной поверхности и специфику процессов переноса на ней без искажающего поля силы тяжести при малых кипяtilьных нагрузках, также лимитированных гравитацией в лабораторных условиях.

Модель экспериментальной ячейки

В невесомости отсутствуют силы, препятствующие росту паровой плёнки. В связи с этим для организации процесса кипения при нулевой гравитации требуется обеспечить удержание гелия-II в экспериментальном объёме. Эту проблему предлагается решить при помощи толстостенной, пористой оболочки с известными структурными характеристиками. Внутреннее пространство оболочки и поры заполняются гелием-II. Цилиндрический нагреватель помещается внутрь коаксиальной пористой оболочки. Ячейка расположена в рабочем объёме криостата, который сообщается с космическим вакуумом через дроссельный вентиль, что позволяет регулировать давление паров, образующихся при испаре-

нии жидкого гелия. После подачи пиковой тепловой нагрузки на поверхности нагревателя образуется паровая плёнка, которая будет расти, вытесняя жидкий гелий, содержащийся в полости, через поры оболочки. Схема подобной криовставки представлена на рис. 1. Обоснование принципов работы экспериментальной ячейки, а также процессов переноса в рабочем объёме представлено в [8, 9]. В дальнейшем был рассмотрен вариант расположения шарового нагревателя внутри пористой структуры [10]. Однако для постановки экспериментов на борту космического аппарата (будь то транспортный корабль «Прогресс» или Международная космическая станция) необходимо предварительно убедиться в работоспособности и эксплуатационных качествах самой экспериментальной ячейки, всех систем автоматизации, термометрии, управления и контроля в лабораторных условиях.

Описание модернизированной установки приведено в [11]. На ней были проведены эксперименты по исследованию движения гелия-II в канале с паром при наличии продольного теплового потока [12]. В этих экспериментах был подтверждён результат, полученный ранее теоретически [13], что при определённой длине капилляра квантовая жидкость движется к источнику теплоты в отличие от обычных жидкостей [14]. Также на этой экспериментальной установке были проведены исследования плёночного кипения гелия-II на поверхности шара [15], где была показана гладкая устойчивая паровая плёнка, внешне сравнимая с экспериментами [4].

Методика расчёта процессов теплопереноса в экспериментальной ячейке и некоторые её особенности представлены в [16]. Ниже рассматривается конструкция криовставки, а также приводится описание отдельных узлов экспериментальной установки.

Конструкция нагревателя

Нагревательный элемент может быть выполнен по различным схемам.

Для нагревателей большого размера предпочтительно выполнение углеродного напыления на керамический стержень. При этом нагреватель может выполнять функции термометра сопротивления. В этом случае можно отказаться от термопар: температура нагревателя и жидкости может измеряться только термометрами сопротивления. Конструкция такого нагревателя представлена в [17], а расчётные параметры для требуемой по условиям эксперимента нагрузки 10^4 Вт/м^2 в табл. 1 (без учёта сопротивления подводящих проводов).

Таким образом, максимальное тепловыделение для нагревателя с керамическим покрытием составляет около 21 Вт.

Для измерения температуры нагревателей малых размеров следует применять термопары, тогда конструкция нагревателя изменится (рис. 2). Изолированная проволока из металла с высоким удельным сопротивлением (например нихрома или константана) располагается внутри цилиндрической трубки. Греющим элементом в таком нагревателе является проволока диаметром от десятков микрометров до 1 – 2 мм (в зависимости от диаметра трубки) и длиной несколько сантиметров.

Стенка трубки нагревателя также может служить греющим элементом или (при малом значении сопротивления) токоподводом. Электрический ток течёт в этом случае по трубке и внутренней проволоке в противоположных направлениях (трубка и проволока связаны через токопроводящую заглушку на одном из концов). Токовые и потенциальные провода подводятся к нагревателю только с одного конца. Нагреватель соединён с корпусом ячейки через Г-образный металлический держатель, изолированный от корпуса. Выводы с термопар выходят через отверстие в корпусе, а не через пористую оболочку. Для изготовления питающих проводов может быть использована лужёная оловянно-свинцовым припоем ПОС-61 проволока из меди М1 диаметром 0,2 мм.

Греющий элемент в зависимости от диаметра трубки может представлять собой протянутую по оси трубки и изолированную от стенок проволоку, имеющую длину равную длине трубки, или проволоку существенно большей длины, диаметром десятки или сотни микрометров, намотанную на металлическую иглу, покрытую лаком и вставленную в трубку. Схематично конструкция нагревателя с греющим элементом представлена на рис. 2.

Материал нагревателя должен обладать большим электрическим сопротивлением и постоянным температурным коэффициентом сопротивления в широком диапазоне температур. В соответствие с этими требованиями были выбраны четыре сплава: дюралюминий Д16, инвар И36, латунь Л36, нержавеющая сталь 12Х18Н9Т (свойства взяты из справочника [8]). Были выполнены расчёты параметров нагревателя для двух комбинаций из четырёх выбранных материалов. В табл. 2 представлены результаты расчёта электрических параметров и тепловых характеристик для нагревателя, имеющего длину 40 мм, наружный диаметр 8 и 12 мм (12 мм – максимальный диаметр в планирующихся экспериментах), толщину стенки 2 мм и диаметр проволоки d . Приводятся результаты, полученные для нагревателя

Таблица 1

Электрические параметры нагревателя

Диаметр, мм	Толщина напыления, мкм	Напряжение, В	Мощность тепловыделений, Вт	
			Ток, А	
12	10	5,5	3,8	20,8
12	1	17,4	1,2	20,74
6	1	17,4	0,6	10,37

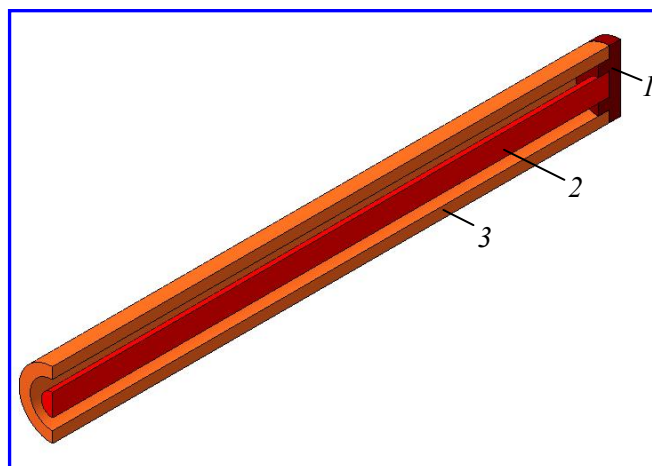


Рис. 2. Сечение нагревателя: 1 – втулка; 2 – проволока; 3 – трубка

максимального диаметра, поскольку в этом случае для получения обеспечивающей начало кипения плотности теплового потока с греющей поверхности требуется максимальная мощность. Толщина стенки была выбрана, исходя из того, что посадочные места под термопары должны составлять не менее 1 мм, как указано в [19]. Температура нагревателя принималась равной 85 – 105 К (по данным [12]).

Средства телеметрии

Процессы внутри криовставки планируется визуализировать при помощи цифровой видеокамеры. Результатом одного сеанса подачи тепловой нагрузки будет видеоряд с записью процесса роста паровой плёнки, по которому воспроизводится зависимость радиуса от времени. Кроме видеоряда должны также записываться давление во внешней области, тепловая нагрузка и температура нагревателя.

Контроль температуры предлагается осуществлять 5 – 6 датчиками, расположенными на нагревателе и в пористой оболочке. Давление и температуру в криостате необходимо поддерживать на уровне не превышающем 5040 Па и 2,17 К, соответственно, для обеспечения условий существования сверхтекучего состояния гелия. Примерное время эксперимента 100 – 3600 с в зависимости от мощности тепловой нагрузки, при этом потребляемая мощность не будет превышать 8 – 21 Вт.

Таблица 2

Параметры электрического нагревателя

Температура нагревателя, К	Потребляемая мощность, Вт	Напряжение, В	Ток, А	Плотность теплового потока с поверхности, Вт/м ²	Сопротивление нагревателя, Ом
Нержавеющая сталь 12Х18Н9Т $D = 12$ мм + Инвар Н36 $d = 2$ мм					
105	15	0,341	44,0	9947	0,00775
100	16	0,351	45,7	10610	0,00765
95	17	0,358	47,4	11270	0,00756
90	18	0,367	49,0	11940	0,00750
85	19	0,375	50,7	12600	0,00740
Нержавеющая сталь 12Х18Н9Т $D = 8$ мм + Инвар Н36 $d = 2$ мм					
105	9	0,268	33,6	8952	0,00798
100	10	0,281	35,6	9947	0,00789
95	11	0,292	37,5	10940	0,00779
90	12	0,304	39,4	11940	0,00773
85	13	0,315	41,3	12930	0,00763
Латунь Л62 $D = 12$ мм + Дюралюминий Д16 $d = 0,2$ мм					
105	15	0,574	26,1	9947	0,022
100	16	0,580	27,6	10610	0,021
95	17	0,583	29,1	11270	0,020
90	18	0,585	30,8	11940	0,019
85	19	0,585	32,5	12600	0,018
Латунь Л62 $D = 8$ мм + Дюралюминий Д16 $d = 0,2$ мм					
105	10	0,480	20,8	9947	0,023
100	11	0,503	21,9	10940	0,023
95	12	0,514	23,3	11940	0,022
90	13	0,522	24,9	12930	0,021
85	14	0,529	26,5	13930	0,020

Давление паров жидкого гелия может контролироваться по температуре насыщения, измеряемой термометром сопротивления в жидкости. Наилучшим термометром сопротивления считается кристалл легированного германия. Рабочий ток термометра составит около 10^{-5} А. Такой термометр сопротивления, будучи продублирован вторым идентичным, позволяет отказаться от дополнительных датчиков давления. Германиевый термометр сопротивления можно применить и для измерения температуры нагревателя, выполненного в виде трубки, расположив его во внутреннем пространстве.

Температуру цилиндрического нагревателя необходимо измерять двумя датчиками (в целях повышения надёжности экспериментальной ячейки, поскольку один может отказать). Такими датчиками могут быть не только термометры сопротивления, но

и термоэлектрические преобразователи (термопары), например, типа золото + железо – хромель. Чувствительность таких термопар в рабочем диапазоне температур составит ± 11 мкВ/К. Кроме того, возможно применение термопар других типов:

- золото + железо – медь;
- медь + железо + литий – медь;
- медь – константан.

Помимо измерений температуры нагревателя необходимо определять температуру пористой оболочки. Для этого также требуется минимум два датчика температуры, и в данном случае это могут быть только термопары.

Для наземных экспериментов давление в сосуде Дьюара измеряется при помощи ёмкостного манометрического датчика «Баротрон» (модель 235), который позволяет измерять давление от 0,2 до 1000 Торр с точностью от 0,5 до 0,3%.

Для освещения внутренней полости опытного образца криовставки (через смотровые окна) предполагается использовать источник холодного света (KL200 или KL1500LCD, излучающие свет видимого диапазона фактически свободный от тепловых составляющих) и гибкий световод PSM-1000 длиной 2 м, позволяющий расположить источник света на значительном расстоянии от криостата.

Блок контроля, управления и преобразования информации для опытного образца экспериментальной ячейки

Задачей блока контроля, управления и преобразования информации ставится оперативный сбор и обработка измеряемых параметров за минимально возможное время и наглядное представление информации, в том числе, на экране компьютера. Автоматизированная система измерения и сбора данных должна обеспечивать необходимую точность измерений и минимальное участие экспериментатора во время проведения наблюдений. В том числе необходимо предусмотреть возможность автоматической настройки системы к изменению условий окружающей среды. Комплекс автоматизированного сбора информации состоит из следующих основных элементов:

- датчиков измеряемых параметров (температуры и давления) в ячейке;
- аналого-цифрового преобразователя;
- дифференциального усилителя;
- видеокамеры;
- персональной ЭВМ.

Способы определения всех параметров системы выбраны таким образом, что в процессе измерений требуются значения только разности потенциалов. Для этой цели планируется использовать 12-разрядный АЦП с диапазоном измерений ± 5 и ± 1 В. Погрешность измерений 0,05% от максимального значения. Так как диапазон измеряемых значений термопар лежит в пределах ± 10 мкВ, то совместно с АЦП используется дифференциальный усилитель с коэффициентом усиления равным 1, 10 и 100.

Схема измерительного комплекса представлена на рис. 3.

Опытный образец экспериментальной ячейки

В настоящее время разрабатывается опытный образец экспериментальной ячейки (криовставки) для проведения пробных экспериментов в наземных условиях (рис. 4).

Корпус ячейки представляет собой цилиндрическую оболочку длиной 50 мм и внутренним диаметром 38 мм, изготовленную из меди. Габаритные размеры

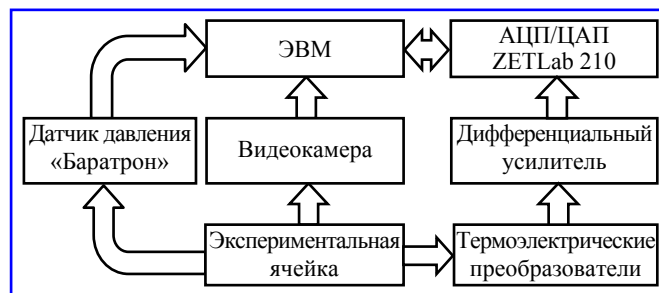


Рис. 3. Схема измерительного комплекса для наземных экспериментов с опытным образцом криовставки



Рис. 4. Опытный образец экспериментальной ячейки

образца определяются размерами внутреннего гелиевого сосуда Дьюара существующей установки (65 мм). В боковой поверхности оболочки просверлены многочисленные отверстия диаметром 3,5 мм. Торцевые крышки, имеющие смотровые окна, выполнены из тонкого оргстекла (толщиной 1 мм), привинчиваются к корпусу. Расположенный по оси оболочки цилиндрический нагреватель крепится на Г-образном металлическом держателе (изогнутом стержне), который вставляется через отверстие в торцевой крышке. Держатель изолирован от корпуса эпоксидной смолой. Внутренняя резьба для крепления крышек нарезана непосредственно в теле корпуса ячейки.

Для реализации эксперимента в качестве греющей поверхности предполагается использовать цилиндрическую медную трубку диаметром от 1 до 12 мм и длиной 45 – 48 мм. Теплота к поверхности трубки поступает от провода, протянутого по оси трубки или намотанного на иглу, расположенную по оси трубки (рис. 5).

Планируется изготовить набор цилиндрических нагревателей разных диаметров для выполнения экспериментов при различных режимных параметрах,

поэтому ячейка имеет разборную конструкцию. Один из вариантов нагревателя представляет собой медную трубку длиной 45 мм и внешним диаметром 3 мм, внутри которой находится нихромовый провод, изолированный посредством эпоксидной смолы от самой медной трубки. Температура нагревателя измеряется по его сопротивлению и при помощи термоэлектрического датчика (термопары типа медь – медь + железо + литий). Такой же термопарой измеряется температура медной оболочки.

Пористая структура, помещённая внутрь корпуса и припаянная к нему, представляет собой толстостенную оболочку (толщиной около 7 мм), которая получена путём наматывания десяти слоёв тканой металлической сетки (диаметр основы – 0,12 мм, диаметр утка – 0,1 мм и диаметр плетения – 0,44 мм). Предполагается использовать пористые структуры различной толщины с целью изменения условий проведения экспериментов. Варьируя толщину пористой оболочки из тканой сетки можно добиться стационарного состояния паровой пленки при различных величинах тепловой нагрузки с нагревателя [9].

Экспериментальная ячейка крепится к штоку (медной трубке), который свободно перемещается в герметизированном патрубке. Патрубок приварен к отверстию в металлической капке, которая присоединена к внутреннему сосуду Дьюара стеклянной гелиевой пары. Токовые и потенциальные провода нагревателя и выводы термопар пропускаются внутри полого штока, который сам служит одним из тоководов. Оба сосуда Дьюара данной установки имеют смотровые щели шириной 20 мм и установлены так, что эти щели совпадают. Это позволяет проводить визуальное наблюдение и видеосъёмку внутреннего пространства экспериментальной ячейки, находящуюся во внутреннем сосуде на просвет. Помещённая во внутренний сосуд Дьюара ячейка размещается так, чтобы обеспечивалась возможность наблюдения через смотровые щели в сосудах.

Для того, чтобы рабочая среда, которой является гелий-II, выходила из ячейки только через пористое тело и специальные отверстия в корпусе, а не просачивалась через разборное соединение, планируется применить индиевое уплотнение. Для

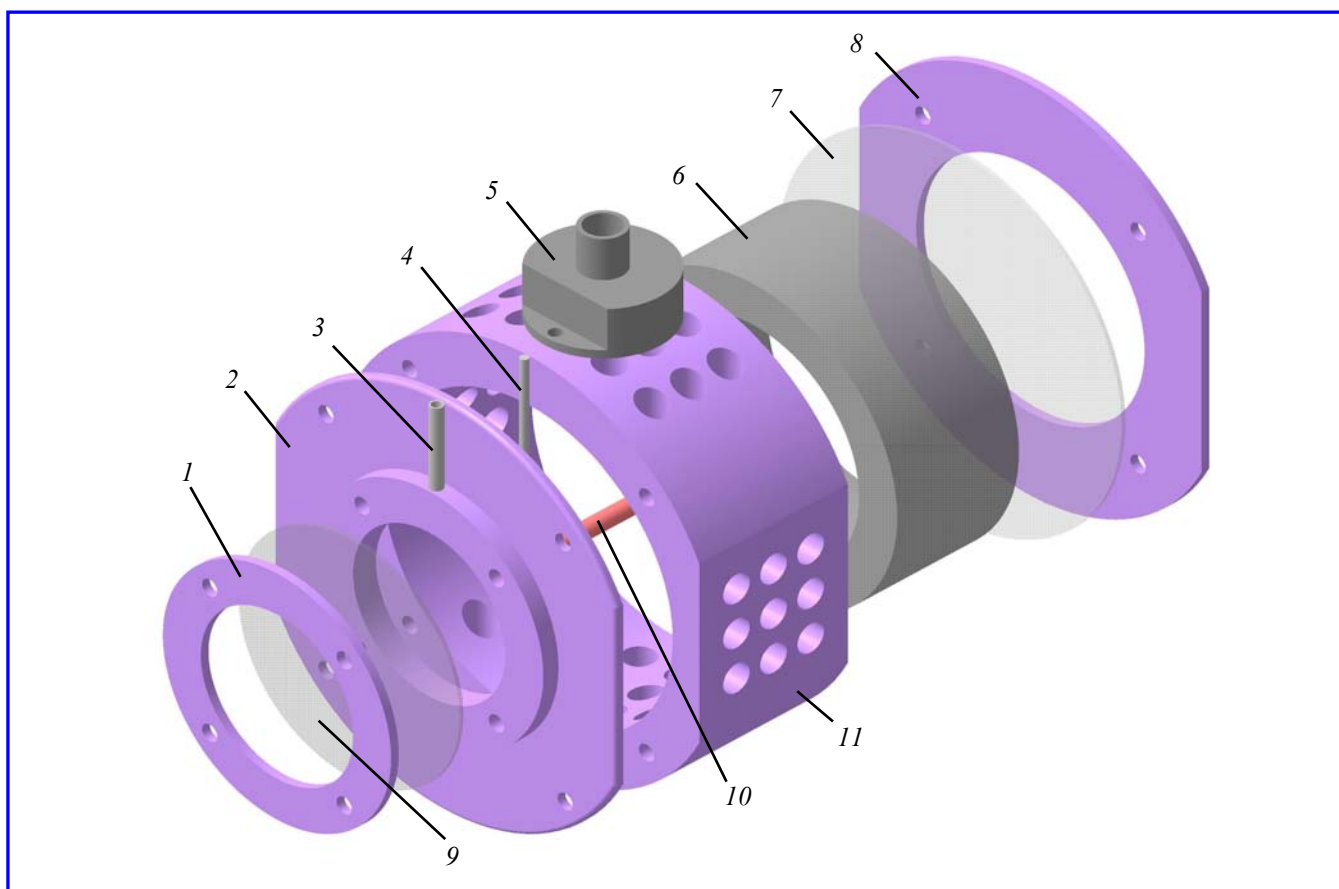


Рис. 5. Сборка: 1, 2, 8 – крышка; 3 – патрубок; 4 – держатель; 5 – шток; 6 – пористое тело; 7, 9 – стекло смотрового окна; 10 – нагреватель; 11 – корпус

герметизации ячейки используются круглые прокладки из индиевой проволоки, которые закладываются в круглый канал корпуса. Как правило, индий применяется для прокладок в виде проволоки диаметром 0,7 – 1,5 мм. Её сплющивают между фланцами до толщины равной 15 – 25 % исходного диаметра. Прокладка представляет собой отрезок индиевой проволоки с перекрытием концов. При затяжке уплотнения происходит холодная сварка индия. Чтобы изготовить кольцо (если это необходимо), концы проволоки срезают под прямым углом и соединяют путем пайки с флюсом в слабом пламени горелки.

Индиевая проволока диаметром 1,5 мм с помощью специальной фильеры сплющена в ленту толщиной 0,5 мм. Основным недостатком прокладки, вырезанной из тонкой (менее 0,5 мм) индиевой ленты, является разрушение при разборке уплотнения, при этом они обеспечивают весьма эффективную герметизацию. Поскольку качество уплотнения зависит от способности индия слегка «растекаться» при затяжке, ширина прокладки не должна превышать 1,5 мм. Иногда индий наносится на фланцы в виде покрытия или полуды на медные кольца. Используя алюминиевую проволоку, покрытую индием, можно получить прочные соединения. Преимущества индия в случае уплотнений, работающих при низкой температуре, очевидны. Этот металл имеет высокую пластичность и не требует столь больших усилий затяжки, как при использовании свинца.

Заключение

Рассмотрены вопросы разработки и проектирования элементов оборудования для проведения экспериментов по плёночному кипению гелия-II как на Земле, так в условиях невесомости. Обоснован выбор материалов и параметров для нагревателя, пористой структуры, оболочки, а также уплотнителей. Представлена схема автоматизированной системы измерений, а также сборочный макет экспериментальной ячейки, предназначенной для проведения исследований в лабораторных условиях.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 11-08-00724).

Литература

1. Поведение паровой плёнки на сильно перегретой поверхности, погружённой в недогретую воду / В. С. Григорьев, В. Г. Жилин, Ю. А. Зейгарник [и др.] // ТВТ. – 2005. – Т. 43. – № 1. – С. 100 – 114.

2. Исследование процесса соприкосновения охладителя с горячей поверхностью при вскипании недогретой жидкости / К. И. Белов, Ю. П. Ивочкин, Ю. Ю. Пузина // Вестник МЭИ. – 2010. – № 3. – С. 44 – 50.
3. Пузина Ю. Ю. Определение кривизны межфазной поверхности при плёночном кипении недогретой воды на полусферическом нагревателе / Ю. Ю. Пузина // Известия РАН. Энергетика. – 2010. – № 6. – С. 52 – 58.
4. Экспериментальное исследование теплоотдачи в условиях интенсивного охлаждения металлического шара / М. А. Лексин, В. В. Ягов, А. Н. Варава // Вестник МЭИ. – 2009. – № 2. – С. 28 – 34.
5. Спиридонов А. Г. Экспериментальное исследование теплоотдачи к сверхтекучему гелию: дис. ... канд. техн. наук / А. Г. Спиридонов. – М. : МЭИ, 1981. – 168 с.
6. Calculation of the recovery heat flux from film boiling in superfluid helium / A. P. Kryukov, S. W. Van Sciver // Cryogenics. – 1981. – Vol. 21. – № 9 – P. 525 – 528.
7. 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.
8. Кипение He-II в пористой структуре при микрогравитации: модельное представление / И. М. Дергунов, П. В. Королёв, А. П. Крюков [и др.] // Физика низких температур. – 2003. – Т. 29. – № 6. – С. 653 – 658.
9. 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.
10. Анализ процессов теплопереноса в экспериментальной ячейке применительно к планируемым исследованиям кипения He-II на Международной космической станции / А. П. Крюков, Ю. Ю. Пузина // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2011. – Т. 125. – № 6. – С. 49 – 54.
11. Эксперименты по движению сверхтекучего гелия в капилляре применительно к планируемым исследованиям на Международной космической станции / И. Н. Голованов, П. В. Королёв, Ю. Ю. Пузина // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. – Т. 119. – № 6. – С. 49 – 56.
12. 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.
13. 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.
14. Kryukov A. P. The flow of liquid in a channel with vapor in the presence of longitudinal heat flux / A. P. Kryukov // High Temperature. – Vol. 38. – № 6. – P. 909 – 913.
15. Экспериментальное исследование кипения He-II на шаре / А. П. Крюков, А. Ф. Медников // Прикладная механика и техническая физика. – 2006. – Т. 47. – № 6. – С. 78 – 84.

16. Подавление колебаний границы раздела фаз пар – жидкость при пленочном кипении сверхтекучего гелия внутри пористого тела / А. П. Крюков, Ю. Ю. Пузина // Труды XIV Минского Международного Форума по Теплообмену. – Минск, 2012.
17. Temporal deterioration of helium heat transfer at moderate pulse heat load / Yu. P. Filippov, I. A. Sergeev // Proceedings of the Sixteenth International Cryogenic Engineering Conference. – Japan, 1996. – P. 609 – 612.
18. Сплавы для термопар: справочник / И. Л. Рогельберг, В. М. Бейлин. – М. : Metallurgia, 1983. – 360 с.
19. Низкотемпературная термометрия: учебное пособие для вузов / М. П. Орлова, О. Ф. Погорелова, С. А. Улыбин. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.

Поступила в редакцию 07.11.2012

Павел Викторович Королёв, канд. техн. наук, доцент, e-mail: Korolyov2007@yandex.ru.
Алексей Павлович Крюков, д-р техн. наук, профессор, e-mail: KryukovAP@mail.ru.
Юлия Юрьевна Пузина, канд. техн. наук, научн. сотрудник, e-mail: Puzina2006@inbox.ru.
Т. (495) 362-78-41.