

УДК 536.24

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИПЕНИЯ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ (He-II) ВНУТРИ ПОРИСТОГО ТЕЛА

П. В. Королев, А. П. Крюков, Ю. Ю. Пузина

Национальный исследовательский университет "МЭИ", 111250 Москва, Россия  
E-mails: Korolyov2007@yandex.ru, KryukovAP@mail.ru, Puzina2006@inbox.ru

Рассматриваются проблемы организации и проведения экспериментального исследования кипения сверхтекучего гелия (He-II) на цилиндрическом нагревателе, расположенном внутри пористого тела. Представлены схема установки, описание экспериментальной ячейки, средств контроля и измерения, а также видеофиксации и обработки данных. Приводится методика проведения эксперимента, а также полученные результаты.

Ключевые слова: эксперимент, He-II, тепломассоперенос, пленочное кипение, пористая структура.

DOI: 10.15372/PMTF20170412

**Введение.** Разработка новых подходов к проектированию установок для криостатирования элементов энергетического оборудования сверхтекучим гелием (He-II) является актуальной задачей. Развитие методов измерений позволяет изучить особенности тепломассопереноса в квантовой жидкости. В работе [1] приведено описание экспериментов по исследованию теплопереноса в вертикальной трубке, заполненной сверхтекучим гелием, при давлении насыщенных паров. Верхняя часть трубки нагревалась, температура нижней части поддерживалась на уровне 0,3 К. Ранее такая задача исследовалась также аналитически для температуры, равной 0,9 К. В ходе измерений в [1] оценивалась применимость ранее использованной модели в случае меньших температур, когда имеют место большие градиенты температур в трубке, что приводит к увеличению влияния побочных тепловых мостов. Результаты таких исследований могут быть использованы при разработке криогенных систем, рассчитанных на температуры менее 1 К.

Интерес к исследованию кипения сверхтекучего гелия в пористых структурах обусловлен изменением характера теплопереноса в нем и уменьшением скорости испарения, что приводит к улучшению работы криостатирующего оборудования. В работе [2] изучается процесс теплопереноса в сверхтекучем гелии, заключенном в объеме пористой среды, при уменьшении давления.

Целью данной работы является исследование кипения He-II на поверхности цилиндрического нагревателя в стесненных условиях.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-08-00980).

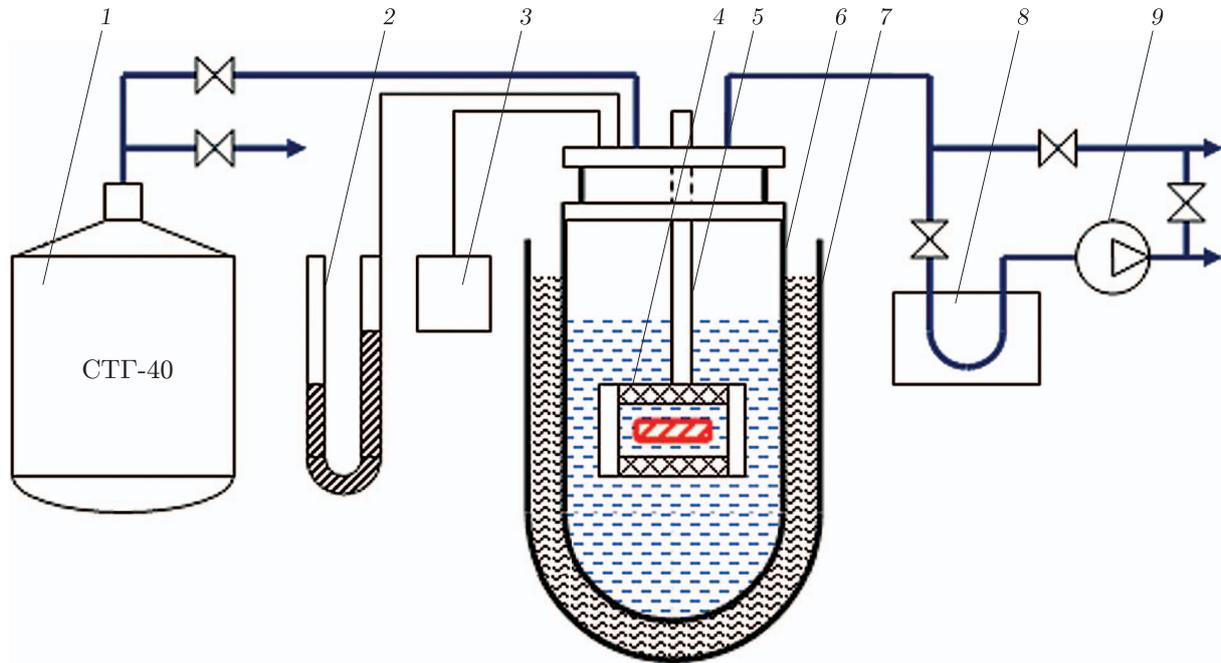


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1 — сосуд Дьюара СТГ-40, 2 — ртутный манометр, 3 — емкостный датчик давления “Баратрон”, 4 — экспериментальная ячейка, 5 — подвес, 6 — сосуд Дьюара, заполненный гелием, 7 — сосуд Дьюара, заполненный азотом, 8 — азотная ловушка, 9 — вакуумный насос НВЗ-20

**Экспериментальная установка.** В национальном исследовательском университете “МЭИ” (Москва) были выполнены эксперименты по изучению процессов теплопереноса при кипении сверхтекучего гелия [3, 4] на тонких проволочках. Эти эксперименты проводились в условиях свободного объема, так же как и последующие эксперименты, в которых исследовалось кипение He-II на шаре [5] и была получена гладкая устойчивая паровая пленка на поверхности нагревателя.

Также представляет интерес изучение динамики межфазной поверхности He-II в стесненных условиях. В работе [6] рассматривалось движение He-II в капилляре с паром при наличии осевого теплового потока. В ходе экспериментов было зафиксировано anomalous движение He-II к нагревателю, в отличие от движения обычных жидкостей, что подтверждалось аналитическими расчетами [7, 8].

В настоящее время создана экспериментальная установка для исследования кипения He-II на цилиндрическом нагревателе, расположенном внутри пористого тела [9].

Экспериментальный стенд, описываемый в данной работе, включает систему криостатирования, систему оптического наблюдения и цифровой видеозаписи, систему подачи тепловой нагрузки и измерения температуры (рис. 1). Криостат, обеспечивающий необходимую температуру менее 2,17 К, состоит из внутреннего рабочего сосуда диаметром 65 мм, заполненного гелием, и внешнего сосуда, заполненного азотом и представляющего собой защитный тепловой экран. Оба сосуда Дьюара имеют смотровые щели, ширина которых приблизительно равна 20 мм. Это позволяет проводить наблюдение и видеосъемку процессов в экспериментальной ячейке, находящейся во внутреннем сосуде.

Сосуд Дьюара, заполненный гелием, герметично закрывается металлической капкой (цилиндрическая муфта с фланцами) [6]. К капке приварены патрубки, один из которых предназначен для заливки жидкого гелия, через другой пропущена трубка подвеса,

на которой закреплена экспериментальная ячейка. Подвес выполнен в виде тонкостенной трубки диаметром 10 мм, внутри которой расположены электрические провода. Система одновременного перемещения видеокамеры и экспериментальной ячейки позволяет осуществлять видеосъемку нагревателя при любых положениях экспериментальной ячейки в сосуде Дьюара.

**Средства телеметрии.** Давление во внутреннем сосуде контролируется как визуально с помощью присоединенного к нему ртутного чашечного манометра МЧР-4, так и в автоматическом режиме емкостным датчиком давления “Баратрон” (модель 235). Погрешность измерения давления в диапазоне от 26,66 до  $10^4$  Па составляет 0,5 %.

Для видеофиксации процессов, происходящих в экспериментальной ячейке, используется видеомодуль Pixelink PL-B954HU с оптической системой увеличения масштаба изображения Navitar 6000, который обеспечивает 12-кратное увеличение и дает возможность получить изображение высокого качества и предельной четкости. В данном объективе фактически устранена хроматическая аберрация, что позволяет получить четкое видеоизображение и уменьшить оптическое искажение.

Камера, имеющая матрицу с разрешением 1,45 мегапикселя и систему CCD (разрешение съемки  $1392 \times 1040$ ), осуществляет съемку со скоростью 15 кадр/с. Камера имеет также систему FFC, обеспечивающую удовлетворительное качество изображения.

Связь средств телеметрии с компьютером осуществляется с помощью коммутационного кабеля (патч-корда).

Корпус ячейки представляет собой изготовленную из меди цилиндрическую оболочку длиной (вместе с торцевыми крышками) 50 мм с внутренним диаметром 38 мм (рис. 2). В боковой стенке оболочки просверлены отверстия диаметром 3,5 мм. Торцевые крышки, имеющие смотровые окна, выполненные из тонкого оргстекла (толщиной 1 мм), привинчиваются к корпусу. Расположенный на оси оболочки цилиндрический нагреватель крепится на Г-образном металлическом держателе (изогнутом стержне), который вставляется внутрь оболочки через отверстие в торцевой крышке. Держатель изолирован от корпуса эпоксидной смолой. Внутренняя резьба для винтов, крепящих крышки, нарезана непосредственно в корпусе ячейки.

Пористая структура, помещенная внутрь корпуса и припаянная к нему, представляет собой толстостенную оболочку (толщиной 7 мм), полученную путем наматывания 10 слоев стальной тканой сетки (диаметр основы — 0,12 мм, диаметр утка — 0,1 мм, диаметр плетения — 0,44 мм). Для герметизации ячейки используются прокладки из индиевой проволоки, которая перед привинчиванием крышек закладывается в имеющие форму окружностей канавки, выточенные в корпусе ячейки (на рис. 2 не показаны).

Нагреватель представляет собой цилиндрический медный стержень диаметром 3 мм и длиной 38 мм, на который намотана изолированная тонкая (диаметром 50 мкм) медная проволока длиной несколько метров. Вследствие малой величины поперечного сечения и большой длины сопротивление нагревателя (не менее 0,2 Ом) при низких температурах оказывается достаточным для получения требуемой тепловой нагрузки (до  $50 \text{ кВт/м}^2$ ). Греющий элемент нагревателя одновременно является термометром сопротивления.

Для измерения подаваемой нагрузки и сопротивления нагревателя применяется четырехпроводная схема сравнения. Преимуществом такой схемы является то, что в измеряемой величине напряжения учитывается падение напряжения в проводах. Питание измерительной схемы обеспечивается источниками постоянного тока Б5-43 и Б5-44. В качестве эталонного сопротивления применяется катушка Р321 сопротивлением 1 Ом с классом точности 0,2.

Автоматическая система сбора и обработки результатов эксперимента позволяет анализировать получаемые данные непосредственно во время эксперимента. Для измерения

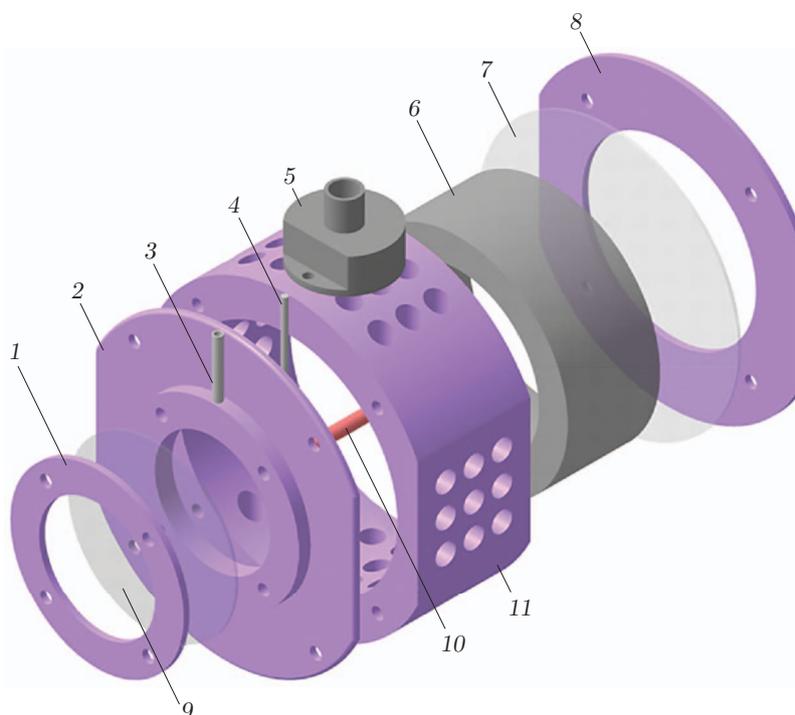


Рис. 2. Схема экспериментальной ячейки:

1, 2, 8 — крышка, 3 — патрубок, 4 — держатель, 5 — шток, 6 — пористое тело, 7, 9 — стекло смотрового окна, 10 — нагреватель, 11 — корпус

значения падения напряжения на эталонном сопротивлении и нагревателе, а также значений температуры в характерных точках экспериментальной ячейки используется аналого-цифровой преобразователь (АЦП) фирмы “Электронные технологии и метрологические системы” (г. Зеленоград). Эффективная разрядность данного АЦП последовательного приближения составляет 15 бит, отклонение от заданного входного напряжения равно  $\pm 7$  В. Таким образом, уровень квантования составляет  $2^{15} = 3,277 \cdot 10^4$ , разрешение по напряжению — 427 мкВ.

АЦП входит в состав модуля ZET 210, управляемого с помощью базового программного обеспечения ZETLAB. Высокоэффективный прибор АЦП ZET 210 используется в промышленности для измерения сигналов и проведения мониторинга, имеет 16 синфазных и 8 дифференциальных каналов и представляет собой 16-разрядный модуль ввода-вывода, измеряющий поступающие с первичных преобразователей сигналы в широком частотном диапазоне с частотой дискретизации до 400 кГц. Оптоизолированные входы обеспечивают защиту от воздействия высокого напряжения (500 В) между модулем и аналоговым входом (при постоянном токе). Подключение модуля к компьютеру и питание осуществляются через шину USB 2.0.

Совместно с АЦП используется дифференциальный усилитель ZET 411 с фиксированным коэффициентом усиления ( $K = 1, 10, 100, 1000$ ). Усилитель ZET имеет два дифференциальных входа, питание может осуществляться как от шины USB, так и от внешнего источника питания с напряжением 5 В. Подключение к АЦП может быть синфазным или дифференциальным. В рассматриваемом случае используется дифференциальное включение, которое обеспечивает более высокую помехозащищенность.

Электрическое сопротивление металлов и сплавов уменьшается при понижении температуры, поэтому сопротивление нагревателя (медной проволоки) измерялось в следующих реперных точках: при температуре сверхтекучего гелия 2,0 К (определенной по давлению насыщенных паров), при температуре кипения азота 77,4 К (также определенной по давлению его насыщенных паров) и при температуре окружающей среды 295,1 К. По результатам этих измерений была построена зависимость сопротивления нагревателя от температуры. Суммарная погрешность, обусловленная погрешностью аппроксимации, погрешностью измерения температуры и погрешностью измерения сопротивления нагревателя при различных температурах, составляет  $\pm 2$  К, что не позволяет измерить температуру с точностью, которую может обеспечить (за счет высокой точности измерения напряжения) АЦП при наличии точной зависимости  $R(T)$ . Однако при температуре нагревателя, составляющей десятки кельвинов, такая погрешность представляется приемлемой.

Для записи показаний нагревателя в режиме реального времени разработана программа в среде графического программирования SCADZET View, позволяющая получать данные о напряжении, силе тока и мощности нагревателя, а также сохранять их в виде, удобном для последующей обработки.

**Методика проведения эксперимента.** Предварительная “промывка” внутреннего сосуда Дьюара для удаления паров воды и других примесей осуществляется газообразным гелием, подаваемым из сосуда СТГ-40. Для этого внутренний сосуд сначала откачивается до давления порядка  $10^2$  Па, затем из сосуда СТГ-40 напускается газообразный гелий до достижения атмосферного давления. Такая процедура проводится не менее четырех раз для удаления из криостата паров воды и других конденсирующихся соединений.

Следующий этап — заливка жидкого азота во внешний сосуд. Падение давления вследствие охлаждения гелия во внутреннем сосуде контролируется с помощью ртутного чашечного манометра. По показаниям терморпар, установленных в экспериментальной ячейке, определяется момент охлаждения внутреннего сосуда до температуры, равной температуре жидкого азота во внешнем сосуде.

Завершающий этап заправки — заполнение внутреннего сосуда жидким гелием из сосуда СТГ-40 с помощью переливного сифона. Путем откачки паров гелия достигается температура  $\lambda$ -перехода. Переход гелия в сверхтекучее состояние наблюдается визуально (прекращение кипения жидкости).

Рабочий диапазон температур в сосуде Дьюара, заполненном гелием, достигается путем непрерывной откачки паров. Через патрубок (см. рис. 2) осуществляется соединение с линией откачки, ведущей к механическому вакуумному насосу НВЗ-20. Вспомогательный нагреватель, помещенный на дно сосуда с жидким гелием, и система вентилей позволяют поддерживать температуру на требуемом уровне.

Эксперимент начинается при включении нагревателя. При этом контролируются давление в криостате, нагрузка нагревателя и температура нагревателя. Одновременно происходит видеосъемка с синхронной записью полученной информации. Подача тепловой нагрузки на нагреватель приводит к образованию паровой пленки на нем и выходу пара через стенку пористой оболочки из экспериментальной ячейки в криостат. Этот процесс сопровождается повышением давления над поверхностью жидкости, поэтому в ходе эксперимента продолжается непрерывная откачка паров гелия, что приводит к понижению уровня жидкости в криостате. После прекращения подачи тепловой нагрузки жидкий гелий вновь заполняет полость внутри ячейки, паровая пленка постепенно схлопывается, и жидкость вступает в контакт с нагревателем. Для подготовки следующего эксперимента необходимо откачать пары гелия до требуемого уровня (3100 Па или ниже), а также в ряде случаев опустить ячейку до полного погружения в жидкость в криостате.

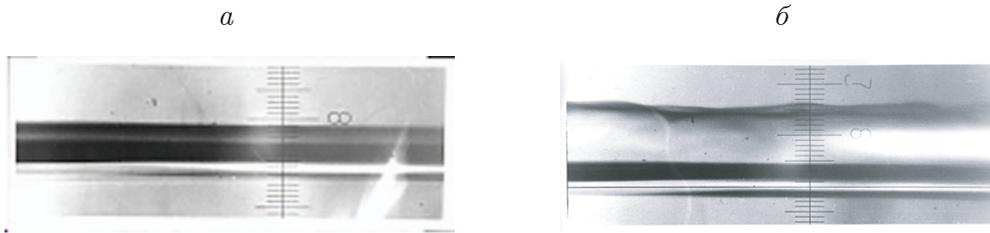


Рис. 3. Кипение He-II на тонкой платиновой пленке [3]:

$a$  —  $d = 191$  мкм,  $h = 28$  мм,  $T_l = 1,57$  К,  $q_w = 1,81 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>,  $T_w = 64$  К;  $b$  —  $d = 191$  мкм,  $h = 93$  мм,  $T_l = 2,14$  К,  $q_w = 6,7 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>,  $T_w = 144$  К

**Результаты экспериментов.** В проведенных ранее экспериментах, в которых исследовалось кипение He-II на тонкой платиновой проволоке (рис. 3,  $a$ ), наблюдалась замкнутая гладкая устойчивая паровая пленка, расположенная коаксиально нагревателю ( $d$  — диаметр нагревателя,  $h$  — глубина погружения,  $T_l$  — температура жидкости,  $q_w$  — тепловая нагрузка нагревателя,  $T_w$  — температура нагревателя) [3]. При большой глубине погружения симметричность поверхности пленки нарушалась и происходил переход к шумовому режиму кипения (рис. 3,  $b$ ). Предварительный численный анализ показал, что в случае кипения He-II внутри пористого тела возможен такой же режим кипения, однако толщина паровой пленки должна быть меньше, чем в случае кипения в свободном объеме [10]. Однако эксперименты, проведенные при различной глубине погружения экспериментальной ячейки в жидкость, показывают, что внутри пористой оболочки, замедляющей процесс теплопереноса, характер пленочного кипения He-II существенно меняется.

При подаче тепловой нагрузки развиваются следующие стадии процесса кипения:

1. На поверхности нагревателя образуются визуально различные объекты, подобные паровым микропузырькам.
2. Увеличение объема, занимаемого паровой фазой, приводит к образованию паровой пленки с межфазной поверхностью пар — жидкость.
3. Поперечное сечение пленки пара принимает каплеобразную форму, которая затем превращается в чашеобразную.
4. Объем пара в верхней части внутренней полости оболочки увеличивается, жидкость вытесняется паром из ячейки.
5. Паровая пленка представляет собой межфазную поверхность жидкость — пар во внутренней полости ячейки, так же как в задачах об определении формы межфазной поверхности в существенно неравновесных условиях [11, 12]. Однако в проводимых экспериментах отсутствует свободная поверхность жидкости и теплоперенос происходит во внутренней полости пористой оболочки.

На рис. 4 представлены кадры видеосъемки, полученные в одном из экспериментов. Удельный тепловой поток составлял приблизительно  $3,7$  кВт/м<sup>2</sup>, давление паров в сосуде Дьюара изменялось в диапазоне  $3195 \div 3232$  Па, постепенно увеличиваясь. Глубина погружения ячейки в этом эксперименте в начальный момент была приблизительно равна  $5$  см и медленно уменьшалась по мере откачки паров сверху. Температура нагревателя составляла приблизительно  $37,4$  К и изменялась незначительно.

После включения нагревателя образующийся пар вытесняет из внутренней полости ячейки значительную часть жидкого гелия, при этом паровой объем может занимать более половины объема этой цилиндрической полости. Паровая пленка, сначала имеющая каплеобразную форму, соединяется тонкой перемычкой с паровым объемом в верхней части внутренней полости (см. рис. 4,  $a$ ). Затем размер паровой пленки увеличивается (см.

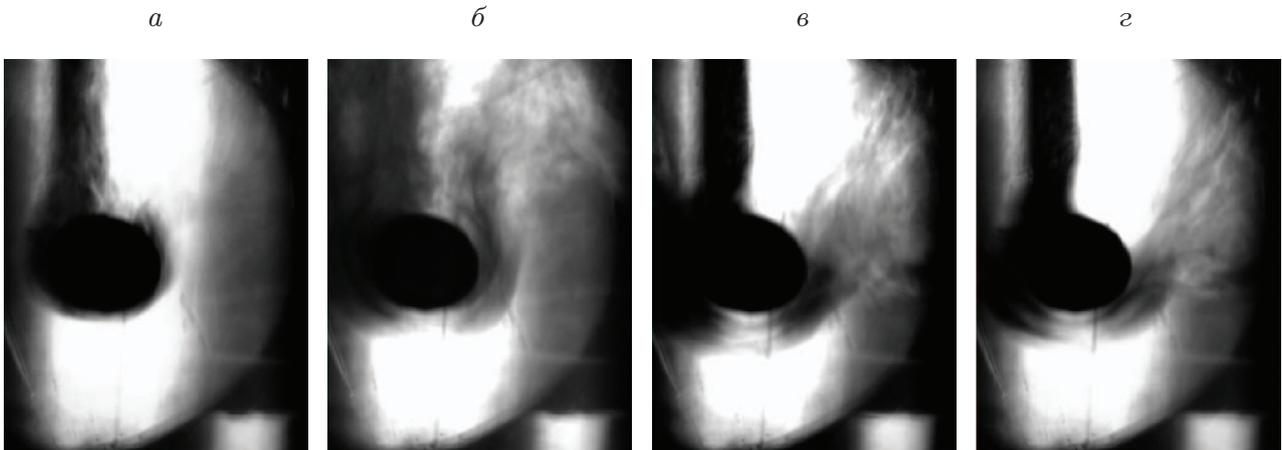


Рис. 4. Кадры видеосъемки пленочного кипения He-II ( $q_w = 3,7 \text{ кВт/м}^2$ , временной интервал между кадрами — 0,67 с)

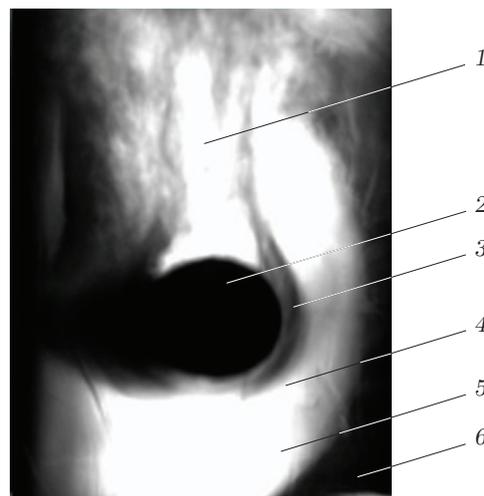


Рис. 5. Пленочное кипение гелия внутри пористого тела ( $q_w = 9,8 \text{ кВт/м}^2$ ,  $T_w = 37,4 \text{ К}$ ,  $P_b = 2630 \text{ Па}$ ,  $h = 24 \text{ см}$ ):

1 — скопление пара, 2 — нагреватель, 3 — паровая пленка, 4 — межфазная поверхность, 5 — жидкость, 6 — корпус ячейки

рис. 4,б) и она становится частью парового пространства, образующегося внутри пористой структуры (см. рис. 4,в,г). Температура He-II в криостате с течением времени незначительно увеличивается, что обусловлено увеличением давления пара над поверхностью жидкости (на 37 Па) вследствие испарения He-II в ячейке под действием теплового потока.

Характерная картина развитого кипения гелия внутри пористой оболочки представлена на рис. 5. Форма межфазной поверхности существенно отличается от наблюдавшейся в экспериментах, проведенных для условий свободного объема (см. рис. 3).

На рис. 6 показан процесс пленочного кипения при четырех включениях нагревателя в эксперименте. Тепловая нагрузка нагревателя практически не менялась ( $10^4 \text{ Вт/м}^2$ ), поэтому размер паровой пленки зависел от глубины погружения и давления паров в сосуде. Максимальной глубине погружения экспериментальной ячейки  $h$  соответствует минимальное давление пара над жидкостью в сосуде  $P_b$  (см. рис. 6,а). Увеличение давления над поверхностью жидкости, а следовательно, и увеличение равновесной температуры жидко-

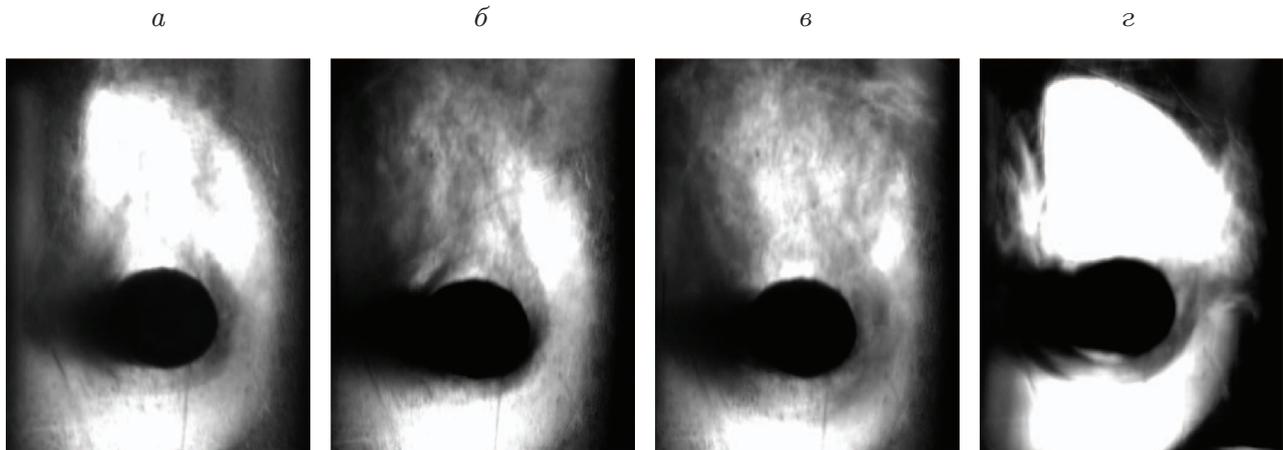


Рис. 6. Кадры видеосъемки пленочного кипения при четырех включениях нагревателя:

*a* —  $q_w = 9820 \text{ Вт/м}^2$ ,  $P_b = 2598 \text{ Па}$ ,  $h = 25 \text{ см}$ ; *б* —  $q_w = 9749 \text{ Вт/м}^2$ ,  $P_b = 4029 \text{ Па}$ ,  $h = 25 \text{ см}$ ; *в* —  $q_w = 8716 \text{ Вт/м}^2$ ,  $P_b = 4408 \text{ Па}$ ,  $h = 10 \text{ см}$ ; *г* —  $q_w = 8647 \text{ Вт/м}^2$ ,  $P_b = 4473 \text{ Па}$ ,  $h = 5 \text{ см}$

сти приводит к увеличению толщины паровой пленки (см. рис. 6,б). Уменьшение глубины погружения также приводит к увеличению толщины паровой пленки (см. рис. 6,в), поскольку гидростатическая разность давлений уменьшается. В случаях, представленных на рис. 6,а–в, температура нагревателя составляла 37,4 К, что соответствует стационарному режиму кипения гелия. В случае, представленном на рис. 6,г, температура нагревателя увеличивалась до значения, равного 80 К. При этом паровая пленка “разваливалась” и паровой объем занимал более половины внутренней полости пористой оболочки. Такая ситуация возможна при минимальной глубине погружения экспериментальной ячейки.

Во всех сериях экспериментов наблюдалась разомкнутая форма межфазной поверхности, когда паровая пленка сообщается с паровым объемом в верхней части внутреннего пространства экспериментальной ячейки. В отличие от экспериментальных данных, полученных ранее при кипении He-II в большом объеме, в стесненных условиях режим кипения сверхтекучего гелия подобен режиму пленочного кипения обычных жидкостей. При этом визуально наблюдается конвективное движение пара в пленке, что характерно для пленочного кипения неквантовых жидкостей, в то время как при бесшумовом кипении сверхтекучего гелия, наоборот, влияние конвекции на теплоперенос незначительно, т. е. перенос теплоты осуществляется за счет теплопроводности [4]. Таким образом, обнаружено изменение характера процесса теплопереноса при пленочном кипении He-II на цилиндрическом нагревателе, помещенном в полости внутри пористого тела.

**Заключение.** Проведено экспериментальное исследование кипения He-II на цилиндрическом нагревателе, расположенном внутри пористого тела. Видеосъемка осуществлялась с торца нагревательного элемента. Результаты экспериментов показывают, что при различных глубинах погружения экспериментальной ячейки в жидкость характер процесса кипения He-II отличается от характера этого процесса в свободном объеме. Из результатов предварительного анализа следовала возможность существования на поверхности нагревателя гладкой устойчивой паровой пленки, расположенной коаксиально нагревателю [10]. Однако во всех экспериментах паровая пленка оставалась разомкнутой, а пар скапливался в верхней части пространства экспериментальной ячейки. Таким образом, режим кипения He-II был близок к режиму кипения обычных жидкостей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Kendellen D. P., Haase D. G.** Measurement and modeling of thermal flow in an enclosed tube containing superfluid helium film // *Cryogenics*. 2013. V. 57. P. 134–139.
2. **Vanderlaan M. H., Van Sciver S. W.** He II heat transfer through random packed spheres: Pressure drop // *Cryogenics*. 2014. V. 63. P. 37–42.
3. **Лабунцов Д. А., Аметистов Е. В., Спиридонов А. Г.** Исследование пленочного режима кипения гелия (He-II) // *Теплоэнергетика*. 1981. № 4. С. 18–20.
4. **Аметистов Е. В.** Теплообмен с He II / Е. В. Аметистов, В. А. Григорьев. М.: Энергоатомиздат, 1986.
5. **Крюков А. П., Медников А. Ф.** Экспериментальное исследование кипения He-II на шаре // *ПМТФ*. 2006. Т. 47, № 6. С. 78–84.
6. **Королев П. В., Крюков А. П., Медников А. Ф.** Экспериментальное исследование движения гелия II в капилляре при наличии паровой полости вблизи нагревателя // *Вестн. Моск. энерг. ин-та*. 2006. № 4. С. 27–33.
7. **Королев П. В., Крюков А. П.** Движение сверхтекучего гелия в капилляре с паром при наличии продольного теплового потока // *Вестн. Моск. энерг. ин-та*. 2002. № 1. С. 43–46.
8. **Крюков А. П.** Движение жидкости в канале с паром при наличии продольного теплового потока // *Теплофизика высоких температур*. 2000. Т. 38, № 6. С. 945–949.
9. **Королев П. В., Крюков А. П., Пузина Ю. Ю.** Конструкция экспериментальной ячейки для исследования кипения гелия-II в условиях невесомости // *Вопр. электромеханики: Тр. Всерос. науч.-исслед. ин-та электромеханики*, 2012. Т. 130, № 5. С. 43–50.
10. **Крюков А. П., Королев П. В., Пузина Ю. Ю.** Влияние проницаемости пористой оболочки на толщину паровой пленки при кипении сверхтекучего гелия в условиях невесомости // *ПМТФ*. 2015. Т. 56, № 4. С. 121–132.
11. **Клименко А. В., Сеницын А. Г.** Плавание сферы с температурой, превышающей температуру предельного перегрева жидкости // *Тр. Моск. энерг. ин-та*. 1984. Вып. 34. С. 104–112.
12. **Григорьев В. С., Жилин В. Г., Зейгарник Ю. А. и др.** Поведение паровой пленки на сильно перегретой поверхности, погруженной в недогретую воду // *Теплофизика высоких температур*. 2005. Т. 43, № 1. С. 100–114.

*Поступила в редакцию 3/VI 2016 г.,  
в окончательном варианте — 23/VIII 2016 г.*

---