

На правах рукописи

Медников Александр Феликсович

ДВИЖЕНИЕ МЕЖФАЗНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ «НЕ-П – ПАР»  
В КАПИЛЛЯРАХ И ПРИ КИПЕНИИ НА ШАРОВЫХ  
НАГРЕВАТЕЛЯХ

Специальность 05.04.03 – Машины и аппараты, процессы  
холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования  
и жизнеобеспечения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2007

Работа выполнена в Государственном Образовательном Учреждении  
Высшего Проффессионального Образования Московском Энергетическом  
Институте (Техническом Университете) на кафедре низких температур.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор  
Крюков Алексей Павлович

Официальные оппоненты - доктор технических наук,

Ведущая организация -

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2007 года в \_\_\_\_\_ часов на  
заседании диссертационного совета Д212.157.04 при Московском  
Энергетическом институте (техническом университете) по адресу: 111250,  
Москва, Красноказарменная ул., д. 14, в Малом актовом зале

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ (ТУ).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения,  
просим направлять по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14,  
Ученый совет МЭИ (ТУ).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук  
доцент

МИКА В.И

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Техническое применение устройств, использующих эффекты, возникающие при температурах ниже 2 К: сверхчувствительные магнитометры на базе сверхпроводящих квантовых интерференционных приборов, инфракрасные датчики, сверхпроводящие магнитные системы и др., требует создания систем криобезопасения.

В этих условиях практически используемым криоагентом является сверхтекучий гелий – He-II, к числу преимуществ которого следует отнести высокие значения критических тепловых потоков (104 – 105 Вт/м<sup>2</sup>), независимость теплоотдачи и кризиса кипения от ориентации поверхности, отсутствие паровой фазы вплоть до первого критического потока. Обладая высокой эффективностью теплопереноса, He-II обеспечивает надежный тепловой контакт между элементами охлаждающих систем.

В современных системах криобезопасения имеются разделители фаз для отделения пара от жидкости в виде щелевых зазоров, или капиллярно-пористых тел, которые содержат сквозные и глухие каналы с межфазной поверхностью.

Кроме того, при охлаждении сильно нагретого тела холодной жидкостью на его поверхности обычно возникает паровая пленка. Подобный процесс происходит при паровом взрыве и возможен при аварийном режиме работы теплообменной аппаратуры систем криобезопасения.

Для контроля и управления такими процессами необходимо знать положение межфазной поверхности в этих условиях. Однако закономерности поведения межфазной поверхности, в частности, в одиночном канале и на сферической поверхности, изучено недостаточно.

В связи с этим изучение поведения межфазной поверхности в описанных условиях является актуальным.

Анализ отечественных и иностранных данных о состоянии вопроса, проведенный автором, показывает отсутствие экспериментальных данных, во-первых, по движению He-II в капилляре при наличии паровой полости между сверхтекучим гелием и нагревателем и, во-вторых, по кипению He-II на шаре.

Решение поставленных задач обеспечивает рост надежности эксплуатации криогенного оборудования, работающего с He-II.

**Цель работы.** Целью работы является экспериментальное исследование движения межфазных поверхностей как в капиллярах при подаче теплоты через паровую полость, так и при кипении на шаровых нагревателях в большом объеме. Для достижения поставленной цели ставятся следующие задачи:

✓ сборка экспериментального стенда, позволяющего снимать на видеопленку движение межфазных поверхностей «He-II – пар» в капиллярах, и положение межфазной поверхности при пленочном кипении He-II на шаре.

✓ разработка экспериментальной ячейки, позволяющие проводить исследования движения перемычки He-II в капилляре одного диаметра длиной как в несколько метров, так и в несколько сантиметров.

✓ разработка экспериментальной ячейки, позволяющей проводить исследования положения межфазной поверхности «He-II – пар» при пленочном кипении на шаре.

✓ проведение экспериментальных исследований по движению He-II в капиллярах различной длины при наличии паровой области между He-II и нагревателем.

✓ проведение экспериментальных исследований при пленочном кипении He-II на шаре в бесшумовом режиме.

**Научная новизна.** Впервые обнаружен эффект движения межфазной поверхности «He-II – пар» в капилляре длиной 8 метров и диаметром 250 мкм к нагревателю при наличии паровой полости между нагревателем и He-II в диапазоне температур от 1,3 до 2,0 К.

Предложена модель расчета скорости движения межфазной границы «He-II – пар» в таком капилляре, описывающая полученные экспериментальные данные.

Установлено, что направление движения He-II в капилляре зависит от соотношения длины капилляра и его диаметра.

Экспериментально подтверждено, что такой эффект наблюдается лишь для He-II.

Установлено, что имеется область температур и тепловых потоков, при которых наблюдается колебательный режим движения перемычки He-II в капилляре длиной 8 метров и диаметром 250 мкм.

Впервые экспериментально получены как картина зарождения паровой пленки на шаре, так и значения радиуса паровой пленки для бесшумового пленочного кипения He-II для различных глубин погружения и температур He-II.

**Практическая ценность.** Полученные результаты являются методикой, которая необходима при разработке и проектировании высокоэффективных аппаратов криогенной техники, например, при проектировании экспериментальной ячейки для изучения кипения He II в условиях невесомости, а также в учебном процессе.

**Апробация работы.** Основные результаты работы доложены на IX и XI международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2003 и 2005 г.); на XV Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под

руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (Калуга, 2005 г.).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и выводов и имеет объем стр., включая рисунков и таблицы. Список литературы состоит из наименования.

**Автор выносит на защиту :**

1. Экспериментально установленный факт движения перемычки He-II в капилляре длиной 8 м в диапазоне температур от 1,3 до 2,0 К и удельных межфазных тепловых потоков от 100 до 1000 Вт/м<sup>2</sup>.

2. Экспериментально полученные зависимости скорости движения перемычки He-II в капилляре в зависимости от удельного межфазного теплового потока.

3. Результаты расчетов распределения тепловых потоков в канале с He-II для случая «игольчатого» нагревателя.

4. Экспериментально полученные данные по межфазному тепловому потоку для случая пленочного кипения He-II на шаре.

5. Экспериментальные зависимости радиуса паровой пленки от времени для случая пленочного кипения He-II на шаре.

6. Результаты расчетов поправки при расчете межфазного теплового потока для случая пленочного кипения на шаре.

**СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации; формулируются цели и конкретные задачи работы; приводятся положения выносимые на защиту; поясняются научная новизна и практическая ценность работы.

**В первой главе** проведен обзор литературных данных по движению межфазных поверхностей «He-II - пар» в капилляре и в большом объеме, который позволил сделать следующие выводы: случаи движения He-II в капилляре при наличии паровой полости между нагревателем и He-II мало изучены; общие закономерности пленочного кипения для случая кипения He-II на шаре исследованы только теоретически,.

Недостаточность экспериментальных данных по движению межфазных поверхностей “He-II – пар” в капилляре не позволяет описать поведение перемычки He-II в капилляре, и этот вопрос требует дальнейшего изучения.

Помимо этого анализ показал, что движение паровой пленки при пленочном кипении He-II на шаре также является мало изученным. Имеются только теоретические работы, посвященные этой теме. Для случая пленочного кипения He-II на шаре экспериментальные данные вообще отсутствуют. На основе рассмотрения состояния проблемы ставятся следующие задачи для исследования:

1. Экспериментальное изучение режимов термического противотока в He-II у границы с паром в капиллярах одного диаметра, но различной длины.

2. Разработка практических методов расчета межфазного теплового потока при пленочном кипении на шаровом нагревателе.

3. Экспериментальное изучение межфазного теплового потока при пленочном кипении He-II на шаре в бесшумовом режиме.

**Во второй главе** предложены методы расчета межфазного теплового потока при движении межфазных поверхностей «He-II – пар» в капилляре и при кипении на шаре. Вначале рассмотрена схема, представленная на рис.1, для расчета межфазного теплового потока в канале с He-II.

Тепловой поток  $Q$ , поступающий в He-II от нагревателя, определяем по формуле:

$$Q = Q_{i0} + Q_w - Q_{\alpha} \quad , \quad (1)$$

где  $Q_{i0}$  – тепловой поток, поступающий на межфазную поверхность «He-II – пар» от нагревателя по пару – рассчитывается по модели теплопроводности при известных температурах нагревателя  $T_h$  и He-II  $T_b$ ;  $Q_w$  – тепловой поток по стенке цилиндрической трубки – рассчитывается по модели теплопроводности для известных температур стенки канала вблизи от нагревателя  $T_w$  и He-II  $T_b$ ,  $Q_{\alpha}$  – тепловой поток, отводимый с боковой поверхности цилиндрической трубки за счет вынужденной конвекции.

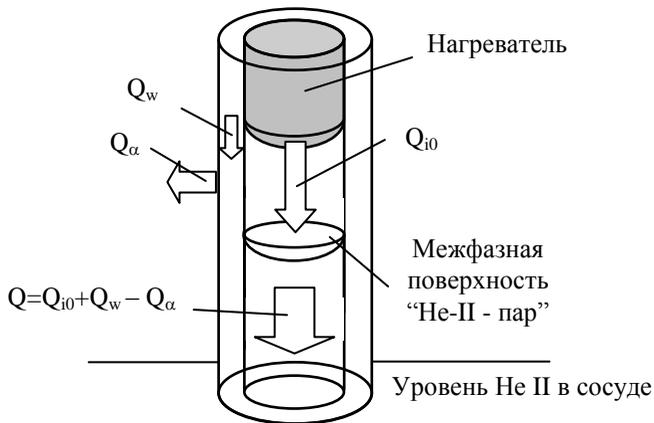


Рис.1. Распределение тепловых потоков в канале с He-II

Расчет составляющих формулы (1) для материала трубки – фторопласта – и различного сочетания температур  $T_h$ ,  $T_b$ ,  $T_w$  приведен в табл.1.

*Вывод из табл.1:* при отсутствии надежного теплового контакта нагревателя со стенкой ( $T_h \gg T_w$ ) можно пренебречь тепловым потоком по

стенке и считать, что тепло на межфазную поверхность «He-II - пар» поступает по пару.

Таблица 1  
Распределение тепловых потоков в канале с нагревателем

$T_b = 1,70 \text{ K}$		$T_h, \text{K}$								
		5	10	20	30	50	70	100	120	150
$T_w = 5 \text{ K}$	$Q_{i0}, \text{ мкВт}$	6,6	23,6	76,9	151	354	618	1116	1508	2181
	$Q_w, \text{ мкВт}$	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2
	$Q_a, \text{ мкВт}$	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7
	$Q_{i0}/Q, \%$	93	98	99	100	100	100	100	100	100
$T_w = 10 \text{ K}$	$Q_{i0}, \text{ мкВт}$		23,6	76,9	151	354	618	1116	1508	2181
	$Q_w, \text{ мкВт}$		199	199	199	199	199	199	199	199
	$Q_a, \text{ мкВт}$		79	79	79	79	79	79	79	79
	$Q_{i0}/Q, \%$		16	39	56	75	84	90	93	95
$T_w = 20 \text{ K}$	$Q_{i0}, \text{ мкВт}$			76,9	151	354	618	1116	1508	2181
	$Q_w, \text{ мкВт}$			1121	1121	1121	1121	1121	1121	1121
	$Q_a, \text{ мкВт}$			162	162	162	162	162	162	162
	$Q_{i0}/Q, \%$			7	14	27	39	54	61	69

Далее рассмотрена система из двух сосудов диаметром  $D$ , соединенных капилляром диаметром  $d$ . Для такой системы, представленной на рис.2, необходимо иметь соотношение, устанавливающее связь между межфазным тепловым потоком и скоростью движения перемычки, заполняющей эту систему. Необходимо, чтобы такое соотношение было справедливым для случая, когда нет притока He-II в эту систему извне.

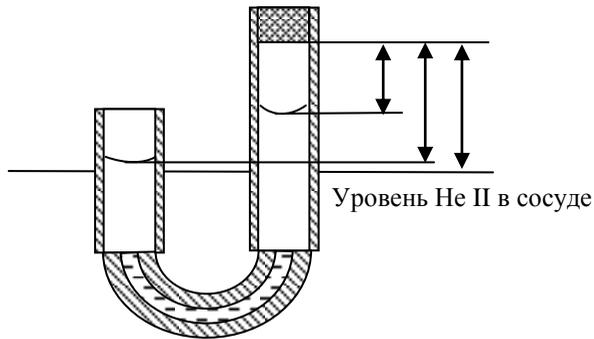


Рис. 2. Система из двух цилиндрических сосудов большого диаметра  $D$ , соединенных капилляром диаметра  $d$ .

Принята гипотеза о том, что вся теплота, поступившая на межфазную поверхность в сосуде диаметром  $D$ , без потерь распространяется в капилляре диаметром  $d$ , что справедливо для He-II, обладающего уникальными теплопроводными характеристиками. Связь между удельными потоками теплоты в сосуде и капилляре записана в виде:

$$q_d = q_b \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^2 \quad (2)$$

Скорость движения перемычки в системе, представленной на рис.2, для ламинарного режима течения нормального и безвихревого сверхтекучего движений представлена в виде:

$$V' = \left[ \frac{d^2}{32 \cdot \eta_n \cdot l} \cdot \Delta p \right] \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 - \frac{q_d}{\rho' \cdot S \cdot T_b} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2, \quad (3)$$

где  $\Delta p$  – перепад давления по длине перемычки,  $l$  – длина капилляра диаметром  $d$ ,  $T_b$  – температура He-II

Перепад давление по длине перемычки определяется из анализа движения перемычки He-II в одиночном капилляре<sup>1</sup>:

$$\Delta p = \frac{(q/r) \sqrt{2\pi R T_b}}{\left(1 - \frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \cdot \frac{r}{S T_b}\right)} \cdot \left(0.6 + \frac{r}{8 R T_b}\right) \quad (4)$$

Скорость движения перемычки в сосуде диаметром  $D$  для системы из двух сосудов диаметром  $D$ , соединенных капилляром диаметром  $d$ , для турбулентного режима течения нормального движения и безвихревого сверхтекучего движения представлена в виде формулы (5), где  $\Delta p$  определяется по (4):

$$V' = \left[ \frac{6,33 \cdot d^{1,25}}{\eta_n^{0,25} \cdot l \cdot \rho^{0,75}} \cdot \Delta p \right]^{\frac{4}{7}} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 - \frac{q_d}{\rho' \cdot S \cdot T_b} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2, \quad (5)$$

Скорость движения перемычки в сосуде диаметром  $D$  для системы из двух сосудов диаметром  $D$ , соединенных капилляром диаметром  $d$ , для турбулентного режима течения нормального и сверхтекучего движений представлена в виде:

$$V' = \left[ \frac{6,33 \cdot d^{1,25}}{\eta_n^{0,25} \cdot l \cdot \rho^{0,75}} \cdot \Delta p_{\Sigma} \right]^{\frac{4}{7}} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 - \frac{q_d}{\rho' \cdot S \cdot T_b} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2, \quad (6)$$

где  $\Delta p_{\Sigma}$  определяется по формуле, учитывающей связь теплового потока и перепада температур по теории Гортера-Меллинка:

$$\Delta p_{\Sigma} = \frac{\rho' \cdot S \cdot f_{GM}(T_b) \cdot q^3 \cdot l}{\frac{S \cdot T_b}{r} \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1\right) - 1} + \frac{(q_d/r) \sqrt{2 \cdot \pi \cdot R \cdot T_b}}{\left(1 - \frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \cdot \frac{r}{S \cdot T_b}\right)} \cdot \left(0.6 + \frac{r}{8 \cdot R \cdot T_b}\right), \quad (7)$$

<sup>1</sup> Королев П.В., Крюков А.П. Движение сверхтекучего гелия в капилляре с паром при наличии продольного теплового потока // Вестник МЭИ.– 2002.– №1 – С. 43–46

где  $f_{GM}(T)$  – функция Гортера-Меллинка,  $r$  – теплота парообразования,  $R$  – индивидуальная газовая постоянная для гелия.

Таким образом, формулами (1)-(7) установлена связь между межфазным тепловым потоком и скоростью движения межфазной поверхности «He-II - пар» в системе, изображенной на рис.2.

Далее во второй главе предложен метод получения экспериментального значения величины межфазного теплового потока для пленочного кипения He-II на шаре, который предполагает знание теплового потока с поверхности нагревателя.

$$q_i = q_w \cdot \left( \frac{d_w}{D_i} \right)^2 \quad (8)$$

где  $q_i$  – межфазный тепловой поток,  $q_w$  – тепловой поток с поверхности нагревателя,  $D_i$  - диаметр паровой пленки,  $d_w$  – диаметр шара.

Знание удельного теплового потока с поверхности нагревателя, модельная схема которого представлена на рис.3, невозможно без расчета утечек теплоты по питающим проводам.

Расчет температуры нагревателя, проведенный путем решения сопряженной задачи теплопроводности через многослойную систему: фторопластовая изоляция («3» на рис.3) – шаровой слой из конструкционной (шарикоподшипниковой) стали («2» на рис.3)– паровая пленка («5» на рис.3) – He-II, а также от нагревателя через провод к He-II, показывает, что температура поверхности нагревателя для шара диаметром 6 мм и тепловой нагрузки на нагревателе в 4.3 Вт составляет примерно 210 К, внешней поверхности фторопластовой изоляции 85 К, а поверхности шара, находящейся в контакте с паровой пленкой, 80 К. Таким образом, для рассмотренного примера утечки теплоты по питающим проводам 4 на рис.3 составили 20 % от общего количества теплоты, выделившейся на нагревателе.

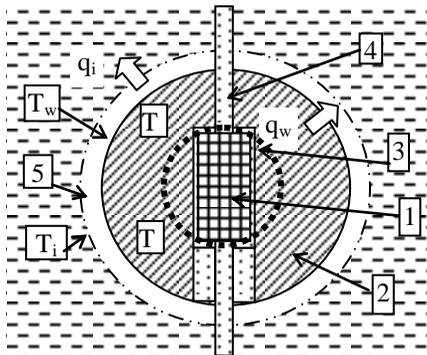


Рис. 3. Схема модельного образца с образованной в результате подачи теплоты паровой пленкой: 1 – нагреватель из графита, 2 – шар из конструкционной стали, 3 – изоляция из фторопласта, 4 - питающие провода из меди

Подход к теоретическому расчету межфазного теплового потока на межфазной поверхности «He-II – пар» сводится к расчету этой величины путем использования результатов изучения соответствующих процессов переноса методами молекулярно-кинетической теории<sup>1</sup> и представляет собой следующее соотношение:

$$q_i = 2,27 \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot \sqrt{2 \cdot R_{\mu} \cdot T_b} \quad (9)$$

Помимо рассмотренных выше методов расчета межфазных тепловых потоков, во второй главе определен метод получения количественной информации с цифрового изображения.

С фотографии, запечатлевшей процесс пленочного кипения, для расчета межфазного теплового потока по формуле (8) необходимо получить радиус паровой пленки. Это возможно двумя методами – либо прямым измерением радиуса паровой пленки, назовем его «метод 1» – либо измерением толщины паровой пленки с последующим ее прибавлением к уже известному радиусу шара, назовем его «метод 2». Наименьшую погрешность дает измерение радиуса паровой пленки по “методу 1”, поэтому этот метод использовался при последующей обработке фотографий.

Результаты, полученные во второй главе, использовались для интерпретации результатов экспериментов.

**В третьей главе** приведено описание экспериментальной установки, метода проведения экспериментов, расчет погрешностей измерений.

Схема экспериментального стенда приведена на рис.4. Криостат, позволяющий обеспечить необходимый уровень температур ниже 2,17 К, представлял собой два стеклянных сосуда Дьюара разных диаметров: внутреннего гелиевого и внешнего азотного. Внутренний гелиевый сосуд имел внутренний диаметр 55 мм. Внешний сосуд заполнялся жидким азотом, выполнявшим функцию защитного теплового экрана.

Оба сосуда Дьюара имели смотровые щели шириной около 20 мм. Это позволило проводить наблюдение и видеосъемку процессов в экспериментальной ячейке, находившейся во внутреннем сосуде.

Внутренний сосуд был соединен с линией откачки, ведущей к механическому вакуумному насосу НВЗ-20. Рабочий диапазон температур в ванне гелия достигался путем откачки паров. Вспомогательный нагреватель, помещенный на дно сосуда с жидким гелием, и система клапанов позволяли поддерживать температуру на требуемом уровне.

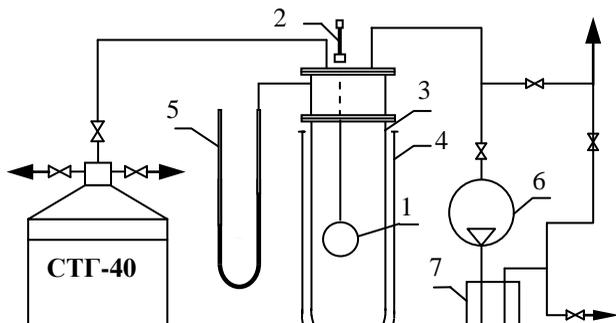


Рис. 4. Схема экспериментального стенда: 1 – экспериментальная ячейка, 2 – подвес, 3 – гелиевый сосуд Дьюара, 4 – азотный сосуд Дьюара, 5 – манометр ртутный, 6 – насос вакуумный НВЗ-20, 7 – азотная ловушка

Оптическая система состояла из микроскопа МБС-10, видеокамеры SONY, источника света (см. рис. 5). Источник света располагался перед одной из смотровых щелей в стенке сосуда. Микроскоп с присоединенной к нему видеокамерой устанавливался у противоположной щели. При анализе результатов экспериментов характерным масштабом служили известные наружный и внутренний диаметры капилляра. Для экспериментов с шаром характерным масштабом служил диаметр шара.

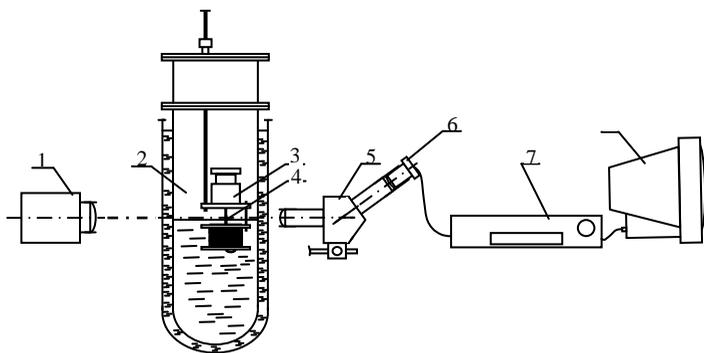


Рис. 5. Оптическая система: 1– источник света, 2 – криостат, 3 – экспериментальная ячейка, 4 – объект съемки (концы капилляра), 5 – микроскоп МБС-10, 6 – видеокамера, сопряженная с микроскопом, 7 – видеоманитофон, 8 – монитор

Для изучения движения перемычки He-II на основе предварительного анализа был выбран капилляр диаметром 250 мкм и длиной 8 м. Его наружный диаметр равнялся 1,56 мм. В результате предварительных экспериментов стало очевидно, что наблюдение мениска даже в относительно прозрачном капилляре из фторопласта внутренним диаметром 250 мкм и толщиной стенки в 650 мкм достаточно сложно. Для облегчения наблюдения менисков на оба конца капилляра были надеты трубочки из того же материала, но большего внутреннего диаметра (в эксперименте этот диаметр

1,0 мм). Таким образом, получилась система, описанная во второй главе (рис.2), состоящая из двух сосудов «большого» объема, соединенных капилляром. Чтобы поместить капилляр длиной 8 м в сосуд Дьюара, его наматывали на катушку диаметром 30 мм и высотой 30 мм, сделанную из фторопласта. Диаметр навивки составлял 4-5 см, т.е. примерно в 200 раз превышал диаметр капилляра, так что последний в первом приближении можно было рассматривать как прямой.

Нагреватель представлял собой проволоку из константана диаметром 50 мкм, намотанную на медную, покрытую лаком, иглу диаметром 0,5 мм, вставленную в трубку диаметром 1 мм. Сам нагреватель из константана служил термометром сопротивления<sup>2</sup>, по которому определялась его температура.

Собранная таким образом экспериментальная ячейка (см. рис. 6) прикреплялась к металлическому стержню, продетому через отверстие во фланце нижнего цилиндра, и подвешена на нем внутри сосуда Дьюара. Двигая стержень (подвес), можно было опускать и поднимать экспериментальную ячейку, что давало возможность заполнять весь капилляр He-II, а затем поднимать открытый его конец над свободным уровнем жидкости, как показано в правой части рис. 6.

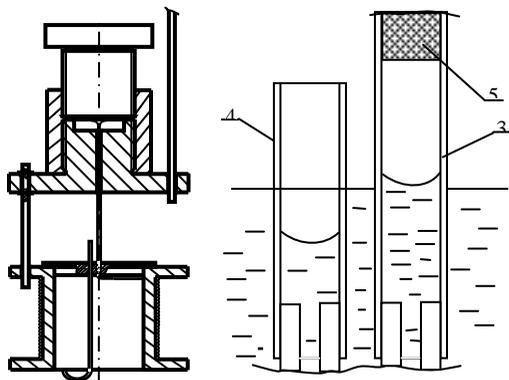


Рис. 6. Экспериментальная ячейка: 1 – бухта с капилляром диаметром 250 мкм длиной 8 м, 2 – бобышка с нагревателем, 3 – концевая трубка внутренним диаметром 1 мм (закрытое колено), 4 – концевая трубка внутренним диаметром 1 мм (открытое колено), 5 – нагреватель

Для последующих экспериментов была собрана точно такая же экспериментальная ячейка, отличающаяся лишь длиной капилляра – 8 см.

<sup>2</sup>Роуз-Инс А. Техника низкотемпературного эксперимента. Использование жидкого гелия в лабораторной практике. Перевод с англ. В.Е. Кейлина, М.Г. Кремлева. / Под ред. Б.Н. Самойлова. – М.: Издательство «Мир», 1966. – 216 с

Капилляр длиной 8 см и диаметром 250 мкм был установлен в форме петли. Во всем остальном конструкции экспериментальных ячеек одинаковы для капилляра длиной 8 м и 8 см.

Стальной шар из шарикоподшипника, имеющий отверстие диаметром 2,5 мм, которое проходит через центр шара, служил основой для экспериментальной ячейки для изучения пленочного кипения He-II (рис.6). В этом отверстии расположили нагреватель из графита, изолированный от шара фторопластовой лентой. Нагреватель представлял собой цилиндр диаметром 2 мм и высотой 3 мм с четырьмя проводами по обеим сторонам: двумя потенциальными и двумя силовыми. Кроме того, на поверхности шара просверлили три отверстия на глубину 1 мм диаметром 0,5 мм для термодатчиков. Такая конструкция использовалась для двух шаров диаметром 4,8 мм и 6,0 мм. Геометрические характеристики нагревателя и посадочного места под нагреватель были одинаковыми для обоих шаров.

В третьей главе также приведена оценка погрешностей экспериментов. При оценке погрешностей определения радиуса паровой пленки на цифровой фотографии вначале строились распределения различных областей фотографии (стенка, жидкость, пар) по яркости (см. рис. 7) в предположении, что распределения яркостей этих областей подчиняются нормальному закону.

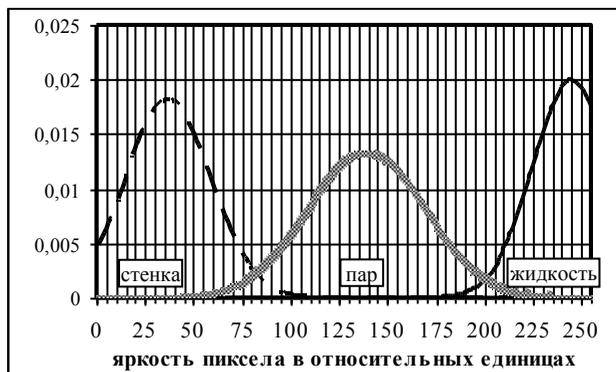


Рис. 7. Распределения различных областей фотографии по яркости

Задавшись доверительными интервалами для каждой из областей на рис.7, переходили к величинам яркости, начиная с которых пиксели считались принадлежащими выбранной области с известной доверительной вероятностью. Перейдя от значений яркости к размерам пикселей на цифровой фотографии, получали величины неопределенностей для границ “стенка-пар” и “пар-жидкость”. Для выбранного метода оценки неопределенностей межфазных границ посчитанные величины погрешностей измерения радиуса паровой пленки сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Погрешности определения радиусов паровой пленки

	$R_w = 2,4 \text{ мм} (D_w = 4,8 \text{ мм})$	$R_w = 3,0 \text{ мм} (D_w = 6,0 \text{ мм})$
$R_i$ , мм	2,54	3,20
$\Delta R_i$ , мм	0,06	0,07
$\delta R_i$ , %	2,2	2,3

Погрешности определения расстояний Н1 - Н3 (см. рис. 6) на изображениях с менисками He-II в капиллярах оценивались по схеме, описанной выше, и сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Погрешности определения расстояний на изображениях с капиллярами

Н1, мм	7,0	Н2, мм	8,0	Н3, мм	10,0
$\Delta H1$ , мм	0,5	$\Delta H1$ , мм	0,1	$\Delta H1$ , мм	0,1
$\delta H1$ , %	7	$\delta H1$ , %	1,3	$\delta H1$ , %	1

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований. Было проведено несколько независимых серий экспериментов.

- ✓ Изучение движения менисков He-II в капиллярах длиной 8 м и 8 см.
- ✓ Изучение движения менисков He-I в капиллярах длиной 8 м.

✓ Исследование межфазного теплового потока при пленочном кипении He-II на шаре диаметром 4,8 и 6,0 мм.

В экспериментах по движению менисков He-II в капилляре длиной 8 м выявлен следующий характер движения перемишки (см. рис.2):

1. В зависимости от температуры He-II, мениск в закрытом нагревателем колене 3 (рис.6) мог, как колебаться еще до подачи нагрузки на нагреватель, так и находиться в неподвижном состоянии.

2. После включения нагревателя мениск He-II в закрытом нагревателем колене 3 (рис.6) двигался к нагревателю.

3. Приблизившись к нагревателю на определенное расстояние, мениск либо оставался неподвижным, либо колебался около некоторого неизменного положения при продолжающейся подаче теплоты на нагреватель. Информация об наблюдаемых колебаниях дается на рис. 8.

4. После снятия нагрузки жидкий гелий в закрытом колене сначала поднимался к нагревателю и только потом опускался вниз. Подъем мениска He-II наблюдался для проведенных экспериментов вне зависимости от температуры ванны и величины подаваемой тепловой нагрузки. Такое поведение мениска позволяет предположить следующее. Само отключение тепловой нагрузки можно интерпретировать как происходящий во времени процесс понижения количества подводимой теплоты от заданной величины

до нуля. Следовательно, в ходе этого процесса теплота все время поступает к межфазной поверхности He-II, соответственно мениск в закрытом колене при длине перемычки He-II в восемь метров и диаметре капилляра в 250 мкм движется к нагревателю.

Рис. 8. Режимы движения менисков в системе на рис. 6: “●” – колебания есть, “○” – колебаний нет.

Зависимости положения мениска в открытом и закрытом коленах системы рис.6 при температуре  $T_b = 1,75$  К представлены на рис.9 и 10.

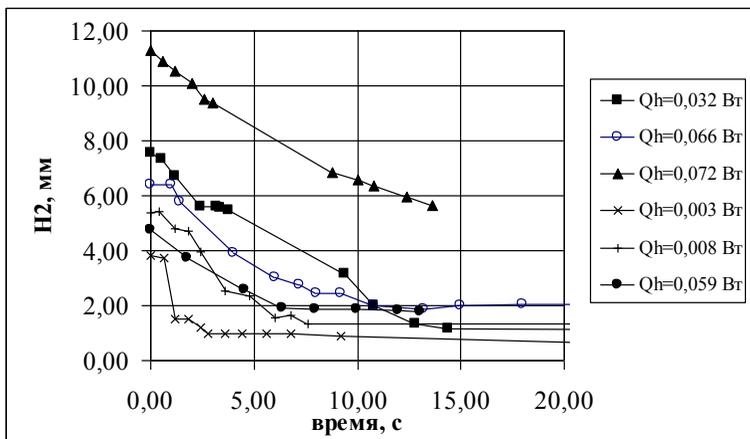


Рис. 9. Положение мениска в закрытом колене для различных величин мощности, выделенной на нагревателе. «0» секунда – включение нагревателя.

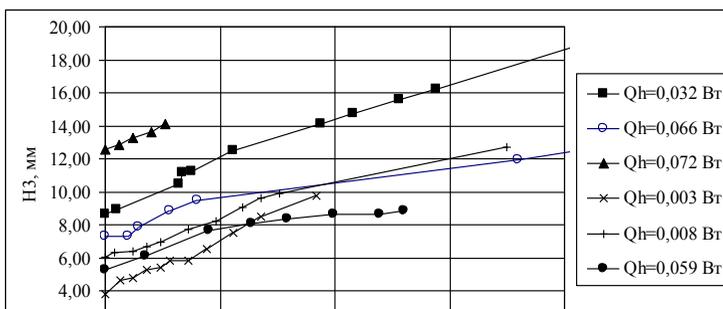


Рис. 10. Положение мениска в открытом колене для различных величин мощности, выделенной на нагревателе. «0» секунда – включение нагревателя.

Расчет по формулам (1)-(7) для режима движения межфазных поверхностей без колебаний предполагает переход от ламинарного к турбулентному режимам течения, как для сверхтекучего, так и для нормального движения во время подачи теплоты. Он позволил найти теоретическую зависимость положения мениска He-II в закрытом колене от времени (см. рис. 11).

Из рис. 11 видно, что в экспериментах в первом приближении наблюдается совпадение по времени движения переключки и по конечному значению  $H_2$  – расстоянию от нагревателя, на котором переключка останавливается. Таким образом, представленный анализ экспериментальных данных подтвердил результаты расчетов на основе двухскоростной гидродинамики He-II и применения методов молекулярно-кинетической теории для описания процессов переноса на межфазных поверхностях «He-II – пар».

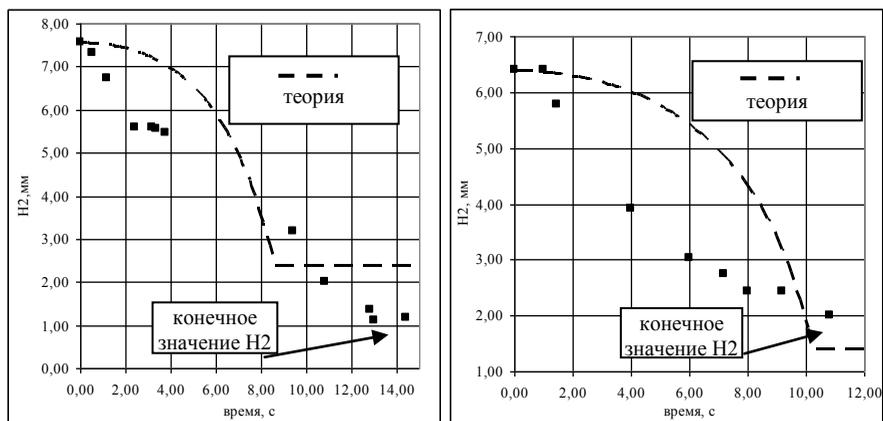


Рис. 11. Зависимость положения межфазной поверхности «He-II – пар»  $H_2$  от времени. «0» секунда – включение нагревателя.

Для выяснения природы возникновения эффекта движения мениска к нагревателю были проведены эксперименты с нормальным гелием (He-I). В этих экспериментах мениск He-I всегда уходил от нагревателя после включения тепловой нагрузки.

Полученные результаты позволили сделать вывод: наблюдаемый в широком диапазоне температур и межфазных тепловых потоков эффект движения мениска He-II к нагревателю в капилляре длиной 8 м является свойством He-II.

Этот факт подтверждают и результаты прежних исследований на жидком азоте в таком же капилляре<sup>3</sup>.

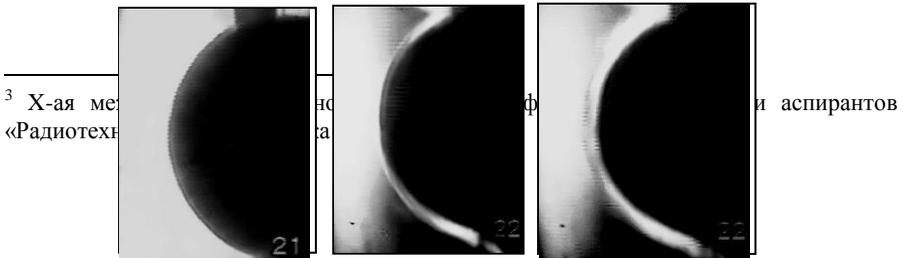
Чтобы изучить влияние длины капилляра на наблюдаемый эффект движения мениска He-II к нагревателю после его включения были проведены эксперименты по изучению поведения мениска He-II в капилляре существенно меньшей длины.

Эксперименты с такой же экспериментальной ячейкой, отличающейся лишь длиной капилляра – 8 см показали, что в том же диапазоне температур и тепловых нагрузок, что и для капилляра длиной 8 м, мениск He-II движется от нагревателя. Из сравнения результатов для капилляров длиной 8 м и 8 см (рис. ) видно, что в случае капилляра длиной 8 см мениск уходит от нагревателя. Поэтому можно сделать вывод, что движение менисков в системе, изображенной на рис.6, зависит от длины капилляра.

Различное поведение менисков в системах из двух сосудов, соединенных капиллярами одного диаметра  $d$ , но различной длины (8 м и 8 см), обусловлено тем, что при большой длине перемычки  $l$  и перепаде давлений, определяемом неравновесными эффектами на границах раздела фаз (см. (4) и (7)), скорость нормального движения невелика. Физическая причина этого эффекта состоит в том, что в отличие от обычных жидкостей значение теплового потока, переносимого по гелию II, зависит от скоростей нормального и сверхтекучего движений.

Основной задачей эксперимента с шаром было получение устойчивой паровой пленки. В результате были получены картины роста паровой пленки при постоянной температуре ванны и уменьшающейся глубине погружения. Согласно результатам теоретического анализа при неизменных температуре He-II и тепловом потоке с нагревателя при уменьшающейся глубине погружения толщина паровой пленки будет расти.

Результаты одного из таких экспериментов на шаре диаметром 6,0 мм представлены на рис. 12 а, б, в.



а) ( $\delta = 0,1$  мм)      б) ( $\delta = 0,2$  мм)      в) ( $\delta = 0,3$  мм)

Рис. 12. Увеличение толщины паровой пленки с уменьшением глубины погружения шарика под уровень Не-II при неизменных температуре Не-II и тепловом потоке с нагревателя

Средняя скорость изменения глубины погружения во время одного из экспериментов с шаром 6,0мм (рис.13) составляла 0,4 мм/сек. Таким образом, в течение десяти секунд глубина погружения изменялась на 4 мм, что составляет около 5 % первоначального значения. Каждый из опытных результатов, представленных на рис. 13, приведен для постоянной в пределах отмеченных выше 5% глубины погружения. Таким образом, на рис. 13 нанесены данные стационарных режимов при постоянной тепловой нагрузке. В течение эксперимента давление пара в криостате увеличивалось, поэтому росла и температура Не-II, которая представлена в виде “X” на рис. 13.

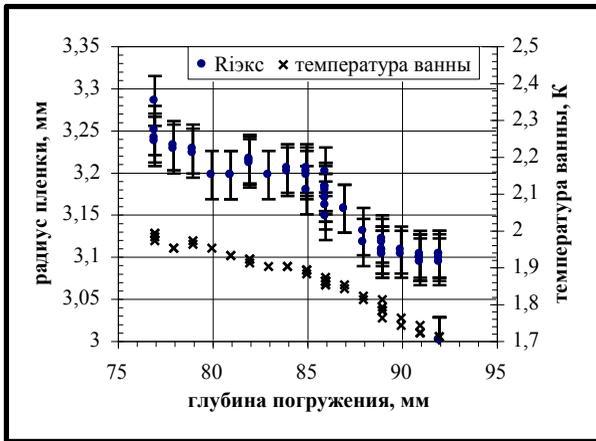


Рис. 13. Зависимость радиуса паровой пленки и температуры ванны от глубины погружения для шара диаметром 6,0 мм

Для сравнения полученных экспериментальных данных и предложенного метода расчета межфазного теплового потока введена функция их отношения.

$$f = \frac{q_i \text{ по формуле (8)}}{q_i \text{ по формуле (9)}}$$

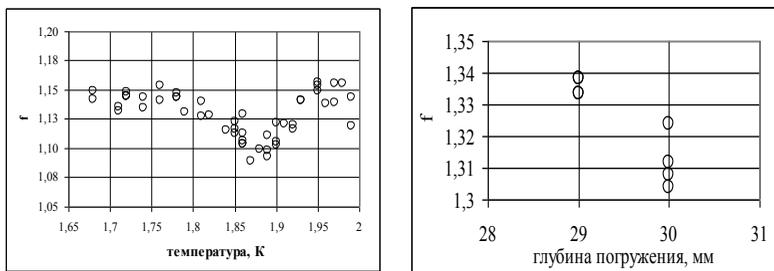


Рис. 14. Зависимость  $f$  от температуры для пленочного кипения на шаре диаметром 6,0 и 4,8 мм

Картины зарождения и эволюции паровой пленки на шаре диаметром 6,0 мм и шаре диаметре 4,8 мм представлены на рис. 15.

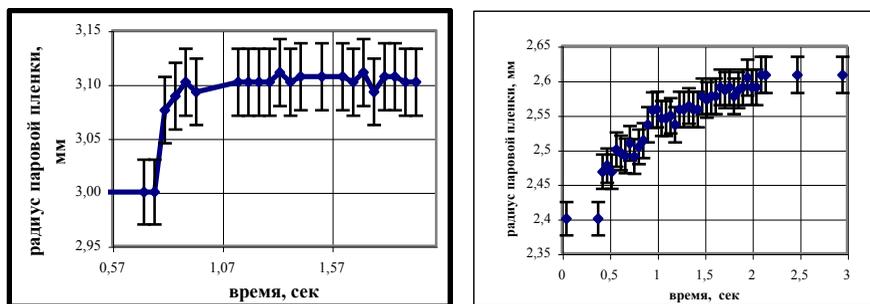


Рис. 15. Эволюция паровой пленки на шаре диаметром 6,0 и 4,8 мм.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, представленных в диссертации, можно сформулировать следующим образом:

1. Впервые проведены экспериментальные исследования движения перемычки He-II в капиллярах одного диаметра, но различной длины, в результате которого обнаружено, что характер движения перемычки зависит от ее длины.
2. Установлено, что в капилляре большой длины (8 метров) перемычка He-II движется к нагревателю после подачи теплоты на одну из межфазных границ

3. Установлено, что в зависимости от температуры и количества теплоты, поступившей в He-II, в капилляре длиной 8 м перемычка может колебаться как до, так и во время подачи теплоты.
4. Установлено, что в капилляре длиной 8 см перемычка He-II всегда движется от нагревателя после подачи теплоты на одну из межфазных поверхностей.
5. Разработан метод определения скорости движения перемычки He-II в капилляре длиной 8 метров после подачи теплоты на одну из межфазных границ.
6. Впервые проведены экспериментальные исследования плотности межфазного теплового потока при пленочном кипении He-II на шарах различного диаметра.
7. Разработан метод расчета плотности межфазного теплового потока при пленочном кипении на шаре, позволивший удовлетворительно описать экспериментальные данные по межфазному тепловому потоку в широком диапазоне температур He-II и глубин погружения.
8. Показано, что использование представленного метода расчета ведет к косвенному согласию с имеющимися экспериментальными данными по бесшумовому пленочному кипению на проволоках и на плоской поверхности.
9. Полученные результаты дополняют данные по двухскоростной гидродинамики He-II и пленочному кипению He-II на шаре и могут быть использованы на этапе проектирования современного криогенного оборудования.

### **Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:**

1. X-ая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиотехника, электротехника и энергетика» :

2. Ю.Ю. Селянинова, А.Ф. Медников, А.П. Крюков “Экспериментальное и теоретическое исследования кипения He II на поверхности шара” // XI-ая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиотехника, электротехника и энергетика» :

3. П.В. Королев, А.Ф. Медников, А.П. Крюков “Экспериментальное изучение движения He-II в капиллярах” // XV школа-семинар молодых ученых и специалистов по руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» // Труды школы-семинара. В 2-х т. – Калуга, 2005. Т.1. – С. 216 – 219.

4. П.В. Королев, А.Ф. Медников, А.П. Крюков “Экспериментальное исследование движения гелия II в капилляре при наличии паровой полости вблизи нагревателя” // Вестник МЭИ – М.: МЭИ, 2006. № 5.

5.А.П. Крюков, А.Ф. Медников «Экспериментальное исследование кипения He-II на шаре» // Прикладная механика и техническая физика – Н.,2006. № 6, т. 47, с. 78-84.

Подписано к печати

Печ. л.

Тираж

Заказ

-----  
-----  
Типография МЭИ, Красноказарменная, 13