

На правах рукописи

Королев Павел Викторович

ДВИЖЕНИЕ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ И ОБЫЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ  
В КАНАЛАХ С ПАРОМ ПРИ НАЛИЧИИ  
ОСЕВОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2004

Работа выполнена на кафедре низких температур Московского энергетического института (технического университета)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Крюков Алексей Павлович

Официальные оппоненты: – доктор физико-математических наук  
Немировский Сергей Карпович

– доктор технических наук  
Зейгарник Юрий Альбертович

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»

Защита состоится “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2004 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.157.04 при Московском энергетическом институте (техническом университете) по адресу: Москва, Красноказарменная, д. 14, корп. И, малый актовый зал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ (ТУ)

Отзывы на автореферат просим направлять по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, Ученый совет МЭИ (ТУ)

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2004 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.157.04  
к.ф.-м.н., доцент

В.И. Мика

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Исследование тепломассопереноса на межфазных поверхностях в условиях сильной термодинамической неравновесности является важной частью фундаментального направления теплофизики и гидродинамики, связанного с изучением процессов в двухфазных системах. Пленочное кипение сверхтекучего гелия представляет исключительный интерес. Величина термического сопротивления слоя гелия II при теплопереносе, как правило, незначительна, что дает возможность изучить влияние процессов, протекающих на межфазной поверхности, на теплообмен при кипении в целом, поскольку термическим сопротивлением жидкости в этом случае можно пренебречь.

При бесшумовом пленочном кипении паровая пленка имеет постоянные во времени очертания после достижения стационарного состояния, поэтому в этом случае легче формулируется математическое описание процессов тепломассопереноса в системе. Для обеспечения полной радиальной симметрии задачи необходимо избавиться от действия силы гравитации, искажающей форму паровой пленки и обуславливающей конвективные течения пара в пленке, что достижимо, если эксперименты проводятся в условиях невесомости.

Эксперименты по изучению теплообмена при кипении обычных и криогенных жидкостей в условиях невесомости требуют разработки соответствующей экспериментальной системы. Она должна содержать устройство, обеспечивающее удержание жидкости в экспериментальном объеме вблизи нагревателя и препятствующее ее вытеснению паром из экспериментальной ячейки. Предполагается, что выполнить эту функцию может капиллярно-пористое тело, ограничивающее экспериментальный объем.

Таким образом, возникает необходимость в проведении расчетных исследований поведения системы гелий II – пар в капиллярных структурах. На первом этапе представляется целесообразным рассмотреть идеализированную модель капиллярно-пористого тела, в которой все капилляры являются прямыми и не связанными друг с другом, что делает актуальными детальные исследования движения испаряющихся под воздействием теплового потока жидких гелиевых перемычек в одиночном капилляре.

Изучение процессов тепломассопереноса в двухфазных системах, находящихся внутри капиллярных структур, представляет интерес в связи с созданием новых эффективных теплоотводящих, термостатирующих и терморегулирующих устройств. Это делает особенно актуальной проблему совершенствования теоретических моделей процессов парообразования в капиллярах и пористых средах.

**Цель работы.** Главной целью настоящей работы является теоретическое и экспериментальное исследование движения испаряющейся под действием продольного теплового потока перемычки сверхтекучего гелия в круглом цилиндрическом капилляре при ламинарном режиме течения. Другая цель данной работы – решение вопросов, связанных с течением жидких металлов и обычных жидкостей в капиллярах, происходящем вследствие роста паровых пробок.

**Научная новизна.** Впервые получены аналитические решения задач о движении перемычек сверхтекучего гелия (в стационарной постановке) и обычных жидкостей (в нестационарной постановке) в капилляре, заполненном паром, при поступлении теплового потока на одну из поверхностей раздела фаз. При этом рассмотренные задачи имеют следующие особенности: исследуется эволюция паровых полостей при поступлении теплоты от твердой поверхности через пар к жидкости; изучено поведение двухфазных систем в капиллярах при наличии продольного теплового потока; при описании теплообмена между жидкостью и паром применяется молекулярно-кинетический метод, и таким образом, учитываются эффекты термодинамической неравновесности на границах раздела фаз.

Впервые проведены экспериментальные исследования поведения сверхтекучего гелия в капилляре диаметром сотни микрометров и длиной несколько метров при подводе теплоты к одной из межфазных поверхностей пар-He II.

**Практическая ценность.** Полученные результаты могут быть применены при: разработке теоретических моделей кипения сверхтекучего гелия внутри пористых структур; проектировании экспериментальной ячейки для изучения кипения He II в условиях невесомости; решении проблемы предотвращения нежелательного осушения каналов теплообменников, происходящего в аварийных ситуациях.

#### **Автор защищает**

- новую физическую и математическую модели процесса движения испаряющихся жидких перемычек обычных и квантовых жидкостей в капиллярах при поступлении теплоты из парового пространства, учитывающие неравновесные кинетические эффекты вблизи межфазных поверхностей.
- метод расчета названных процессов, пригодный для применения при проектировании экспериментальных установок для изучения кипения гелия II, других криогенных и обычных жидкостей в условиях невесомости, а также при решении задач об осушении каналов теплообменников.
- результаты экспериментов, в которых наблюдалось течение He II в капиллярах «большого» диаметра (т.е. при незаторможенном нормальном движении) к источнику теплоты.

**Апробация работы.** Основные результаты работы были доложены на II и III Российских национальных конференциях по теплообмену (Москва, 1998 г. и 2002 г.); VI и VIII международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2000 г. и 2002 г.); IV Минском Международном форуме по теплообмену (2000 г.); III международном форуме по физике низких температур в условиях микрогравитации (Россия, Черногоровка, 2002 г.).

**Публикации.** Материалы данной диссертационной работы изложены в 8 публикациях (в 6 статьях и 2 тезисах докладов).

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения и имеет объем 176 страниц, включая 42 рисунка и 1 таблицу. Библиография включает 58 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**В первой главе** диссертации представлен обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных: проблемам течения He II в капиллярах, сверхщелях, пористых структурах; росту паровых пробок в каналах, заполненных обычными жидкостями, при подводе теплоты; движению столбика (капли) жидкости в капиллярах различной геометрии под действием постоянных и переменных во времени сил в отсутствии тепловых потоков. Анализируется современное состояние рассматриваемых в диссертации вопросов.

В рассмотренных работах, посвященных He II, исследуются задачи отличные от исследуемых в диссертации: внимание уделяется проблеме удержания He II в криостате в условиях невесомости при отсутствии подвода теплоты. Поскольку изучается движение гелия II в капиллярных структурах при отсутствии подвода теплоты через межфазные поверхности, воспользоваться разработанными в данных работах моделями и полученными экспериментальными результатами невозможно. Аналогичная задача для обычных жидкостей также не исследована.

Обзор экспериментальных и теоретических работ, в которых исследуется влияние сил поверхностного натяжения на движение перемычек и капель обычных жидкостей и гелия II, показал, что в определенных случаях влиянием капиллярных сил можно пренебречь. Выяснено также, что проблемы физики явлений смачивания в условиях отклонения от термодинамического равновесия находятся на начальной стадии понимания. В итоге сделано заключение о том, что задачи о движении жидких перемычек при наличии теплового потока следует решать в предположении, что капиллярные силы почти полностью взаимно компенсируют друг друга, так что их результирующая значительно меньше сил вязкого трения.

**Во второй главе** предложена возможная конструкция экспериментальной ячейки для изучения процесса пленочного кипения He II в невесомости, одним из элементов которой является оболочка с прямыми радиальными не сообщающимися каналами постоянного поперечного сечения.

**В разделе 2.2.** сформулирована постановка задачи о стационарном движении перемычки гелия II при ламинарном режиме течения в капилляре, и получено ее решение.

**Постановка задачи.** Рассматривается цилиндрический капилляр диаметром  $d$  (см. рис. 1), в котором находится объем сверхтекучего гелия известной длины  $l$ . На левую межфазную поверхность подается тепловой поток, плотность которого обозначим как  $q$ . Боковая поверхность канала адиабатически изолирована. В непосредственной близости (в макроскопическом смысле) от правой границы раздела фаз поддерживается постоянное давление пара  $P_b$ . Принимается, что на стенках капилляра в заполненных паром областях (I) и (III) существует пленка He II, но поверхность нагревателя остается сухой. Теплота поступает от нагревателя

к пару и от него к жидкой перемычке. Толщина паровой пробки достаточно мала, чтобы обеспечить передачу теплоты при разумной величине температурного перепада. Принимается, что теплофизические свойства He II не зависят от температуры. Предполагается, что инерционными силами можно пренебречь и в любой момент времени жидкость движется стационарно со скоростью, соответствующей давлению, определенным на границах раздела фаз, и текущей длине перемычки. Кривизна межфазных поверхностей считается одинаковой, так что капиллярные силы, действующие на мениски, полностью взаимно компенсируются, и ими можно пренебречь. (Именно поэтому межфазные поверхности, реальная форма которых неизвестна, на рисунке 1 условно изображены в виде прямых пунктирных линий.) Требуется определить скорости движения нормальной компоненты и всей жидкости в целом.

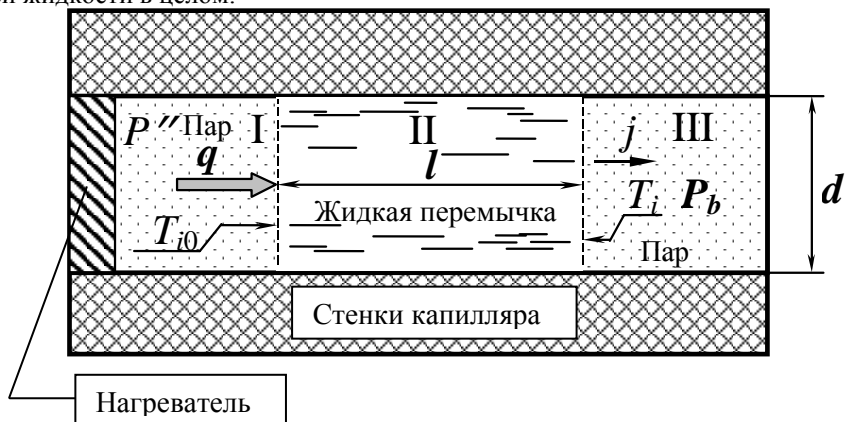


Рис. 1. Постановка задачи

Для данной задачи сформулировано математическое описание. Процессы тепломассопереноса на границах раздела фаз описываются с помощью универсальных и специальных условий совместности.

Универсальные условия совместности представляют собой запись законов сохранения массы, импульса, энергии на межфазных поверхностях.

Специальные условия совместности, описывающие особенности процессов переноса на границах раздела фаз, получены в результате решения стационарного кинетического уравнения Больцмана для задач испарения-конденсации<sup>1</sup>. Таким образом учитываются эффекты термодинамической неравновесности на межфазных поверхностях.

На правой межфазной поверхности специальные условия совместности для линеаризованной постановки имеют вид:

<sup>1</sup> Муратова Т.М., Лабунцов Д.А. Кинетический анализ процессов испарения и конденсации // Теплофизика высоких температур.– 1969.– Т. 7.– №5.– С. 959–967.

$$P_s(T_i) - P_b'' = \frac{3}{5} j \cdot \sqrt{2\pi RT_i}, \quad (1)$$

$$\frac{T_b'' - T_i}{T_i} = -0.45 \frac{j}{\rho_s''(T_i) \sqrt{2RT_i}}, \quad (2)$$

где  $R$  – индивидуальная газовая постоянная вещества,  $j$  – плотность потока массы,  $T_b''$  – температура пара вблизи межфазной поверхности (в области (III)),  $T_i$  – температура межфазной поверхности,  $P_b''$  – давление в паре,  $P_s(T_i)$  – давление насыщения, соответствующее температуре  $T_i$ ,  $\rho_s''(T_i)$  – плотность пара по линии насыщения при температуре  $T_i$ . Специальное условие совместности на левой границе для линеаризованной задачи записывается как:

$$q = \frac{4}{\sqrt{\pi}} (P'' - P_s(T_{i0})) \sqrt{2RT_{i0}}, \quad (3)$$

где  $q$  – плотность теплового потока,  $P_s(T_{i0})$  – давление насыщения, соответствующее температуре левой поверхности раздела фаз  $T_{i0}$ .

Это соотношение записано для случая, когда поток массы через межфазную поверхность равен нулю. Справедливость этого положения показана при решении нестационарной кинетической задачи в постановке аналогичной рассматриваемой.

Для определения плотности теплового потока в сверхтекучем гелии служит соотношение

$$q = \rho' S T (V_n - V'), \quad (4)$$

полученное из уравнения для плотности потока энергии в сверхтекучем гелии. Здесь  $\rho'$  – плотность сверхтекучего гелия, где  $S$  – энтропия сверхтекучего гелия,  $V'$  – скорость движения жидкости в лабораторной системе координат,  $V_n$  – скорость нормальной компоненты He II.

В случае, когда длина столбика сверхтекучей жидкости  $l$  принимается постоянной, и нормальное движение является ламинарным, выведена формула для скорости равномерного движения перемычки гелия II в капилляре. Анализ этой формулы показал, что направление движения гелиевой перемычки в капилляре должно зависеть от ее длины, и при некоторой длине

$$L_0 = \frac{\left(0.6 + \frac{\Lambda}{8RT}\right)}{\left(1 - \frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \cdot \frac{\Lambda}{ST}\right)} \cdot \frac{ST}{\Lambda} \cdot \frac{d^2 \rho' \sqrt{2\pi RT_i}}{32\eta}, \quad (5)$$

скорость сверхтекучего гелия будет равна нулю. Здесь  $\Lambda$  – удельная теплота парообразования. При  $l > L_0$  гелиевая перемишка 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 HeII постоянно существует пленка пара, хотя бы малой 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.

Таким образом, расчетные исследования показывают, что движение гелиевой перемишки в капилляре вовсе не обязательно должно быть направлено от нагревателя. Возможны ситуации, когда направление движения будет противоположным. Такое поведение гелия может быть объяснено в рамках двухскоростной модели. При некоторых параметрах приток сверхтекучей компоненты к нагревателю может быть больше, чем отток нормальной, поскольку нормальная компонента имеет вязкость, а сверхтекучая движется без трения. В итоге перемишка длиной  $L_0$  в капилляре диаметром  $d$  может пребывать в состоянии покоя даже при наличии теплового потока.

**В разделе 2.3.** решена задача о теплопереносе в паровой полости переменного размера и таким образом показано, что квазистационарное приближение в задаче о движении перемишки He II допустимо.

**Постановка задачи.** Теплоперенос в области (I) исследуется в одномерной постановке: принимается, что теплота распространяется вдоль оси капилляра, при этом начало координат совпадает с поверхностью нагревателя. Делается допущение о том, что теплота в паре передается исключительно за счет теплопроводности. Кроме того, учитывается, что коэффициент теплопроводности и плотность пара зависят от температуры.

При таких допущениях уравнение теплопереноса в паре, граничные и начальные условия имеют вид:

$$\rho''(T) \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (6)$$

$$-\lambda(T(0)) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_w \quad \text{при } z = 0, \quad T = T_{i0} \quad \text{при } z = z_{i0}(t),$$

$$T(z) = T_0 \quad \text{при } t = 0 \quad (7)$$



где  $T_0$  – температура пара в момент времени  $t = 0$ , совпадающая с температурой поверхности раздела фаз пар-жидкость,  $\lambda$  – теплопроводность пара,  $z_{i0}(t)$  – координата левой межфазной поверхности жидкой перемычки (правой границы паровой полости), зависящая от времени.

Полученное уравнение решается численно, при этом трудности решения задачи, связанные с наличием подвижной границы, положение которой неизвестно и меняется с течением времени, преодолеваются за счет использования метода динамической адаптации<sup>2</sup>. Для левого граничного условия используется аппроксимация производной шестого порядка.

Квазистационарное движение перемычки рассматривается как непрерывную последовательность стационарных состояний, в каждом из которых плотность теплового потока имеет определенное значение.

В результате решения получены зависимости скорости  $V$ , ускорения  $dV/dt$ , координаты левой межфазной поверхности перемычки  $z_{i0}$ , перемычки, плотности теплового потока  $q_{i0}$  от времени. На рис. 2 представлены эти зависимости, рассчитанные для следующих наборов исходных данных: 1 –  $d = 50$  мкм,  $q_w = 800$  Вт/м<sup>2</sup>,  $L = 80$  см,  $L_0 = 14.3$  см,  $z_0 = 1$  см; 2 –  $d = 100$  мкм,  $q_w = 1000$  Вт/м<sup>2</sup>,  $L = 20$  см,  $L_0 = 57.0$  см,  $z_0 = 1$  см; 3 –  $d = 100$  мкм,  $q_w = 500$  Вт/м<sup>2</sup>,  $L = 5$  см,  $L_0 = 57.0$  см,  $z_0 = 1$  см; 4 –  $d = 100$  мкм,  $q_w = 1000$  Вт/м<sup>2</sup>,  $L = 5$  см,  $L_0 = 57.0$  см,  $z_0 = 0.5$  см; 5 –  $d = 250$  мкм,  $q_w = 1000$  Вт/м<sup>2</sup>,  $L = 20$  см,  $L_0 = 356.5$  см,  $z_0 = 1$  см.

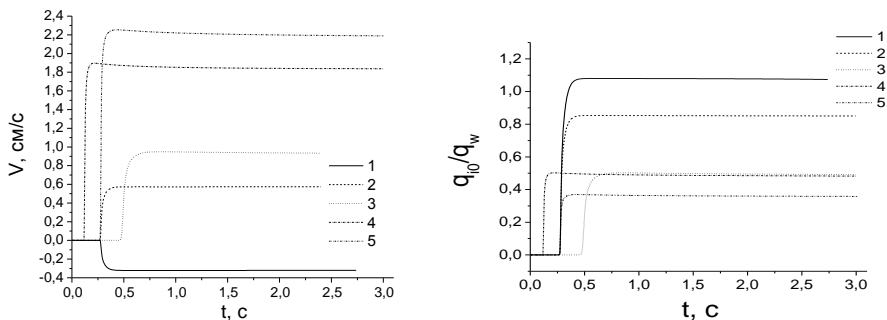


Рис. 2. Результаты решения сопряженной задачи

Из рассмотрения графиков на рис. 2 можно заключить, что время выхода на стационарный режим течения составляет десятые доли секунды. Скорости движения на квазистационарном этапе уменьшаются очень слабо. Ее абсолютная величина тем выше, чем сильнее длина перемычки отличается от «критической длины»  $L_0$ , чем больше тепловая нагрузка и диаметр капилляра.

<sup>2</sup> Мажукин В.И., Такоева Л.Ю. Принципы построения динамически адаптирующихся к решению сеток в одномерных краевых задачах // Математическое моделирование. – 1990. – Т. 2. – №3. – С. 101–118.

Проведены расчеты зависимости массы пара в полости (I) от времени. Масса пара в полости вычислялась как произведение объема на среднеинтегральную плотность пара (зависящую только от продольной координаты). Результаты представлены на рис. 3.

Кроме того, следует отметить, что в реальной системе выход на квазистационарный режим движения продлится несколько больше и рост ускорения, возможно, будет не столь уж резким, поскольку мгновенная скорость, соответствующая тепловому потоку, будет достигаться с некоторым запаздыванием равным времени, за которое волна второго звука проходит по всей длине перемычки.

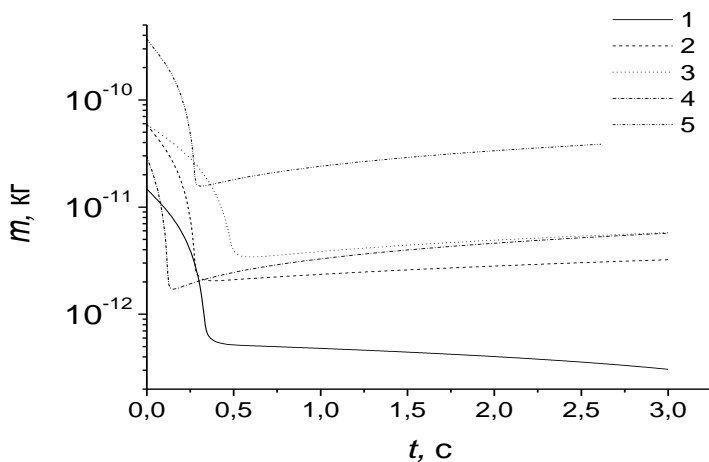


Рис. 3. Изменение массы пара в полости (I)

На рис. 3 показано изменение массы пара в полости (I) при движении перемычек. После подачи тепловой нагрузки масса пара в течение десятых долей секунды резко уменьшается. Таким образом, в начальный момент происходит не испарение, а конденсация. Давление в полости определяется плотностью теплового потока на границе пар-жидкость и температурой этой границы.

Представленные графики параметров процессов, происходящих в рассматриваемой системе, имеют вид характерный для зависимостей этих величин и при других исходных параметрах. Следовательно, допущения положенные в основу квазистационарной модели справедливы.

**В разделе 2.4.** подход, предложенный для одиночного капилляра, был применен для системы, состоящей из двух сосудов, соединенных капилляром.

Рассматривается заполненная гелием II система, состоящая из двух сосудов, соединенных капилляром. В верхней части левого сосуда находится нагреватель. Этот сосуд герметично закупорен. Между нагревателем и жидким гелием существует пленка пара. Левый сосуд и боковая поверхность капилляра адиабатически

изолированы. Тепловой поток  $q$  поступает от нагревателя к межфазной поверхности через пленку пара. В правом сосуде давление пара  $P_b''$  поддерживается постоянным. Исследуется поведение сверхтекучего гелия в этой системе. Получено выражение для средней по сечению скорости течения гелия II в капилляре, соединяющем сосуды. Найдена разность высот  $\Delta h = h_1 - h_2$ , при которой скорость сверхтекучего гелия становится равной нулю:

$$\Delta h = \frac{q}{\rho' g} \left[ \left( 1 - \frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \frac{\Lambda}{ST} \right) \frac{32\eta l}{\rho' ST d^2} \left( \frac{D_0}{d} \right)^2 - 0.6 \frac{\sqrt{2\pi RT_i}}{\Lambda} \left( \frac{D_0}{D} \right)^2 - \frac{\sqrt{\pi}}{4 \cdot \sqrt{2RT_{i0}}} \right]. \quad (8)$$

Величина  $\Delta h$  становится нулевой при длине  $L_{01}$ , равной

$$L_{01} = \frac{d^2 \rho' \sqrt{2\pi RT_i}}{32\eta \cdot \left( 1 - \frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \frac{\Lambda}{ST} \right)} \frac{ST}{\Lambda} \left( 0.6 \left( \frac{d}{D} \right)^2 + \frac{\Lambda}{8RT} \left( \frac{d}{D_0} \right)^2 \right). \quad (9)$$

Таким образом, в рассматриваемой системе при подаче тепловой нагрузки может происходить течение гелия в направлении источника тепла или же в противоположном направлении, завершающееся достижением состояния с соответствующей разностью уровней гелия в сосудах. Направление течения будет зависеть от длины капилляра, подобно тому, как оно зависело от длины перемычки в случае одиночного капилляра с паром. При  $D = D_0 = d$ , т.е. в том случае, когда система с двумя сосудами заменяется U – образным капилляром, формула (9) переходит в (5) и  $L_{01}$  становится равной  $L_0$ . Если же диаметр капилляра стремится к нулю (или  $d \ll D_0$ ,  $d \ll D$ ), то стремится к нулю и длина  $L_{01}$ . Это означает, что длина капилляра в этом случае всегда будет превосходить  $L_{01}$  и, следовательно, гелий должен течь в сосуд с нагревателем при любой длине капилляра. Такое поведение гелия II согласуется с экспериментами П.Л. Капицы, в которых был обнаружен термомеханический эффект<sup>3</sup>. Хорошо известно, что этот эффект наблюдается именно при малых диаметрах капилляров (0.1– 1 мкм). Таким образом, показано, что течение гелия, заполняющего капилляр определенного диаметра и длины, в сосуд с нагревателем, отделенным от жидкого гелия пленкой пара, представляет собой аналог течения гелия через сверхщель в сосуд с погруженным в него нагревателем. Отличие состоит лишь в том, что в капилляре, диаметр которого превосходит диаметр сверхщели, при его длине меньшей, чем  $L_{01}$ , гелий будет течь в сосуд с более низкой температурой, в то время как в сверхщели течение всегда направлено в объем с гелием, имеющим более высокую температуру.

Получена зависимость  $\Delta h$  от  $\Delta T$ :

<sup>3</sup> Капица П.Л. Эксперимент, теория, практика. Статьи, выступления. – М.: Наука, 1981. – 495 с.

$$g\Delta h = S\Delta T \left( 1 - \frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \frac{\Lambda}{ST} \right) \cdot \left( 1 - \frac{L_{01}}{l} \right), \quad (10)$$

аналогичная известной зависимости для термомеханического эффекта, но в отличие от нее учитывающая процессы теплопереноса на межфазных поверхностях перемычки и влияние геометрических параметров системы.

**В третьей главе** описываются экспериментальные исследования движения сверхтекучего гелия в капилляре с паром, проведенные автором совместно с А.Ф. Медниковым.

**В разделе 3.1.** описывается устройство экспериментального стенда, рассказывается о его подсистемах и о проблемах, возникших при их проектировании. Экспериментальная установка состояла из экспериментальной ячейки, системы криостатирования, предназначенной для создания и поддержания рабочего режима в экспериментальной ячейке, системы вакуумирования и оптической системы.

Криостат, позволяющий обеспечить необходимый уровень температур ниже 2.17 К, представлял собой стеклянную гелиевую пару, состоящую из двух сосудов Дьюара разных диаметров: внутреннего гелиевого и внешнего азотного. Гелиевый сосуд имел внутренний диаметр 55 мм и был герметичным. Оба сосуда Дьюара имели смотровые щели шириной 20 мм и были установлены так, что эти щели совпадали. Это давало возможность проводить визуальное наблюдение и видеосъемку экспериментальной ячейки, находившейся во внутреннем сосуде на просвет.

Внутренний сосуд был соединен с линией откачки, ведущей к механическому вакуумному насосу НВЗ-20. При помощи насоса производилась откачка воздуха из сосуда перед заливкой жидкого гелия и вакуумирование парового пространства над поверхностью жидкости с целью понижения ее температуры для осуществления перехода в сверхтекучее состояние. Давление во внутреннем сосуде контролировалось с помощью присоединенного к нему ртутного чашечного манометра.

Схема экспериментальной ячейки представлена на рис. 4. В экспериментальной ячейке использовался капилляр диаметром 250 мкм. Его наружный диаметр равнялся 1.5875 мм. Для удобства наблюдений к концам этого капилляра были присоединены отрезки трубки из того же материала внутренним диаметром 1 мм. Длина открытой трубочки составляла 2.5 см, закрытой – 3.5 см. Канал диаметром 1 мм для сверхтекучего гелия уже не является капилляром. Таким образом, получилась система, состоящая из двух сосудов «большого» объема, соединенных капилляром. Длина капилляра составляла 8 м. (Величина  $\Delta h$  при  $T = 2$  К и плотности теплового потока равной, например,  $30 \text{ Вт/м}^2$  должна для такой системы должна равняться приблизительно 6.6 мм.) Капилляр был намотан на катушку диаметром 30 мм и высотой 30 мм, сделанную из фторопласта. Нагреватель представлял собой проволочку из нихрома диаметром 50 мкм и длиной 50 мм, свернутую в петлю и скрученную в спираль.

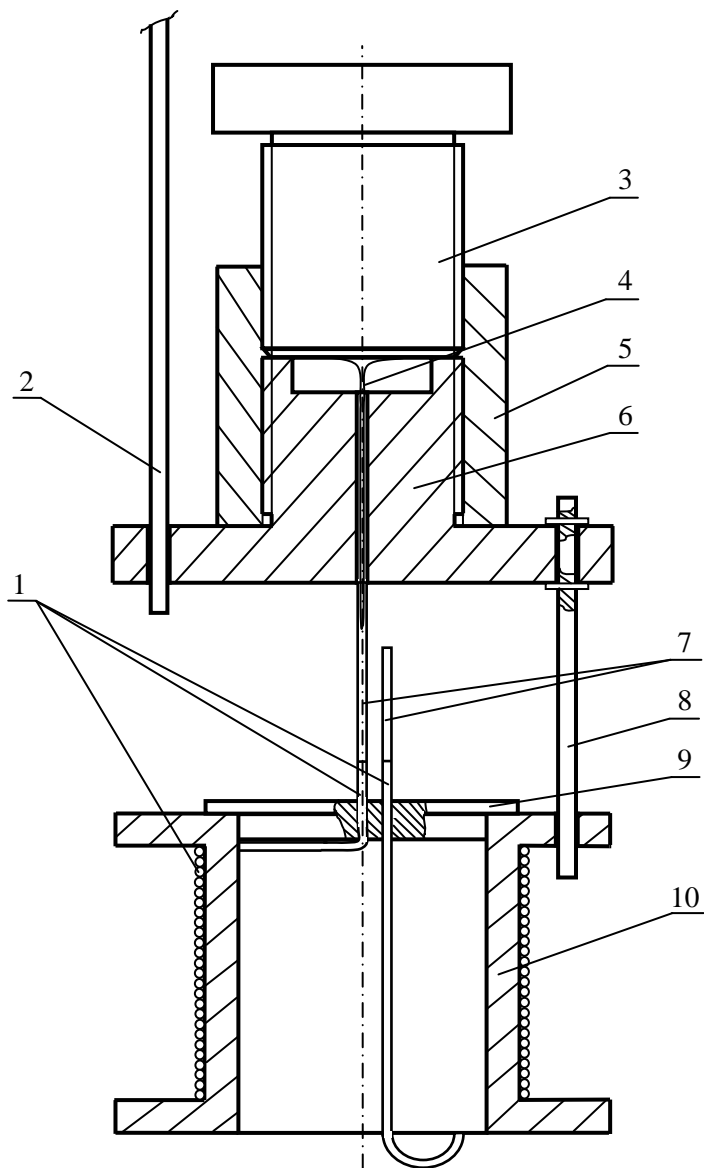


Рис. 4. Схема экспериментальной ячейки: 1 – капилляр, 2 – подвес, 3 – верхний цилиндр, 4 – нагреватель, 5 – втулка, 6 – нижний цилиндр, 7 – капиллярные трубки большего внутреннего диаметра, 8 – штырь, 9 – крышка, 10 – катушка

Собранная таким образом экспериментальная ячейка прикреплена 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 капилляр сверхтекучим гелием, а затем выводить открытый его конец в паровое пространство. Подвес крепился к кронштейну, соединенному с рамой, на которой была смонтирована оптическая система. Таким образом, ячейка и оптическая система двигались синхронно, так что концы капилляра всегда оставались в поле зрения микроскопа. Полный тепловой поток со всей поверхности нагревателя определялся по падению напряжения на образцовом сопротивлении и току через нагреватель.

Оптическая система состояла из микроскопа МБС-10, видеокамеры, источника света. Источник света располагался перед одной из смотровых щелей в стенке сосуда. Микроскоп с присоединенной к нему видеокамерой был подвешен у противоположной щели. Свет, освещающий экспериментальную ячейку, попадал внутрь сосуда с гелием через щели в стенках сосудов. Освещенные концы капилляра, находились в фокальной плоскости микроскопа, который был присоединен к объективу видеокамеры. Внутри прозрачного капилляра в проходящем свете ламп были видны поверхности раздела фаз и, таким образом, производилась видеосъемка движения межфазных поверхностей.

**В разделе 3.2.** определяется максимальная допустимая тепловая нагрузка. Вначале находилась максимальная тепловая нагрузка, при которой течение нормальной компоненты остается ламинарным. Для этого была вычислена критическая скорость нормального движения, для капилляра диаметром 250 мкм оказавшаяся равной 4.7 см/с. В предположении, что в гелиевой переемычке определенно реализуется противоток компонент, была найдена критическая тепловая нагрузка –  $1.3 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>. Затем была определена критическая нагрузка для сверхтекучего движения –  $5.44 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>. После этого установлены границы применимости линейных кинетических соотношений. В итоге максимальной допустимой тепловой нагрузкой считалась критическая для сверхтекучего движения.

**В разделе 3.3.** описывается методика проведения экспериментов. Движение жидкого гелия отслеживалось путем наблюдений за поведением межфазных поверхностей в закрытом (с нагревателем) и открытом вертикальных коленах капилляра. Концы капилляра находились в фокальной плоскости микроскопа, и все протекавшие в них процессы снимались видеокамерой, сопряженной с микроскопом. С помощью видеоманитофона изображение записывалось на магнитную ленту и выводилось на экран, что позволяло легко видеть происходившие в капилляре перемещения межфазных поверхностей и парообразование.

**В разделе 3.4.** приводится описание одного из экспериментов со сверхтекучим гелием, его результаты и их анализ.

В эксперименте ячейка погружалась в гелий II, затем происходил процесс заполнения капилляра. Весь содержащийся в капилляре пар конденсировался при заполнении его жидкостью, и под действием внешнего давления сверхтекучий

гелий поднимается до нагревателя. Паровая полость вблизи нагревателя создавалась путем подачи тепловой нагрузки равной пиковой.

При плотности теплового потока  $3.836 \text{ Вт/см}^2$  около нагревателя возникла паровая полость, и межфазная поверхность He II-пар стала двигаться вниз. После того как межфазная поверхность в капиллярной трубке опустилась на некоторую величину, нагреватель был выключен. Вслед за этим произошло поднятие межфазной поверхности вверх, однако, она не достигла нагревателя, и, таким образом, паровая полость между жидким гелием и нагревателем не исчезла. Уровни гелия в коленах практически выровнялись. При включении нагрузки прежней величины (т.е. как минимум равной пиковой) межфазная поверхность в закрытом колене двинулась вверх к нагревателю и, поднявшись на некоторую величину, остановилась. В то же самое время межфазная поверхность в другом колене опустилась вниз.

Во время каждого эксперимента проводилось от 10 до 20 погружений и поднятий экспериментальной ячейки. В большинстве случаев после выполнения описанных выше операций удавалось добиться образования паровой полости и выравнивания уровней сверхтекучего гелия. При подаче тепловой нагрузки происходило движение перемычки гелия II к нагревателю.

На рис. 5 представлены кадры видеозаписи, снятые во время одного из включений нагревателя. Легко увидеть, что начальное и конечное положения межфазной поверхности существенно отличаются. Сопоставив эти кадры, можно убедиться, что межфазная поверхность приблизилась к нагревателю на заметную величину. Измерив положения поверхности на кадрах а) и б), и соотнеся разность этих величин с измеренным здесь же внешним диаметром нагревателя, можно найти действительную высоту подъема гелия II в закрытом колене, поскольку истинный диаметр капилляра известен (1.5875 мм).



Рис. 5. Начальное и конечное положения межфазной поверхности

**В разделе 3.5.** описаны эксперименты с жидким азотом, приведены и проанализированы их результаты.

Эксперименты с жидким азотом проводились, для того чтобы сравнить поведение сверхтекучего гелия и обычной жидкости в аналогичных условиях.

При подаче тепловой нагрузки возникала паровая полость, и межфазная поверхность в капиллярной трубочке начинала двигаться вниз (от нагревателя). Движение поверхности раздела фаз было не равномерным, а ускоренным. Средняя скорость движения составляла 1.5 – 5.5 мм/с. Такое поведение жидкой азотной перемычки наблюдалось в экспериментах неоднократно. Жидкая перемычка двигалась от нагревателя и тогда, когда открытый конец капилляра находился в жидкости на глубине несколько сантиметров. Дополнительное гидростатическое давление не могло воспрепятствовать вытеканию азота из капилляра.

На рис. 6 представлены снятые с интервалом в 1 с кадры видеозаписи, иллюстрирующие поведение жидкой азотной перемычки в одном из случаев. Из рассмотрения снимков а) – в) видно, что жидкий азот в правом (закрытом) колене движется вниз, т.е. от нагревателя, и паровая полость увеличивается. При этом граница раздела фаз в течение каждой секунды проходит все большее расстояние, следовательно, движение ускоренное.

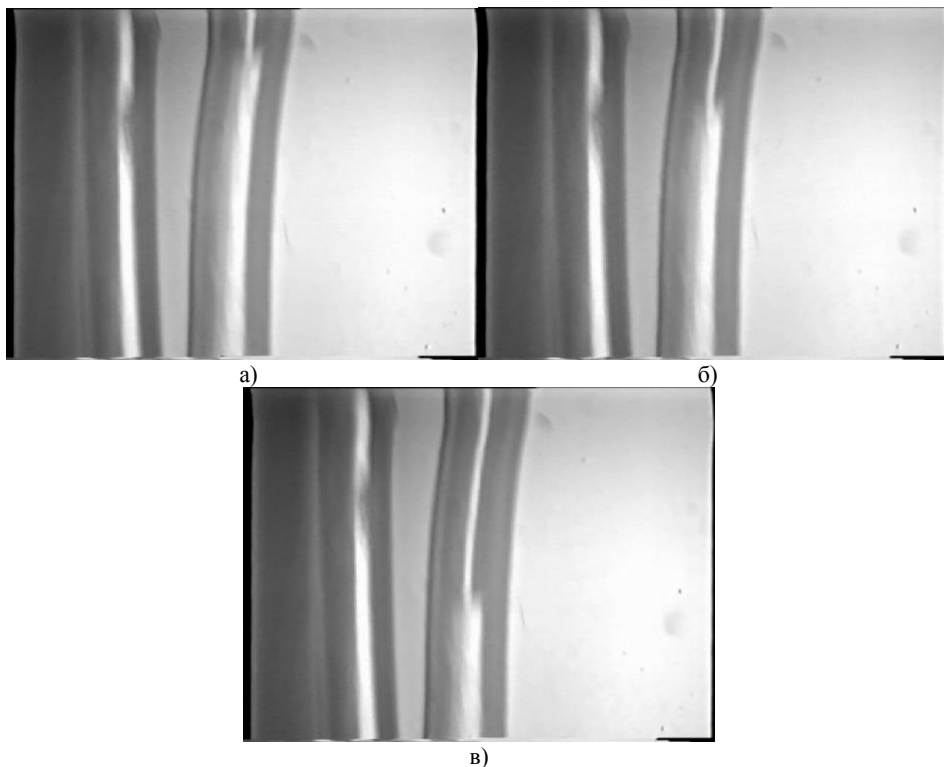


Рис. 6. Движение жидкой азотной перемычки в капилляре



Таким образом было зафиксировано, что поведение жидкого азота и сверхтекучего гелия кардинально отличаются. При включенном нагревателе жидкие перемишки этих веществ двигались в противоположных направлениях. В опытах со сверхтекучим гелием перемишка двигалась к герметично закупоренному концу капилляра, в котором находился работающий нагреватель. Азотная перемишка двигалась от нагревателя, даже в тех случаях, когда имелось дополнительное давление, препятствующее этому. Эти факты позволяют утверждать, что движение гелиевой перемишки к закрытому концу капилляра возникает именно в результате работы нагревателя, а не из-за каких-нибудь других причин. Можно считать доказанным, что такой характер движения – следствие действия механизма, аналогичного тому, который является причиной термомеханического эффекта в сверхтекучих. Таким образом, обнаруженный расчетным путем эффект получил свое экспериментальное подтверждение.

**В четвертой главе** решена в нестационарной постановке задача о движении перемишек обыкновенных жидкостей в капиллярах при подаче продольного теплового потока.

**Постановка задачи.** Исследуется проблема движения столбика обыкновенной жидкости в круглом цилиндрическом капилляре, заполненном паром, при подаче теплового потока на одну из поверхностей раздела фаз пар-жидкость.

В капилляре диаметром  $d$  (радиусом  $a$ ) (см. рис. 1.) находится объем жидкости известной начальной длины  $L$  (текущая длина  $l$ ). В момент времени  $t = 0$  на левую межфазную поверхность подается постоянный тепловой поток, плотностью  $q$ . Боковая поверхность канала адиабатически изолирована. Начальная температура всей системы  $T_0$  задана, температура пара  $T_b''$  в области (III) поддерживается постоянной и равной  $T_0$ . Требуется получить зависимости скорости движения жидкой перемишки, ее длины, температур межфазных поверхностей и потока теплоты, приходящего на «холодную» поверхность от времени.

**В разделе 4.2.** сформулировано математическое описание задачи. Задача рассматривается в одномерном приближении, т.е. отличной от нуля считается лишь осевая компонента скорости  $V_z$ . Плотность жидкости считается постоянной. Объемные силы отсутствуют. В цилиндрических координатах записываются уравнения неразрывности и Навье – Стокса, а также уравнение энергии с не зависящим от температуры коэффициентом теплопроводности.

**В разделе 4.3.** получено решение уравнения энергии. Путем перехода в собственную систему координат, связанную с движущимся столбиком жидкости, уравнение энергии сводится к нестационарному уравнению теплопроводности. Из специальных условий совместности на «холодной» межфазной поверхности получено формальное соотношение для коэффициента теплоотдачи и сформулированы граничные условия. В известной монографии Г. Карслоу и Д. Егера «Теплопроводность твердых тел» (М.: «Наука». 1964г.) найдено решение уравнения теплопроводности при таких же граничных и начальных условиях. В качестве примера произведен расчет зависимостей температуры жидкости от времени по имеющейся в наличии формуле.

**В разделе 4.4.** решено уравнение движения и получена формула для определения скорости движения жидкой перемычки, учитывающая изменение перепада температуры по длине перемычки вследствие нагрева жидкости:

$$\bar{V}(\tau) = \frac{d^2}{\eta L} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp(-\beta_n^2 \tau)}{\beta_n^2} \int_0^{\tau} \frac{\exp(+\beta_n^2 \theta) \cdot \Delta P(T_i(\theta), T_{i0}(\theta), q_i(\theta))}{\left(1 - \frac{d^2}{4\eta L_0} \int \frac{q_i(s)}{\Lambda[T_i(s)]} ds\right)} d\theta \quad (11)$$

Время достижения квазистационарного режима течения различно для калия и натрия и зависит от величины плотности теплового потока  $q$ . При увеличении тепловой нагрузки величины скоростей на квазистационарном этапе возрастают. На рис. 7 приведены для сравнения зависимости от времени скорости течения натрия, рассчитанные по формуле (11) и по соотношению Пуазейля, описывающему стационарное ламинарное течение, с подстановкой в него переменной разности давлений.

Видно, что зависимость, полученная по формуле Пуазейля, не сильно отличается от кривой, рассчитанной по формуле (11), а по истечении сотен секунд практически сливается с ней. При других исходных параметрах это время также составляет сотни секунд. Таким образом, использование формулы для стационарного течения с переменным перепадом давления и постоянной длиной столбика жидкости все-таки позволяет неплохо описать нестационарное течение и оценить время достижения квазистационарного режима движения перемычки. Следовательно, полученное полуаналитическое решение доказывает пригодность формулы Пуазейля для подобных расчетов.

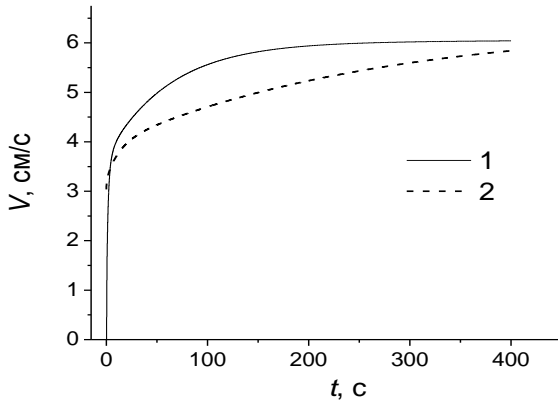


Рис. 7. Скорость течения жидкого натрия при  $T_0 = 650 \text{ К}$ ,  $q = 2500 \text{ Вт/м}^2$ ,  $d = 3 \text{ мм}$ ,  $L = 5 \text{ см}$ ,  
1 – расчет по формуле (11); 2 – расчет по формуле Пуазейля

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Получено аналитическое решение задачи о движении испаряющегося столбика сверхтекучего гелия в капилляре при наличии продольного теплового потока.

Анализ решения позволяет заключить, что гелиевая перемычка может двигаться как в прямом, так и в обратном направлении. Если длина столба меньше «критической»  $L_0$ , для определения которой получена аналитическая формула, перемычка He II должна, как предполагается, двигаться от нагревателя, а при длине столба большей, чем  $L_0$  – в противоположном направлении.

Расчетным путем было установлено, что эффект, аналогичный предсказанному для одиночного капилляра, возможен и в системе, состоящей из двух сосудов, соединенных капилляром, и нагревателя в верхней части одного из них. В результате обобщения предлагаемого в настоящей работе подхода для этой системы получена формула, из которой следует, что при очень малом (формально стремящемся к нулю) диаметре капилляра «критическая длина» для системы сосудов очень мала по сравнению с подобной длиной для одиночного капилляра. Поэтому, даже при очень небольшой длине капилляра сверхтекучий гелий должен течь в сосуд с нагревателем. Этот предельный случай, по всей видимости, соответствует хорошо известному явлению, называемому «эффектом фонтанирования». В одиночном же капилляре течение сверхтекучего гелия к нагревателю должно наблюдаться только при значительной длине гелиевой перемычки (большей, чем критическая длина).

Получены экспериментальные доказательства того, что течение гелия II к источнику теплоты может происходить не только в сверхщелях с характерным размером  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  м, но и в капиллярах диаметром в сотни микрометров притом даже тогда, когда между нагревателем и He II существует паровая пробка.

Эксперименты доказывают, что отличие обнаруженного эффекта от хорошо изученного «эффекта фонтанирования» состоит в том, что гелий II в сверхщели движется к источнику теплоты практически при любой длине сверхщели, в то время как в капиллярах большого диаметра при наличии паровой пробки такое течение He II возможно только в том случае, если длина гелиевой перемычки превышает некоторую «критическую» величину. В противном случае гелий будет течь в объем, имеющий более низкую температуру.

Проведенные исследования показали, что капиллярная структура может удерживать гелий II в некотором объеме при наличии в нем растущей паровой полости и обеспечить необходимый перепад давлений между гелием в объеме и внешней средой.

Показано, что нестационарное движение испаряющихся перемычек обычных жидкостей в капиллярах для случая, когда капиллярные силы малы по сравнению с силами вязкого трения, может быть описано с помощью полученных аналитических формул. Предлагаемый в данной работе подход делает возможным

проведение относительно простых расчетов времени осушения капиллярных каналов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 02-02-16311 и Гранта Президента Российской Федерации по поддержке ведущих научных школ НШ-1517.2003.8.

## **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

1. Хуртин П.В., Крюков А.П. Некоторые модели теплопереноса при пленочном кипении сверхтекучего гелия вблизи  $\lambda$ -точки в невесомости // *Journal of Low Temperature Physics.*– 2000.– Vol. 119. – Nos.3/4. – С. 413–420. (на англ. яз.)
2. Крюков А.П., Хуртин П.В. Описание тепло- и массопереноса при кипении сверхтекучего гелия в невесомости внутри капиллярно-пористого тела // *Теплообмен в двухфазных системах: Труды IV Минского Международного форума.*– Минск, 2000.– Т. 5.– С. 499–503.
3. Королев П.В., Крюков А.П. Нестационарное движение высокотеплопроводной жидкости в капилляре, заполненном паром, при наличии продольного теплового потока // *Теплофизика высоких температур.*– 2001.– Т. 39. – №2.– С. 235–241.
4. 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.
5. Королев П.В., Крюков А.П. Нестационарное движение испаряющейся жидкой перемычки в капилляре // *Труды Третьей Российской национальной конференции по теплообмену.*– М.: Издательство МЭИ, 2002.–Т. 4.–С. 276–279.
6. Бондаренко С.И., Гаврилов Р.В., Еременко В.В., Русанов К.В., Щербакова Н.С., Дергунов И.М., Крюков А.П., Королев П.В., Селянинова Ю.Ю., Жуков В.М., Харитонов В.С., Куценко К.В., Деев В.И. и Шувалов В.А. Исследование влияния микрогравитации на физические явления в криогенных жидкостях и многоцелевая бортовая криогенная установка для реализации этих исследований на Международной Космической Станции // *Fizika Nizkikh Temperatur.*–2003.–Vol. 29.– No. 6.– P. 628–632.(на англ. яз.)