

УДК 536.24

## РЕЖИМЫ КИПЕНИЯ ГЕЛИЯ II НА ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ НАГРЕВАТЕЛЕ ВНУТРИ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ<sup>1</sup>

© 2023 г. Ю. Ю. Пузина\*, А. П. Крюков\*\*

ФГОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

\*E-mail: Puzina2006@inbox.ru

\*\*E-mail: KryukovAP@mail.ru

Поступила в редакцию 12.09.2022 г.

После доработки 02.12.2022 г.

Принята к публикации 06.12.2022 г.

Рассматриваются экспериментальные данные по исследованию кипения сверхтекучего гелия (гелия II) на цилиндрическом нагревателе внутри пористой структуры. На основании анализа видеозаписей дана классификация режимов тепломассопереноса, характеризующихся существенным видоизменением формы границы раздела фаз. Представлены значения тепловых потоков и температур нагревателя, оценена степень неравновесности соответствующих процессов переноса.

DOI: 10.31857/S0040364423030171

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование теплопередачи к сверхтекучему гелию в стесненных условиях позволяет оценить эффективность криостатирования сверхпроводящих устройств различного назначения (магниты ускорителей, кабели, аппараты магнитно-резонансной томографии). Использование пористых покрытий катушек и кабелей способствует проникновению гелия II непосредственно к охлаждаемому объекту, в результате чего эффективность отвода тепла через микроканалы этих пористых структур повышается. В статье [1] экспериментально показано, что применение пористого покрытия повышает эффективность криостатирования в несколько раз путем увеличения как пиковой нагрузки, при которой начинается образование пара, так и восстановительной, при которой паровая пленка на тепловыделяющей поверхности пропадает и достигается непосредственный контакт жидкость–нагреватель.

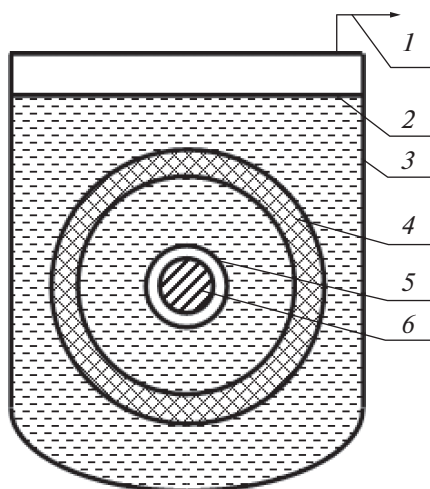
Экспериментальные исследования процессов тепломассопереноса в сверхтекучем гелии (температура  $T < 2.17$  К) сопровождаются известными трудностями, связанными с высоким уровнем теплопритоков из окружающей среды и необходимостью их постоянной компенсации за счет вакуумной откачки паров насыщенной жидкости (давление  $P < 5 \times 10^3$  Па). Из-за этих сложностей осуществлено лишь ограниченное количество исследований, посвященных кипению гелия II при уровне удельных тепловых нагрузок (тепловых

потоков), превышающем  $10^4$  Вт/м<sup>2</sup>, причем в основном на тонких (10–100 мкм) нагревательных элементах. Так, например, в [2] использовался нагреватель диаметром 50 мкм, причем авторы не смогли добиться формирования стабильной паровой пленки. Только применение таких нагревателей в экспериментах при микрогравитации [3] позволило получить практически идеальную гладкую границу раздела фаз сферической формы за счет действия сил поверхностного натяжения. Вместе с тем в [4, 5] на проволоках-нагревателях относительно небольшого диаметра (0.2–0.8 мм) при нагрузке  $(2–5) \times 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> наблюдались образование и существование в течение достаточно длительного времени паровых пленок с гладкими межфазными поверхностями гелий II–пар.

Характер тепломассопереноса для двухфазных систем в сверхтекучем гелии отличается от аналогичных явлений в нежидких жидкостях, включая криогенные. Для таких систем необходима подготовка специального оборудования [6], которое позволяет, например, исследовать явления, возникающие на поверхности He II в ячейках различных размеров и формы (различные граничные условия) при возбуждении волн в широком диапазоне частот. При этом некоторые физические исследования невозможны без использования ультранизких температур в несколько милликельвинов, которые можно получить с использованием технологии непрерывного охлаждения в криостатах растворения <sup>3</sup>He–<sup>4</sup>He относительно большой мощности [7].

Процессы в сверхтекучем гелии особенно при высоких тепловых потоках описываются на осно-

<sup>1</sup> По материалам Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-8). Москва. 17–22 октября 2022 г.



**Рис. 1.** Схема эксперимента: 1 – линия вакуумной откачки, 2 – свободный уровень жидкости, 3 – криостат, 4 – пористая структура, 5 – паровая пленка, 6 – цилиндрический нагреватель.

вании методов гидродинамики сверхтекучей турбулентности [8], что позволяет проанализировать влияние квантовых эффектов на формирование волн второго звука. Развитие техники эксперимента дает возможность проводить изучение вихревого движения, создаваемого волнами на поверхности сверхтекучего гелия [9] с помощью зарядов, инжектированных в объем жидкости.

Результаты расчета [10] показывают, что переход к использованию пористой структуры должен подавлять колебания паровой пленки при кипении гелия II, однако в экспериментах [11] обнаружено отличие картины кипения внутри пористой структуры как от обычных жидкостей, так и от кипения гелия II в большом объеме. Тем не менее удается получить в таких условиях и замкнутую паровую пленку [12]. Недостаточно полная информация о поведении сверхтекучего гелия в каналах пористой структуры в ограниченном объеме особенно при высоких тепловых потоках, обуславливающих кипение жидкости, стала мотивацией для проведения исследований, представленных в настоящей работе.

## 1. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Общая схема экспериментального стенда для исследования процессов тепломассопереноса в сверхтекучем гелии, подготовка и методика проведения исследований представлены в [11].

Экспериментальный стенд включает в себя системы криостатирования, вакуумной откачки, оптического наблюдения, цифровой видеозаписи, подачи тепловой нагрузки и измерения режимных параметров. На рис. 1 схематично изображены криостат, линия вакуумной откачки и экспери-

ментальная ячейка, которая является центральным элементом установки [13]. Цилиндрический корпус ячейки представляет собой трубу из нержавеющей стали с внутренним диаметром 36 мм. На боковой поверхности этой оболочки выполнены сверления для обеспечения ее проницаемости для пара, образующегося при кипении гелия II. Внутри корпуса вкладывается пористая структура 4 толщиной 7.5 мм из 10 намотанных слоев стальной тканой сетки (диаметры основы – 0.12, утка – 0.1, плетения – 0.44 мм). На оси ячейки горизонтально крепится цилиндрический нагреватель 6 на Г-образный изогнутый стержень. Наружная поверхность цилиндрического нагревателя представляет собой латунную трубку диаметром 3 мм и длиной 30 мм, внутри которой находится намотка из никромовой проволоки [13].

Давление пара  $P''$  над зеркалом жидкости во внутреннем сосуде гелиевого криостата контролируется с помощью присоединенного к нему ртутного чашечного манометра МЧР-4. В автоматическом режиме значения давления записываются емкостным датчиком “Баратрон” (модели 235). Для измерения температур жидкости и поверхности нагревателя установлены температурные датчики сопротивления, базирующиеся на ТВО-резисторах<sup>2</sup> [14]. Один из термодатчиков прикреплен к внешней боковой поверхности нагревателя вблизи Г-образного металлического держателя. Другой датчик располагался свободно во внутреннем сосуде Дьюара для измерения температуры жидкости вне экспериментальной ячейки. Также измерялась температура жидкости вблизи внутренней и внешней поверхностей пористой структуры. Подача тепловой нагрузки  $q_w$  на нагреватель обеспечивалась программируемым источником питания Rigol DP821A. Для автоматического сбора и обработки результатов эксперимента использовались модули АЦП-ЦАП ZetLAB 230 и 220.

Экспериментальная серия начинается в момент подачи напряжения на нагреватель. Исследуемый диапазон тепловых нагрузок –  $10^4$ – $3.5 \times 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>. Подача тепловой нагрузки  $q_w$  на нагреватель приводит к образованию паровой пленки 5 (рис. 1) и выходу пара из экспериментальной ячейки через пористую структуру в криостат. Наблюдение осуществляется с торца экспериментальной ячейки. Изменение давления пара над зеркалом жидкости и соответствующей температуры равновесной жидкости, а также увеличение температуры нагревателя  $T_w$  по мере нагревания приводят к видоизменению границы раздела фаз, что фиксируется визуально. Диапазон изменения температуры жидкости – 1.61–2.17 К, давления в криостате – 800–5000 Па. Температура нагревателя  $T_w$  зависит от режима кипения и может варьироваться от 5–6 К

<sup>2</sup> ТВО-резистор – термовлагодостойкий объемный резистор.

в момент образования пленки пара до 200 К. Эксперименты для каждого значения плотности теплового потока проводятся в условиях монотонного увеличения во времени давления в рабочей камере и температуры жидкости. Экспериментальная сессия заканчивается выключением нагрузки при достижении жидкостью температуры  $\lambda$ -точки (2.17 К) или при существенном повышении температуры нагревателя (выше 200 К).

## 2. КИПЕНИЕ ВНУТРИ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ

В результате проведенных экспериментов при постоянной тепловой нагрузке нагревателя получены различные режимы кипения гелия II внутри пористой структуры при различных температурах жидкости. Систематически появляются четыре различные формы межфазной поверхности жидкость–пар: 1) бесшумовой режим тонкой пленки; 2) шумовой режим толстой пленки; 3) режим перевернутого “колокола”; 4) гладкая межфазная поверхность под нагревателем. Переход между режимами осуществляется через развитие колебаний границы раздела фаз при изменении внешних параметров.

**2.1. Беспленочный режим кипения.** Так же как и ранее, для случая кипения в большом объеме [4] при тепловой нагрузке меньше пиковой обнаружен режим теплоотдачи без видимых паровых образований (рис. 2). Температура нагревателя могла достигать 5 К, в этом случае вблизи нагревателя наблюдается изменение оптических свойств жидкости, которые, по всей видимости, связаны с образованием микропузырей на поверхности нагревателя. На рис. 2–6 в нижней части видны Г-образный крепеж и провода температурных датчиков.

**2.2. Бесшумовой режим тонкой пленки.** Увеличение теплового потока  $q_w$  приводит к тому, что при некотором его значении на поверхности нагревателя образуется тонкая пленка пара с коаксиальной границей раздела фаз жидкость–пар (рис. 3). Такую величину  $q_w$  часто называют пиковой тепловой нагрузкой. В отличие от кипения классических жидкостей, формирование гладкой устойчивой паровой пленки в гелии II не сопровождается отрывом паровых конгломератов и пузырей. Теплоперенос осуществляется теплопроводностью от нагревателя через пар, далее теплота поступает в жидкость, где эффективность переноса существенно выше [15], чем для обычных жидкостей, поэтому испарения с межфазной поверхности гелий II–пар не происходит. Подобного рода картину можно наблюдать при кипении недогретых до состояния насыщения жидкостей [16–18], а также, вероятно, в жидких металлах [19].

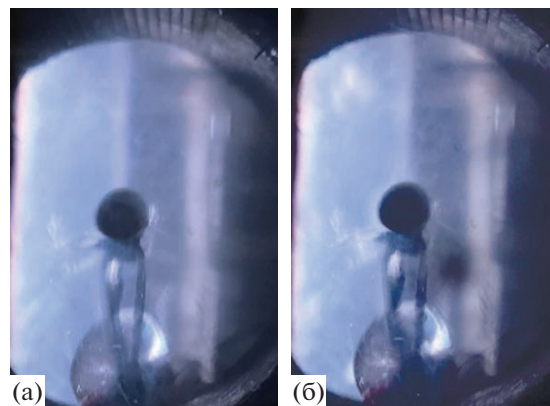


Рис. 2. Фотографии эксперимента при отсутствии видимого кипения: (а) – без нагрузки; (б) –  $P'' = 1000$  Па,  $q_w = 1.09 \times 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>,  $T_w = 3.85$  К.

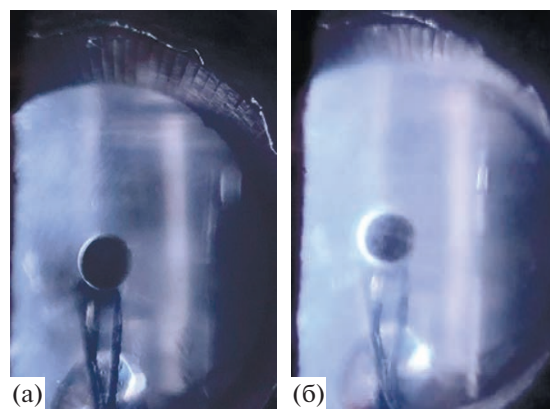


Рис. 3. Фотографии эксперимента в режиме кипения с замкнутой тонкой пленкой: (а) –  $P'' = 3500$  Па,  $q_w = 2.45 \times 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>,  $T_w = 6.83$  К; (б) –  $1200$ ,  $3.33 \times 10^4$ ,  $11.45$ .

Для такой тонкой пленки (толщиной 50–500 мкм) степень неравновесности процесса тепло-

переноса на межфазной поверхности  $q = \frac{q_w}{P'' \sqrt{2RT}}$

оценивается при разных тепловых нагрузках и температурах жидкости на уровне 0.02–0.3 (например, для параметров, соответствующих рис. 3а, степень неравновесности  $q = 0.077$ ; для параметров рис. 3б  $q = 0.31$ ), что обуславливает необходимость применения неравновесных граничных условий [20] при определении толщины паровой пленки (подобно см. статью [21]).

Эксперименты показали, что область существования гладких устойчивых паровых пленок в земных условиях так же, как и для случая свободного объема [4], весьма ограничена, хотя предварительные аналитические исследования пред-

полагали наличие только таких пленок пара [10]. В ряде случаев на поверхности пленки видны поверхностные колебания. При флуктуации параметров эксперимента паровая пленка теряет свою форму и происходит переход в толстую шумовую пленку или перевернутую колоколообразную (см. ниже).

**2.3. Шумовой режим толстой пленки.** В данном режиме на поверхности нагревателя образуется толстая паровая пленка (толщиной 0.5–4 мм) и кипение сопровождается явно слышимым шумом (рис. 4). Пленка, в целом оставаясь устойчивой, претерпевает поверхностные колебания границы раздела фаз. При этом по сравнению с режимом тонкой пленки толщина ее не остается постоянной по сечению. Очевидно, что поскольку толщина пленки существенно возрастает, для описания процессов на границе раздела фаз следует использовать формулу, полученную в цилиндрической геометрии [22]. Результаты расчетов показывают, что как для случая неподвижной межфазной поверхности [23], подобно рассмотренной в п. 2.2, так и в случае движения границы раздела фаз пар–жидкость [24] нестационарная стадия кинетической релаксации заканчивается за время, меньшее, чем интервал между кадрами видеосъемки 1/30 с.

**2.4. Режим перевернутого колокола.** Нарушение устойчивости границы раздела фаз в режиме тонкой бесшумовой пленки или развитие колебаний в режиме шумовой толстой пленки приводят к качественному изменению характера кипения. Образующийся пар вытесняет из внутренней полости ячейки значительную часть жидкого гелия. Пар скапливается в верхней части ячейки, обволакивая изнутри пористую оболочку. Формируется единое паровое пространство от нагревателя

до верхней образующей, визуально в сечении похожее на перевернутый колокол (рис. 5). Как обсуждалось ранее [11], такой режим кипения не наблюдается в свободном объеме, его протекание обусловлено именно замкнутым пространством пористой оболочки.

**2.5. Плоская межфазная поверхность под нагревателем.** “Перевернутый колокол” изменяется в размерах таким образом, что расстояние между образующими увеличивается и видимое сечение парового пространства начинает занимать более половины объема внутренней цилиндрической полости пористой оболочки. С развитием колебаний границы раздела фаз развал “колокола” усиливается, затем уровень жидкости внутри ячейки опускается,

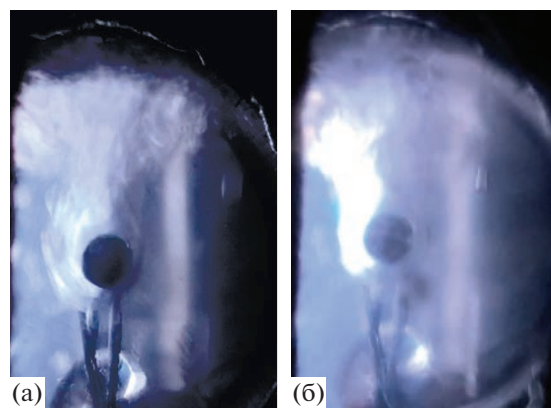


Рис. 5. Фотографии эксперимента в режиме кипения с перевернутой колоколообразной пленкой: (а) –  $P'' = 4300$  Па,  $q_w = 2.45 \times 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>,  $T_w = 40.38$  К; (б) – 3200,  $3.33 \times 10^4$ , 90.67.

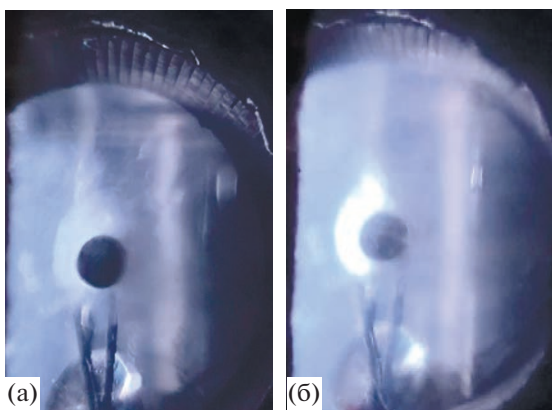


Рис. 4. Фотографии эксперимента в режиме шумового кипения с замкнутой толстой пленкой: (а) –  $P'' = 3800$  Па,  $q_w = 2.45 \times 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>,  $T_w = 15.15$  К; (б) – 1500,  $3.33 \times 10^4$ , 27.36.

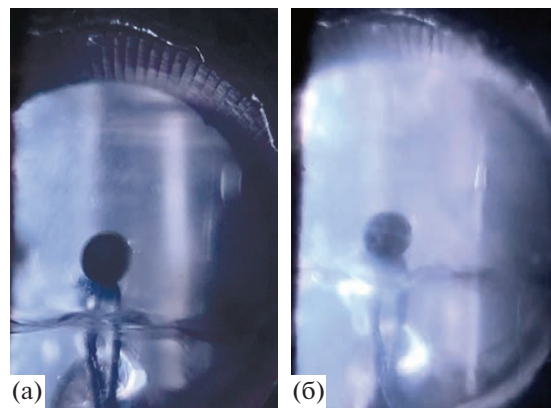


Рис. 6. Фотографии эксперимента в режиме кипения с разомкнутой паровой пленкой: (а) –  $P'' = 4900$  Па,  $q_w = 2.45 \times 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>,  $T_w = 155.68$  К; (б) – 4400,  $3.33 \times 10^4$ , 126.17.



ется ниже нагревателя. Паровая пленка при этом вырождается, а внутри ячейки видна гладкая устойчивая плоская межфазная поверхность пар–гелий II на некотором расстоянии от нагревателя (рис. 6). Таким образом, происходит расслоение пара и жидкости внутри ячейки: пар занимает верхнюю часть внутреннего пространства пористой структуры, жидкость – нижнюю, меньшую, часть, а граница раздела фаз представляет собой горизонтальную плоскость под нагревателем.

При этом температура нагревателя может достигать 200 К, а гелий, как показывают датчики давления и температуры, все еще остается в сверхтекучем состоянии.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных экспериментальных исследований впервые выделены режимы кипения сверхтекучего гелия на цилиндрическом нагревателе, размещенном внутри коаксиальной пористой структуры. Описаны характерные особенности процессов в рассматриваемом диапазоне параметров, обсуждаются отличия протекания исследуемых процессов в свободном объеме и стесненных условиях, а также переходы между режимами в виде развития колебаний межфазной поверхности сверхтекучий гелий–пар. Возникновение различных форм границы раздела пар–жидкость обусловлено изменением условий существования неравновесной двухфазной системы. Так, например, при  $q_w = 2.45 \times 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> и глубине погружения 80 мм тонкая пленка возникает в интервале температур жидкости 2.03–2.1 К, тогда как при  $q_w = 3.33 \times 10^4$  и глубине погружения 237 мм тонкая пленка появляется в интервале температур 2.05–2.08 К. Таким образом, режим кипения в рассмотренных условиях определяется независимыми параметрами эксперимента: глубиной погружения, температурой жидкости и тепловым потоком.

Авторы благодарят за совместную работу над экспериментом и последующей обработкой полученных данных И.А. Ячевского, И.В. Володина, И.А. Корнякова.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-08-00342).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Arend I., Li Y.Z., Liiders K., Ruppert U.* Heat Flux Investigations on Wires Coated with Porous Insulation in Superfluid Helium // *Cryogenics*. 1996. V. 36. P. 215.
2. *Takada S., Murakami M., Kimura N.* Heat Transfer Characteristics of Four Film Boiling Modes Around a

Horizontal Cylindrical Heater in He II // *AIP Conf. Proc.: Transac. Cryogenic Engineering Conf.—СЕС: Adv. Cryog. Eng.* 28 June–2 July 2009, Tucson, Arizona. 2010. V. 1218. P. 1355.

3. *Takada S., Kimura N., Pietrowicz S., Grunt K., Murakami M., Okamura T.* Visualization of He II Boiling Process under the Microgravity Condition for 4.7 s by Using a Drop Tower Experiment // *Cryogenics*. 2018. V. 89. P. 157.
4. *Спиридонов А.Г.* Экспериментальное исследование теплоотдачи к сверхтекучему гелию. Дис. ... канд. тех. наук. М.: МЭИ, 1981. 168 с.
5. *Лабунцов Д.А., Аметистов Е.В., Спиридонов А.Г.* Исследование пленочного режима кипения сверхтекучего гелия (He-II) // *Теплоэнергетика*. 1981. № 4. С. 18.
6. *Левченко А.А., Межов-Деглин Л.П., Пельменёв А.А.* Низкотемпературная вставка для изучения явлений на поверхности сверхтекучего гелия // *ПТЭ*. 2016. № 6. С. 133.
7. *Усов Ю.А.* Юбилейный год реализации метода получения сверхнизких температур путем растворения <sup>3</sup>He в <sup>4</sup>He // *Новости ОИЯИ*. 2016. № 4. С. 20.
8. *Кондаурова Л.П., Немировский С.К.* Численное исследование эволюции интенсивных волн второго звука в турбулентном сверхтекучем гелии // *Теплофизика и аэромеханика*. 2008. Т. 15. № 2. С. 237.
9. *Султанова М.Р., Левченко А.А., Ремизов И.А.* Регистрация вихревого движения в объеме сверхтекучего гелия по инжектированным зарядам // *Наноиндустрия*. 2021. Т. 14. № 56. С. 288.
10. *Крюков А.П., Пузина Ю.Ю.* Подавление колебаний границы раздела фаз пар–жидкость при кипении сверхтекучего гелия внутри пористого тела // *ИФЖ*. 2013. Т. 86. № 1. С. 24.
11. *Крюков А.П., Королев П.В., Пузина Ю.Ю.* Экспериментальное исследование кипения He-II внутри пористого тела // *ПМТФ*. 2017. № 4. С. 126.
12. *Korolyov P.V., Kryukov A.P., Puzina Yu. Yu., Yachevsky I.A.* The Formation of a Closed Vapor Film During the Boiling of Helium II on a Cylindrical Heater inside the Porous Structure // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V. 1675. 012059.
13. *Королев П.В., Крюков А.П., Пузина Ю.Ю.* Конструкция экспериментальной ячейки для исследования кипения гелия-II в условиях невесомости // *Вопросы электромеханики. Тр. НПП ВНИИЭМ*. 2012. Т. 130. № 5. С. 43.
14. *Filippov Yu.P., Miklyaev V.V.* A Comparison of Two Kinds of TVO Cryogenic Temperature Sensors // *Cryogenics*. 2019. V. 100. P. 85.
15. *Gorter C.J., Mellink J.H.* On the Irreversible Processes in Liquid Helium II // *Physica*. 1949. V. 15. № 3/4. P. 285.
16. *Григорьев В.С., Жилин В.Г., Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Глазков В.В., Синкевич О.А.* Поведение паровой пленки на сильно перегретой поверхности, погруженной в недогретую воду // *ТВТ*. 2005. Т. 43. № 5. С. 100.
17. *Duplyankin R.A., Glazkov V.V., Sinkevich O.A., Ivochkin Y.P., Kubrikov K.G.* Subcooled Pool Film

- Boiling Heat Transfer from Sphere: Experiment and Modelling // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V. 1683. 022093.
18. *Yagov V.V., Zabiroy A.R., Kaban'kov O.N., Minko M.V.* Heat Transfer During Cooling of High Temperature Spheres in Subcooled Water at Different Pressures // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2017. V. 110. P. 219.
  19. *Двайер О.* Теплообмен при кипении жидких металлов. М.: Наука, 1980.
  20. *Муратова Т.М., Лабунцов Д.А.* Кинетический анализ процессов испарения и конденсации // *ТВТ.* 1969. Т. 7. № 5. С. 959.
  21. *Puzina Yu.Yu., Kryukov A.P., Yachevsky I.A.* Determination of the Vapor Film Thickness at Steady Superfluid Helium Film Boiling // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1359. 012050.
  22. *Королев П.В., Крюков А.П.* Описание теплопереноса через цилиндрическую межфазную поверхность жидкость–пар // *ТВТ.* 2016. V. 54. № 1. С. 73.
  23. *Крюков А.П., Ястребов А.К.* Анализ процессов переноса в паровой пленке при взаимодействии сильно нагретого тела с холодной жидкостью // *ТВТ.* 2003. Т. 41. № 5. С. 771.
  24. *Ястребов А.К., Крюков А.П.* Тепломассоперенос через пленку пара с учетом движения межфазной поверхности жидкость–пар и роста температуры границы раздела фаз // *ТВТ.* 2006. Т. 44. № 4. С. 560.