

**Особенности кипения сверхтекучего гелия как криоагента
на плоском нагревателе внутри вертикального канала**

И.А. Корняков, Ю.Ю. Пузина

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,
111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1, Россия

Резюме. Цель. Целью работы является исследование процессов тепломассопереноса при кипении He–II как криоагента на плоской поверхности нагрева внутри цилиндрического канала при глубинах погружения, сопоставимых с его высотой. **Метод.** Исследование основано на применении методов термодинамического анализа, натурного и вычислительного моделирования процессов и объектов криогенной техники. **Результат.** Представлена схема экспериментальной ячейки, а также методика проведения эксперимента и обработки данных. Внимание уделяется поведению межфазной поверхности в зависимости от различных параметров эксперимента: давления над зеркалом жидкости, удельной тепловой нагрузки и высоты столба жидкости над нагревательным элементом. Предложена классификация режимов кипения в вертикальном канале в зависимости от визуального характера процессов на межфазной поверхности жидкость–пар. Построены зависимости положения уровня жидкости в канале от времени. Проведено сравнение всех серий, выявлены закономерности между скоростью межфазной поверхности, разностью температур в жидкости и глубиной погружения нагревательного элемента в сверхтекучий гелий. Составлен тепловой баланс для испарившейся жидкости с целью оценки потерь тепла в свободный объем. **Вывод.** При разработке и проектировании систем с использованием сверхтекучего гелия в качестве криоагента можно предполагать морфологию межфазной поверхности и соответствующий рабочий режим установки.

Ключевые слова: сверхтекучий гелий, криоагент, криостат, тепломассоперенос, паровая пленка, межфазная поверхность, эксперимент, кипение, вертикальный канал

Для цитирования: И.А. Корняков, Ю.Ю. Пузина. Особенности кипения сверхтекучего гелия как криоагента на плоском нагревателе внутри вертикального канала. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(3):6-19. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-3-6-19.

**Peculiarities of superfluid helium boiling as a cryogenic agent
on a flat heater inside a vertical channel**

I.A. Korniyakov, Yu.Yu. Puzina

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
14 Krasnokazarmennaya Str., building 1, Moscow 111250, Russia

Abstract. Objective. The aim of the work is to study heat and mass transfer processes during He–II boiling as a cryogenic agent on a flat heating surface inside a cylindrical channel at immersion depths comparable to its height. **Method.** The study is based on the application of thermodynamic analysis methods, natural and computational modeling of processes and objects of cryogenic engineering. **Result.** A schematic of the experimental cell, as well as the methodology for conducting the experiment and data processing, are presented. Attention is paid to the behavior of the interfacial surface depending on various experimental parameters: pressure above the liquid surface, specific heat load and the height of the liquid column above the heating element. A classification of boiling regimes in a vertical channel depending on the visual nature of the processes at the liquid-vapor interfacial surface is proposed. Dependences of the position of the liquid level in the channel on time are constructed. All series were compared, regularities between the

interfacial surface velocity, the temperature difference in the liquid and the immersion depth of the heating element in superfluid helium were revealed. A heat balance for the evaporated liquid was compiled in order to estimate heat losses into free volume. **Conclusion.** When developing and designing systems using superfluid helium as a cryogenic agent, one can assume the morphology of the interfacial surface and the corresponding operating mode of the system.

Keywords: superfluid helium, cryoagent, cryostat, heat and mass transfer, vapor film, interphase surface, experiment, boiling, vertical channel

For citation: I.A. Korniyakov, Yu.Yu. Puzina. Peculiarities of superfluid helium boiling as a cryogenic agent on a flat heater inside a vertical channel. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(3):6-19. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-3-6-19.

Введение. Количество работ, посвященных экспериментальному изучению кипения He-II с визуализацией процессов на границе раздела фаз пар – жидкость незначительно. В основном, такие исследования проводятся в небольших объемах с малыми нагревательными элементами, а сами процессы фазового перехода являются стабильными [1, 2]. Визуализация процессов, которые представлены в данной работе, позволяют получить понимание о неустойчивости кипения. Разделение типов кипения по форме границы раздела фаз расширяет представления о возможных ситуациях в системах криостатирования [3]; интерес к использованию He-II как к криоагенту сохраняется, так как с точки зрения фундаментальных основ тепломассообмена он остается уникальным.

В работах [4-6] исследована связь между геометрическими параметрами пористых сред (пористостью и размером пор) и работой фильтров с использованием сверхтекучего гелия. В основе исследования лежит двухскоростная модель сверхтекучести, которая описывает гелий как два компонента в уравнении движения: нормального и сверхтекучего. Критическая скорость для сверхтекучего потока изучалась с помощью эмпирических соотношений. Из полученных результатов следует, что для фильтра с равномерным распределением пор теоретические и экспериментальные значения критических расходов находятся в наилучшем согласии. Однако при неравномерной структуре пор наблюдалось некоторое расхождение, что свидетельствует о проблематичности моделирования динамики сверхтекучей жидкости в пористых средах.

Авторы в работе [7] дают информацию о разработке высокоинтенсивных источников ультрахолодных нейтронов — ключевой задаче для исследований в области фундаментальной физики, включая поиск электрического дипольного момента нейтрона и измерение его времени жизни. Одним из ключевых элементов установки является канал для сверхтекучего гелия, соединённый с конвертором и теплообменником.

В работе [8] внимание уделено решению проблемы компактности, стоимости и производительности теплообменников, работающих при температуре 2K в криогенных системах со сверхтекучим гелием. Предложены пластинчатые теплообменники (ПТО) с шевронным рисунком гофры. В данной работе на основе CFD моделирования и экспериментальной проверки изучены теплогидравлические характеристики паяного ПТО, предназначенного для такой системы. В процессе CFD моделирования рассматриваются случаи одностороннего течения по каналу пластинчато-ребристого теплообменного аппарата в криогенных установках с использованием сверхтекучего и нормального гелия в качестве рабочих жидкостей. Валидация подтвердила точность проектных процедур: эффективность теплообменника составила более 94%. Показано, что паяные теплообменники подходят для температуры жидкого гелия, являясь более компактными, эффективными и экономичными, чем иные варианты исполнения.

В работах [9, 10] проводится численное исследование течения гелия в адиабатических капиллярных трубках с учетом дросселирования потока и явлений сверхтекучести для криорефрижераторов на основе эффекта Джоуля - Томсона. Этот эффект с использованием гелия в качестве рабочей жидкости является наиболее распространенным среди технологий криорефрижераторов в области температур 1K-4K. Капиллярные трубки

являются дроссельными элементами, обеспечивающими местное гидравлическое сопротивление. С помощью одномерной модели моделируется течение гелия через капиллярные трубки. Анализ показывает, что внутренний диаметр является наиболее важным геометрическим параметром, влияющим на массовый расход и мощность охлаждения системы.

Модель применена и проверена с помощью экспериментальных данных, что дало очень хорошее согласие с максимальным отклонением в 9,4%. Объясняя взаимосвязь между потоком, переходом в сверхтекучее состояние и параметрами системы, данная работа углубляет понимание течения гелия через капиллярные трубки и предлагает информацию о проектировании, полезную для разработки эффективных криорефрижераторов. Предложенная здесь численная схема может быть использована при выборе и оптимизации капиллярных трубок для криогенных технологий, что приведет к дальнейшему улучшению характеристик и надежности.

В работах [11, 12] исследуются характеристики сечения дроссельных клапанов, которые могут использоваться в системах циркуляции сверхтекучего гелия. Криогенные клапана с функцией дросселирования являются важными составляющими проточных систем с гелием для достижения температур ниже λ – точки. К сожалению, несмотря на опыт при использовании игольчатых клапанов в криогенной технике, не существует стандартных методик для проектирования и производства, что может оказать негативное влияние и приведет к неожиданным последствиям, например, время захлаживания и выхода на режим системы, процентное паросодержание в потоке и учет местного гидравлического сопротивления. Результатами проведения эксперимента являются данные, которые помогут при разработке и моделировании криогенных игольчатых вентилей. Авторы отмечают, что эксперимент имеет согласование с теоретическим описанием.

В работе [13] описывается необходимость использования компрессора для получения холодопроизводительности при работе со сверхтекучим гелием в крупных научных объектах, например, ускорителях частиц. Авторы представляют трехступенчатую центробежную холодильную компрессорную установку с отводимой тепловой мощностью 500 Вт на уровне 2К. Авторы выбрали следующую конфигурацию изделия: использование синхронного двигателя, отличительной особенностью которого является загнутые назад рабочие колеса. Теплоизоляция осуществляется с помощью жесткой полиуретановой пены и специальных крепежных изделий, плохо проводящих тепло. Конструкция направлена на снижение теплопритоков, что влияет на производительность благодаря теплозащитным экранам и подходящему выбору материалов.

Исследования [14-16] направлены на распространение снижения давления потока при течении гелия в сверхпроводящих магнитах, которое имеет важное значение для обеспечения безопасности и надежности крупных проектов, таких, как MADMAX (Magnetized Disks and Mirror Axion eXperiment), который направлен на обнаружение аксионов. В MADMAX требуется дипольный магнит из 18 катушек с магнитным полем напряженностью 9 Тл и диаметром 1,35 м, который криостатируется с помощью сверхтекучего гелия внутри медного канала. Трудность заключается в том, что эта конфигурация затрудняет рассмотрение и изучение эффекта падения давления. Для этого создали прототип-аналог катушки. Проведенное с помощью программы численное моделирование показало, что процесс является двухфазным с переменной скоростью потока. Результаты могут использоваться для разработки правил безопасности для MADMAX и подобных крупных сверхпроводящих магнитов, обеспечивая их надежное функционирование в сильных магнитных полях. В исследовании [17, 18] рассмотрению подлежат процессы тепломассопереноса в сверхтекучем гелии в узком канале. Канал создан специально и повторяет условия, которые позволяют воспроизвести физические процессы, которые происходят в пространстве сверхпроводящих магнитов ускорителей частиц. Наибольший интерес представляет поведение λ -фронта при постоянном тепловом потоке. Длинный канал не позволит паровой области расти бесконтрольно и, следовательно, λ -фронт примет какой-то умеренный темп развития. При более высоких тепловых потоках преобладает паровая пленка, снижающая скорость

превращения HeII в HeI. Изучение этих явлений важно для планирования систем термостатирования сверхпроводящих магнитов в ускорителях и гарантии их стабильности. Применение многоканальных систем позволяет использовать сверхтекучий гелий в условиях микрогравитации [19]. На основании проведенного обзора можно прийти к выводу, что процессы тепломассопереноса при кипении сверхтекучего гелия остаются актуальными для изучения.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является исследование процессов тепломассопереноса при кипении He–II на плоской поверхности нагрева внутри цилиндрического канала при глубинах погружения, сопоставимых с его высотой. На основании видеоэкспериментальных данных проводилась сопоставление форм межфазной поверхности с параметрами эксперимента. Визуальная обработка позволила сформировать классификацию процессов кипения по интенсивности для двух экспериментальных ячеек. При различных параметрах межфазная поверхность принимает сложные очертания.

Методы исследования. Схема экспериментальной установки подробно описана в [20]. Проведение экспериментов проходит следующим образом [21]: в начальный момент времени внутренняя полость стеклянного криостата герметична и заполнена атмосферным воздухом, переливное устройство установлено в криостат и в транспортный гелиевый сосуд при атмосферном или немного его превышающем давлении. Ловушки, которые находятся перед насосами и препятствуют попаданию вакуумного масла во внутреннюю полость криостата, заполняются азотом. Далее проводится откачка вакуумными насосами гелиевого криостата. Следующий шаг - это уменьшение теплопритоков к гелиевому криостату путем создания азотной рубашки во внешнем криостате. После этого на переливном устройстве открывается клапан и гелий, в следствии разницы давлений, захлаживает внутренний трубопровод переливного устройства, стеклянный криостат и начинает накапливаться на дне. По достижении определенного уровня гелия клапан на переливном устройстве перекрывается. Так как вакуумные насосы продолжают откачку объема, то происходит испарение с зеркала гелия, и температура накопленной жидкости снижается ниже лямбда-точки. В экспериментальной серии в зависимости от рассматриваемых процессов тепломассообмена при кипении сверхтекучего гелия и достижения повторяемости результатов гелиевый сосуд может откачиваться насосами. Экспериментальная ячейка представляет собой вертикальный прозрачный стеклянный канал, герметичный снизу (рис.1). Нагревательный элемент выполнен в виде нихромовой спирали и размещен под медной пластиной на керамической подложке.



Рис. 1 - Изображение вертикального канала

Fig. 1 - Image of a vertical channel

Для контроля температуры нагревательного элемента в процессе эксперимента с целью предотвращения выхода из строя так же встраивается термопара. Несмотря на то, что термопара недостаточно точно измеряет температуру на гелиевом уровне, контроль показаний во время эксперимента позволяет избежать перегрева проволоки (выше 200K).

Измерительные и питающие провода выведены сквозь фторопластовую пробку через специальные отверстия (рис. 2).

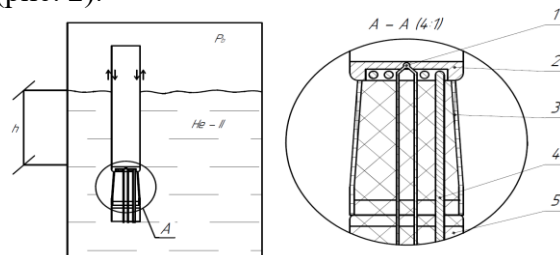


Рис. 2 - Схема вертикального канала: 1 – термопара типа МК и ее провода, 2 – медная пластина, 3 – двухсоставной герметичный клеевой слой, 4 – нагревательный элемент и его провода, 5 – фторопластовая пробка

Fig. 2 - Schematic diagram of a vertical channel; 1 - MK type thermocouple and its wires, 2 - copper plate, 3 - two-component sealed adhesive layer, 4 - heating element and its wires, 5 - fluoroplastic plug

Рассматриваются экспериментальные ячейки с разными геометрическими параметрами (внутренний диаметр $d_1 = 16$ мм, $d_2 = 14$ мм) и сопротивлениями ($R_1 = 39,5$ Ом, $R_2 = 21,4$ Ом) нагревательного элемента. Исследования проводились при тепловых нагрузках $(1 \div 31)$ кВт/м². Следует отметить, что в ходе проведения экспериментальных сессий уровень жидкости снаружи экспериментальной ячейки ниже верхнего края канала.

Обсуждение результатов. В экспериментальных сериях, где с достаточной четкостью идентифицируется положение межфазной поверхности в любой момент времени, обработаны раскадровки видеоизображений и построены графики зависимостей положения межфазной поверхности относительно верхней плоскости нагревательного элемента от времени (Рис. 3). Для всех графиков характерна особенность: в начальный момент времени после подачи тепловой нагрузки фиксируется асимптота, которая связана с тепловой инерцией самого нагревательного элемента. График зависимости представляет собой почти прямую линию.

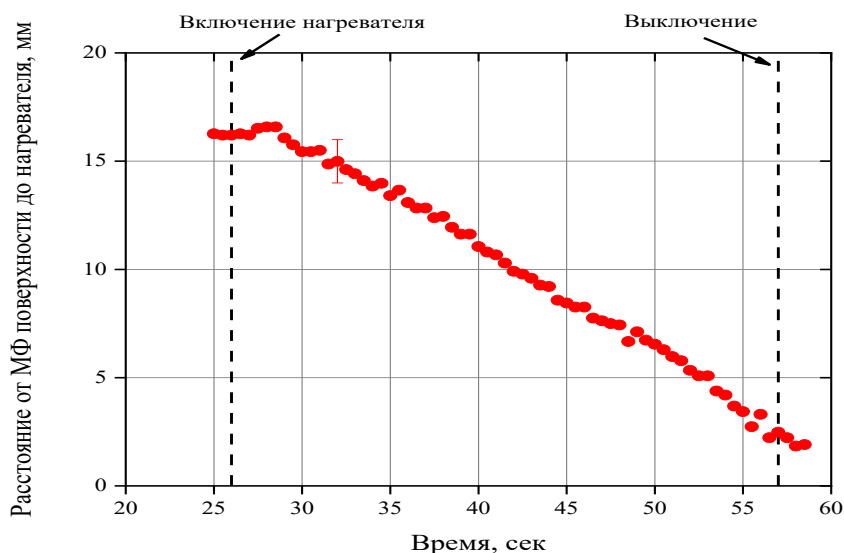


Рис. 3 - Зависимость положения межфазной границы от времени: красные точки – положение межфазной поверхности, пунктирные линии – точки начала и конца подачи тепловой нагрузки

Fig. 3 - Dependence of the interphase boundary position on time: red dots indicate the interphase surface position, dashed lines indicate the start and end points of the heat load application

Таким образом, возможно определение средней для серии скорости снижения уровня жидкости внутри канала и удельного массового потока при кипении сверхтекучего гелия.

Морфология межфазной поверхности. На основании раскадровок анализируется внешний вид межфазной поверхности, в результате классифицируются виды кипения и динамика границы раздела фаз пар – жидкость. Представлено несколько характерных процессов, наиболее явно соответствующих рассматриваемым режимам. Процесс испарения с гладкой межфазной поверхности характерен тем, что при подаче тепловой нагрузки форма остается плоской, не нарушается и сохраняется такой же, как и до включения нагревателя. Снижение уровня жидкости относительно нагревателя свидетельствует о процессе испарения, при этом интересно отметить факт, что тепловая нагрузка в экспериментах $(0,2 \div 3,2) \text{ кВт/м}^2$ ниже уровня восстановительной [22], что подтверждает невозможность образования паровой пленки на нагревателе.

Для каждой серии построена зависимость расстояния от межфазной поверхности до нагревателя. В качестве примера представлены визуализации снижения уровня жидкости (рис. 4 а, 5 а) и соответствующая обработка (рис. 4 б, 5 б) для определения средней скорости межфазной поверхности при различных параметрах: давлении пара в криостате P и глубине погружения h . Скорость составляет 0,4 мм/с для рис.4б и 0,2 мм/с для рис. 5б.

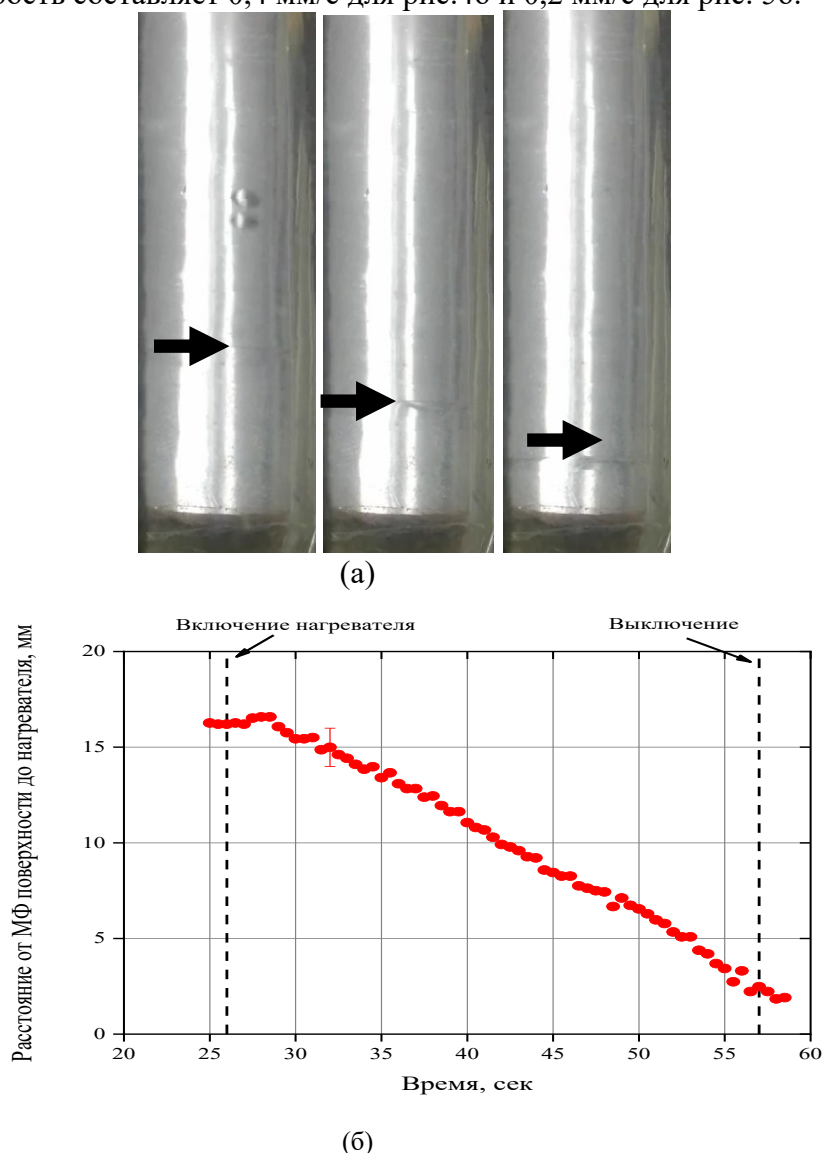


Рис. 4 - Испарение с гладкой межфазной поверхности: (а) – визуализация процесса кипения: интервал между кадрами 18 сек, (б) – зависимость положения межфазной поверхности от времени.
 $P = 2870 \text{ Па}$, $h = 93 \text{ мм}$

Fig. 4 - Evaporation from a smooth interfacial surface: (a) – visualization of the boiling process: interval between frames is 18 sec, (b) – dependence of the position of the interfacial surface on time.
 $P = 2870 \text{ Pa}$, $h = 93 \text{ mm}$

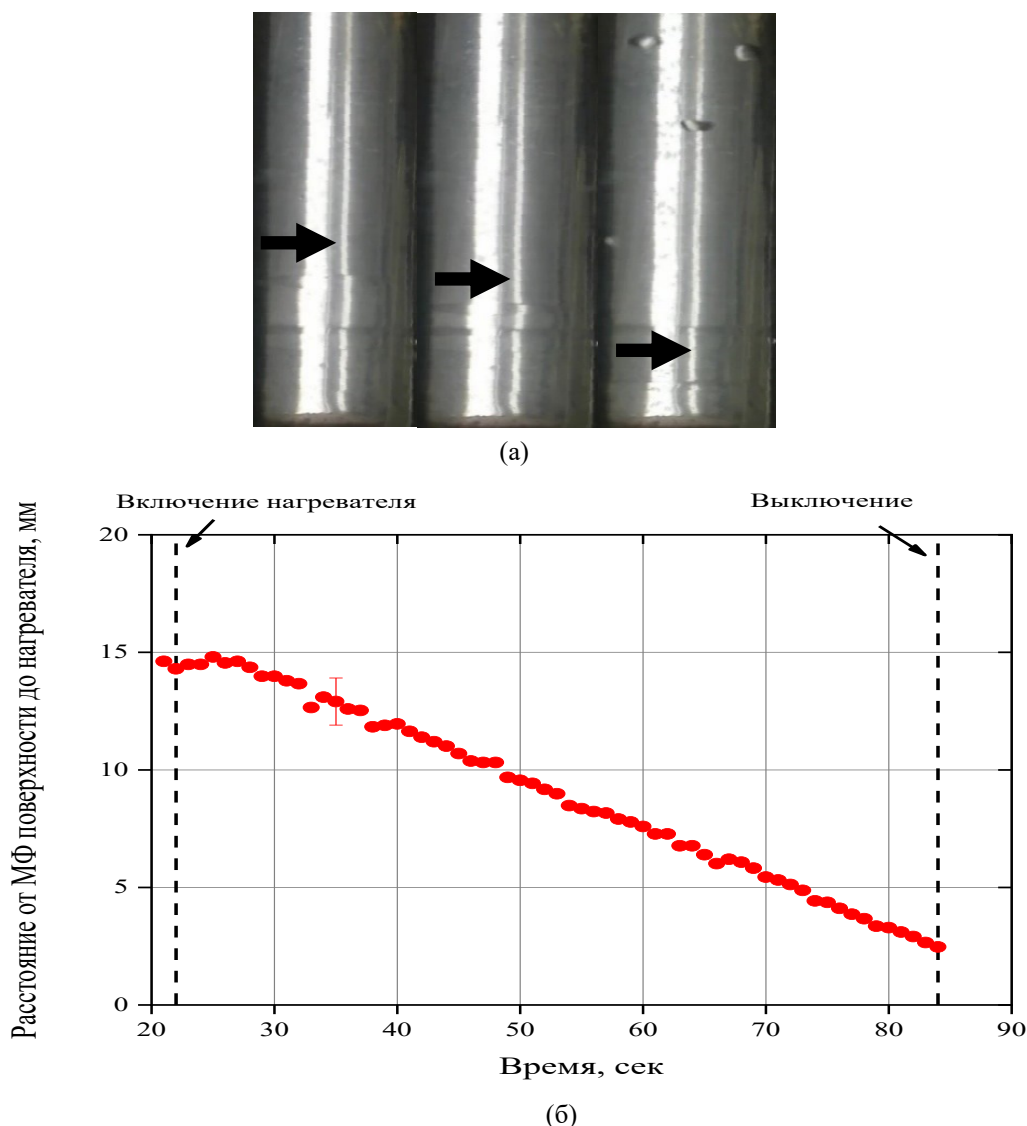


Рис. 5 - Испарение с гладкой межфазной поверхностью: (а) – визуализация процесса кипения, (б) – зависимость положения межфазной поверхности от времени.

Интервал между кадрами 30 сек. $P = 1500$ Па, $h = 52$ мм

Fig. 5 - Evaporation from a smooth interfacial surface: (a) – visualization of the boiling process, (b) – dependence of the position of the interfacial surface on time

The interval between frames is 30 sec. $P = 1500$ Pa, $h = 52$ mm

С помощью визуализации процессов испарения с гладкой межфазной поверхностью можно наблюдать, что убывание уровня гелия внутри экспериментальной ячейки с течением времени имеет линейный характер с постоянной скоростью, которая зависит от теплового потока на нагревателе.

Кипение на свободной (верхней) межфазной поверхности. Для режима кипения на свободной межфазной поверхности отличительными чертами являются следующее: визуально определяется положение границы раздела фаз пар – жидкость, но при этом она не остается гладкой и имеет неупорядоченный вид (рис. 6, 7а, 8).

Так же, как и для случая кипения с гладкой поверхностью, отсутствуют признаки наличия пара вблизи нагревателя, можно отметить относительно невысокую плотность потока массы на испарение при удельном тепловом потоке $(5,1 \div 18,3)$ кВт/м². После подачи тепловой нагрузки межфазная поверхность сразу претерпевает разрушение. При уменьшении уровня жидкости внутри экспериментальной ячейки образуется двухфазная область, которая с течением времени распространяется на всю высоту столба жидкости над нагревательным элементом.

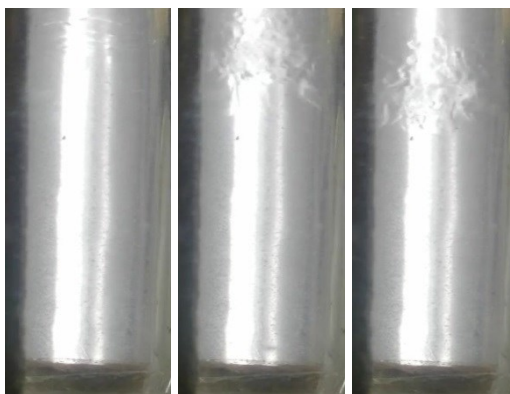
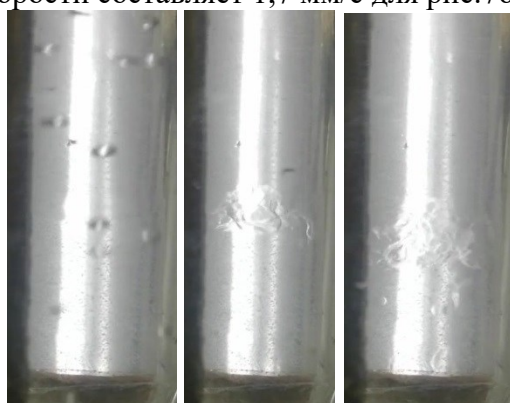


Рис. 6 - Кипение на свободной межфазной поверхности
Интервал между кадрами 2 сек. $P = 1500$ Па, $h = 103$ мм

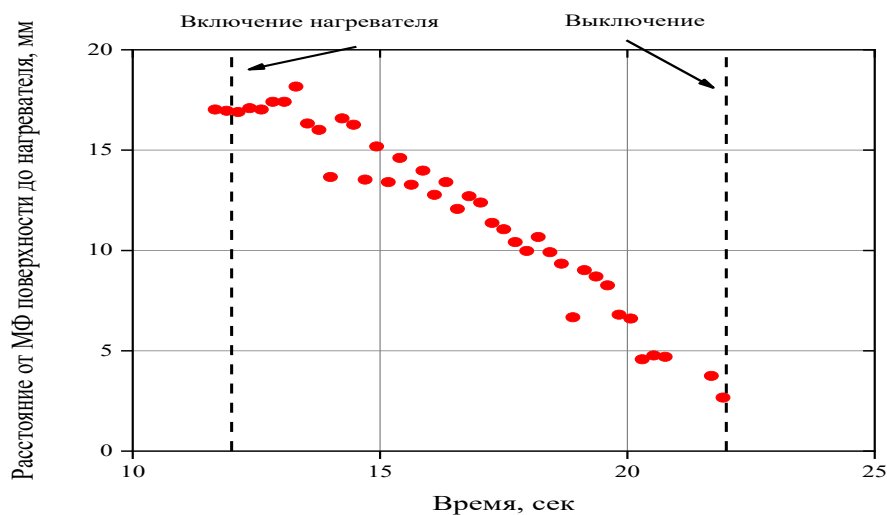
Fig. 6 - Boiling at the free interphase surface

The interval between frames is 2 sec. $P = 1500$ Pa, $h = 103$ mm

При таком кипении наблюдается мнимое повышение уровня гелия внутри ячейки, что хорошо видно из зависимости положения границы раздела фаз от времени (рис. 7б). Интегральное значение скорости составляет 1,7 мм/с для рис.7б.



(a)



(б)

Рис. 7 - Кипение на свободной межфазной поверхности

Интервал между кадрами 2 сек. $P = 3800$ Па, $h = 103$ мм. (а) – визуализация процесса кипения,

(б) – зависимость положения межфазной поверхности h от времени t

Fig. 7 - Boiling at the free interphase surface

The interval between frames is 2 sec. $P = 3800$ Pa, $h = 103$ mm. (a) – visualization of the boiling process,

(b) – dependence of the position of the interphase surface h on time t

При испарении с границы раздела фаз методами молекулярно-кинетической теории можно оценить предельный поток массы [25, 26]. Этот предел зависит от разности плотностей (давлений) на межфазной поверхности и на границе слоя Кнудсена.

Очевидно, что в рассматриваемом случае эта разница представляет собой незначительную величину, следовательно и потенциальный поток массы ограничен возможностями вакуумной откачки. Поэтому с увеличением теплового потока нагревателя, который передаётся к межфазной поверхности со стороны жидкости, площади межфазной поверхности оказывается недостаточно для отведения этого потока через границу раздела фаз путём испарения. Требуемое по условиям протекания процессов тепломассопереноса увеличение площади поверхности испарения достигается за счёт её искривления и дальнейшего разрушения и неустойчивости.

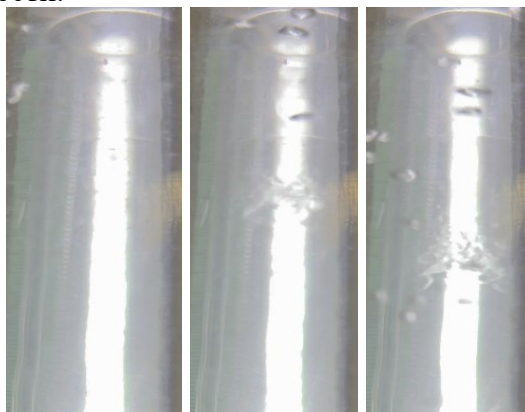


Рис. 8 - Кипение на свободной межфазной поверхности
Интервал между кадрами 1 сек. $P = 1835$ Па, $h = 53$ мм

Fig. 8 - Boiling at the free interphase surface
The interval between frames is 1 sec. $P = 1835$ Pa, $h = 53$ mm

Кипение с высокой интенсивностью. В этом режиме затруднительно определить точное положение межфазной поверхности, кипение сопровождается образованием двухфазной неустойчивой смеси, которая занимает всю высоту (рис. 9-11).

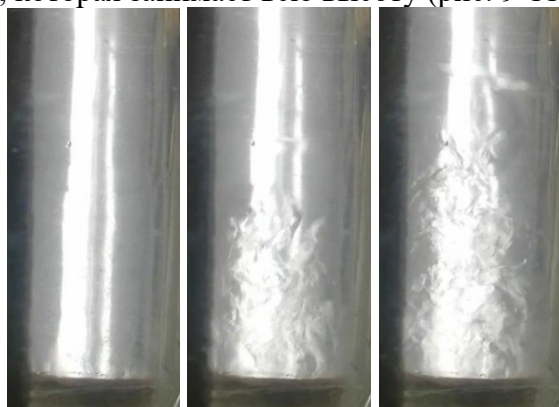


Рис. 9 - Кипение с межфазной поверхностью по всей длине канала
Интервал между кадрами 0,033 сек. $P = 4260$ Па, $h = 92$ мм

Fig. 9 - Boiling with an interphase surface along the entire length of the channel
The interval between frames is 0.033 sec. $P = 4260$ Pa, $h = 92$ mm

После включения нагрузки межфазная поверхность сразу разрушается и кажущийся уровень гелия повышается.

Вследствие невозможности определения координаты границы раздела фаз пар – жидкость, скорость испарения можно оценить только по начальной (до включения нагревателя) и конечной (отсутствие жидкости вообще) точкам. В отличие от кипения на больших глубинах [23, 24] рассматриваемые типы кипения не фиксируют паровую пленку вблизи нагревателя.



Рис. 10 - Кипение с межфазной поверхностью по всей длине канала

Интервал между кадрами 0,033 сек. $P = 3475$ Па, $h = 15$ мм

Fig. 10 - Boiling with an interphase surface along the entire length of the channel

The interval between frames is 0.033 sec. $P = 3475$ Pa, $h = 15$ mm

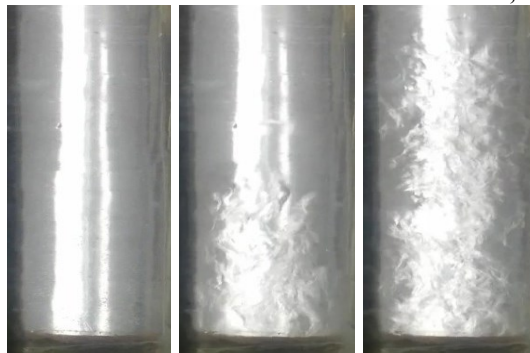


Рис. 11 - Кипение с межфазной поверхностью по всей длине канала

Интервал между кадрами 0,12 сек. $P = 4260$ Па, $h = 92$ мм

Fig. 11 - Boiling with an interphase surface along the entire length of the channel

The interval between frames is 0.12 sec. $P = 4260$ Pa, $h = 92$ mm

Начало кипения. Получение данных об образовании паровой пленки имеет самостоятельный интерес, так как отсутствует общепринятая методика аналитического определения тепловой нагрузки начала кипения (пиковая). Например, при проектировании аппаратов для криостатирования полученные данные позволяют предсказывать происходящие процессы и варианты рабочих режимов. При этом так же и нет оценки влияния неравномерности теплового потока на эту величину. Пленка при кипении сверхтекучего гелия не образуется одномоментно и на ее образование требуется некоторое время. При этом она формируется не в виде гладкой поверхности, а волнообразно в виде паровых конгломератов сложной формы. Это может быть обусловлено несколькими факторами, в частности, неустойчивостью границы раздела фаз пар - жидкость. С помощью раскадровки (рис. 12) удалось установить, что пар, который образуется на нагревателе, занимает не всю площадь.

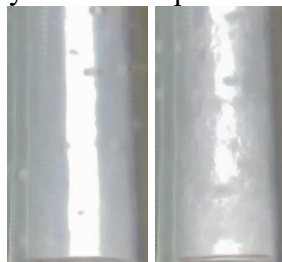


Рис. 12 - Зарождение пленочного кипения

Интервал между кадрами 0,3 сек. $P = 2000$ Па, $h = 132$ мм

Fig. 12 - Initiation of film boiling. Interval between frames is 0.3 sec. $P = 2000$ Pa, $h = 132$ mm

Обсуждение результатов. На рис. 13 показаны зависимости скорости межфазной поверхности, которая, очевидно, связана с тепловым потоком нагревателя, от начального уровня гелия для разных экспериментов. С помощью графиков можно выделить несколько зон для разных режимов кипения.

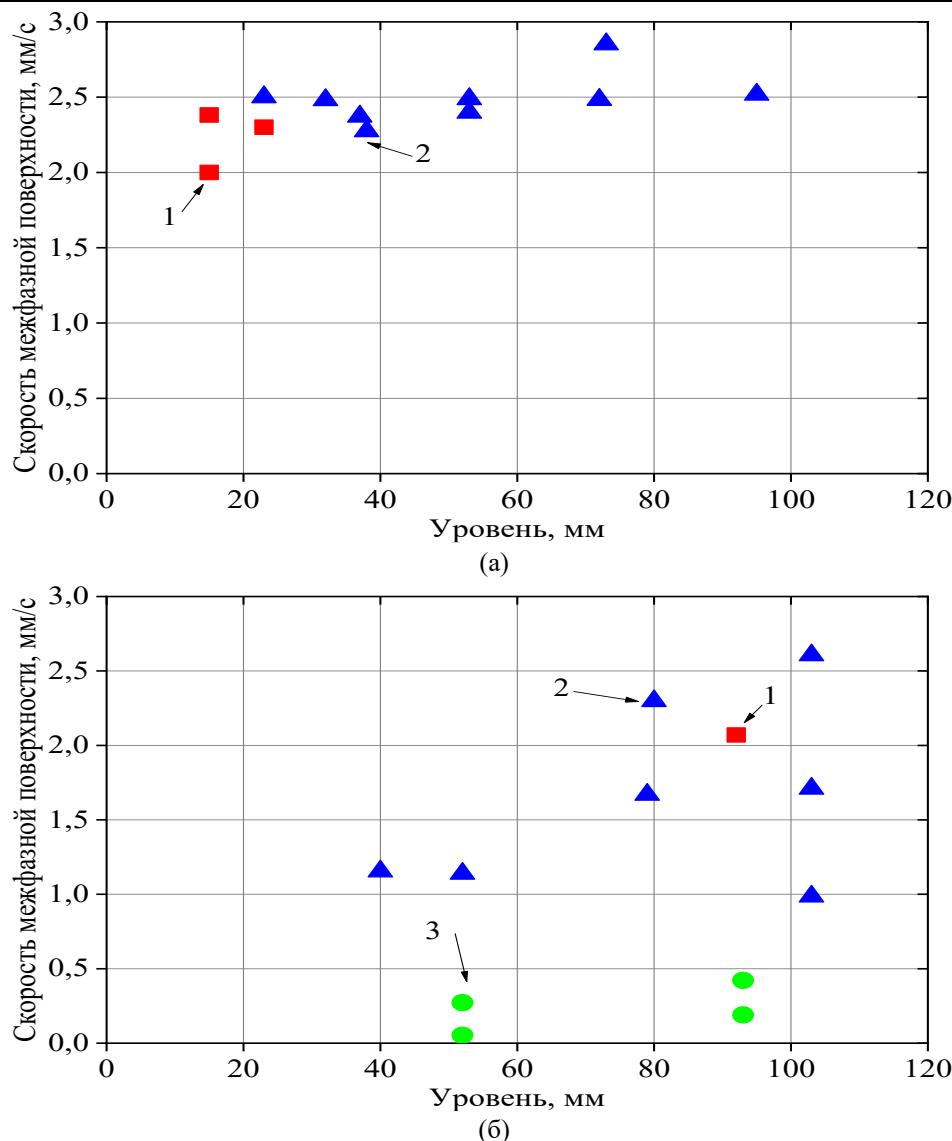


Рис. 13 - График зависимости скорости межфазной поверхности от уровня гелия.

(а) – кипение в вертикальном канале $d = 14$ мм, (б) – кипение в вертикальном канале $d = 16$ мм.

(1) – режим кипения по всей длине канала, (2) – кипение на свободной границе раздела фаз,

(3) – испарение на гладкой поверхности

Fig. 13 - Graph of the dependence of the interphase velocity on the helium level.

(a) – boiling in a vertical channel $d = 14$ mm, (b) – boiling in a vertical channel $d = 16$ mm.

(1) – boiling regime along the entire length of the channel, (2) – boiling at the free phase boundary,

(3) – evaporation on a smooth surface

Они группируются следующим образом: как и следовало ожидать, испарение на гладкой поверхности происходит с относительно небольшой скоростью. Кипение по всей длине канала имеет место только при небольших глубинах погружения. Для оценки предлагается сравнить разницу между мощностью нагревателя и затратами на фазовый переход из жидкости в газообразное состояние. Мощность нагревателя определялась по показаниям АЦП (напряжение) и известному сопротивлению нихромовой нити, которое определялось при гелиевом уровне температур до начала эксперимента. Теплота на фазовый переход определяется с использованием разницы между начальным и конечным уровнем (рис.4 б и рис.7 б), временем, за которое выкипела жидкость и теплоты фазового перехода. Для каждой серии рассчитана разница между этими двумя величинами в процентном соотношении. Для кипения в канале диаметром 14 мм разница между мощностями составляет в среднем 26%, а в канале диаметром 16 мм – 23%. Определение температуры позволит в лучшей степени понять процессы, происходящие при кипении сверхтекучего гелия вблизи нагревательного элемента. При этом принимается допущение о равновесии пара

и жидкости на свободной границе раздела фаз, таким образом температура жидкости на зеркале соответствует по линии насыщения давлению пара в криостате (измеряется баратроном). Для каждой серии разность температур в жидкости рассчитывается на основании полуэмпирической теории Гортера – Мелинка с учетом изменения эффективности теплопереноса от температуры. На рис.14 представлена разница температур в столбе жидкости в зависимости от уровня гелия снаружи экспериментальной ячейки. На графике обнаруживаются области, соответствующие рассматриваемым типам кипения: при испарении минимальный тепловой поток и минимальная разница температур, а интенсивное кипение, как уже упоминалось ранее, реализуется при небольших глубинах погружения.

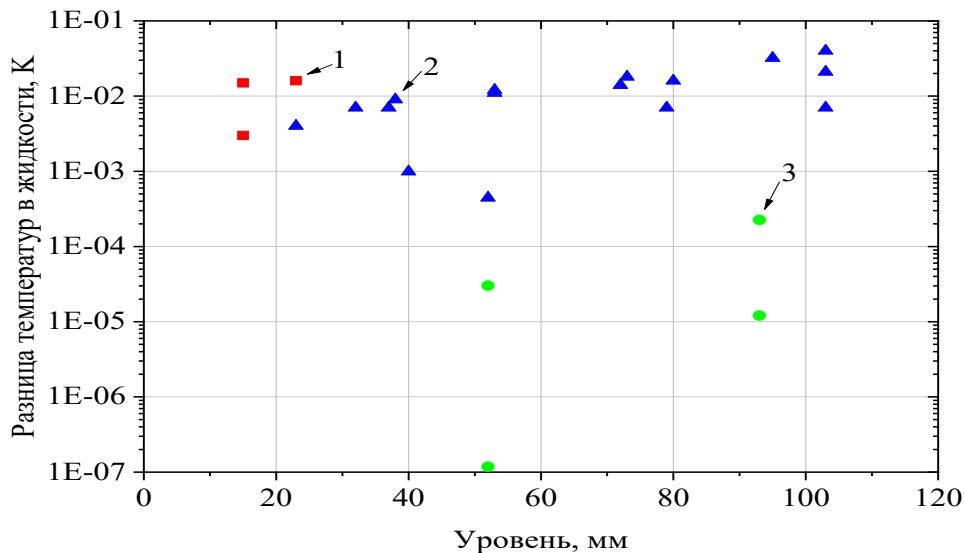


Рис. 14 - Зависимость разницы температур в столбе жидкости от уровня гелия.

(1) – режим кипения по всей длине канала, (2) – кипение на свободной границе раздела фаз,
 (3) – испарение на гладкой поверхности

Fig. 14 -Dependence of the temperature difference in the liquid column on the helium level.

(1) – boiling regime along the entire length of the channel, (2) – boiling at the free phase boundary,
 (3) – evaporation on a smooth surface

Вывод. Проведены эксперименты по кипению сверхтекучего гелия в вертикальном канале. С помощью раскадровок всех серий эксперимента классифицированы режимы кипения с разной морфологией межфазной поверхности. Построены графики зависимостей высоты уровня гелия от времени. Проведена оценка расхождений между показаниями датчиков нагрузки и теплотой на испарение. Рассмотрены особенности зарождения кипения на плоском нагревателе. Построены зависимости скорости межфазной поверхности и разницы температур в жидкости от уровня гелия и определены зоны существования режимов. Таким образом, при разработке и проектировании систем с использованием сверхтекучего гелия в качестве криоагента можно предполагать морфологию межфазной поверхности и соответствующий рабочий режим установки.

Библиографический список:

1. Takada S., Kobayashi H., Murakami M. and Kimura N. Comparative Study of Heat Transfer Performance and Visualization Images of Superfluid Helium Boiling in Narrow Two-dimensional channel// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020. № 012142.
2. 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, 2017, 89, p. 157-162. № 897 012013
3. Пузина Ю.Ю., Крюков А.П. Режимы кипения гелия II на цилиндрическом нагревателе внутри пористой структуры// Теплофизика высоких температур, 2023. Т.61, № 4, С. 619-624.
4. Bondarenko V.L., Kupriyanov M.Yu., Verkhovny A.I., Kutsko A.G., and Sirota K.K. Influence of porous medium geometric parameters on superfluid 4He entropy filter operation // Chemical and Petroleum Engineering, 2022, Vol. 58.
5. Bondarenko V.L., Gafov A.P. Estimation of cost of He-3 isotope extraction from natural helium by cryogenic methods. *Vestn. MGTU im. N.E. Bauman*, Ser. Mashinostr., 2012; 8: 54–61.

6. Allain H., Quintard M., Prat M., Baudouy B. Upscaling of superfluid helium flow in porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010; 53: 4852–4864.
7. Серебров А.П., Лямкин В.А., Фомин А.К., Онегин М.С. Источник ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия для реактора ПИК // Журнал технической физики, 2022, том 92, вып. 6.
8. Liming Zhu, Dajun Fan, Peng Zhang, Jun Wen, Yongping Hu, Xianjin Wang, Yugang Zhao, Yuxuan Wang, Junhui Zhang, Xiaofei Niu. Performance evaluation of plate heat exchangers with chevron-type corrugation pattern for the superfluid helium cryogenic system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2025, 106359.
9. Xin Zhang, Longyu Yang, Yixin Wang, Xueshuo Shang, Wendi Bao, Ziyi Li, Cheng Shao, Zheng Cui. Cryogenic helium flow in adiabatic capillary tubes: Numerical insights into choked flow and superfluid behavior in Joule-Thomson cryocoolers. // *Cryogenics*, 2025, Vol. 147.
10. Shen Y, Liu D, Chen S, Zhao Q, Liu L, Gan Z. Study on cooling capacity characteristics of an open-cycle Joule-Thomson cryocooler working at liquid helium temperature. // *Appl Therm Eng*, 2020, P. 166.
11. Qu Qianxi, Wang Liguang, Chen Huan, Dai Niannian, Jia Peng, Xu Dong, Li Laifeng. Study on flow characteristics of the cryogenic throttle valve for superfluid helium system. // *Cryogenics*, 2024, Vol. 138.
12. Lisowski E, Filo G. CFD analysis of the characteristics of a proportional flow control valve with an innovative opening shape. // *Energ Conver Manage*, 2016, V. 123, P. 15–28.
13. Jin Shang, Cui Lv, Jinzhen Wang, Huaiyu Chen, Sihao Liu, Ziwei Li, Linghui Gong, Jihao Wu. Development of cold compressors for a 500 W@2K superfluid helium refrigeration system. *Cryogenics*, 2023; 123.
14. Durañona U., Abdel Maksoud W., Baudouy B., Berriaud C., Calvelli V., Dilasser G., Lorin C., Lottin J.-P., Pontarollo T., Stacchi F. Design of a magnet to study quench propagation in a Cable-In-Conduit-Conductor filled with stagnant superfluid helium. // *Cryogenics*, 2022, Vol. 125.
15. Berriaud C, Maksoud WA, Calvelli V, Dilasser G, Juster F-P, Madur A. Conductor Design of the Madmax 9 T Large Dipole Magnet. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2020, V. 30, P. 1–5.
16. Caldwell A., Dvali G., Majorovits B., Millar A., Raffelt G., Redondo J., Reimann O., Simon F., Steffen F. Dielectric Haloscopes: A New Way to Detect Axion Dark Matter. *Physical Review Letters*, 2017, Vol.118.
17. Vitrano A., Stepanov V., Authalet G., Baudouy B. Experimental study of three-phase helium mixtures in confined channels. // *Cryogenics*, 2023, Vol. 135.
18. Vitrano A, Baudouy B. Double phase transition numerical modeling of superfluid helium for fixed non-uniform grids. // *Comput Phys Commun*, 2022, V. 273.
19. Королев П.В., Крюков А.П. Методика расчета фазового сепаратора с прямыми капиллярными каналами для разделения сверхтекучего гелия и его паров. // Вестник МЭИ, 2024. № 4, С. 133-142.
20. Korolev P.V., Kryukov A.P., Puzina Y.Y. Experimental study of the boiling of superfluid helium (he-ii) in a porous body. // *Journal of applied mechanics and technical physics*, 2017, № 4. P. 679-686
21. Puzina Yu.Yu., Kryukov A.P. Recovery heat flux at superfluid helium boiling in a U-shape channel with a porous backfill. // *Cryogenics*, 2024, V. 141, 103864.
22. Kryukov A.P., Van Sciver S.W. Calculation of the recovery heat flux from film boiling in superfluid helium. // *Cryogenics*, 1981, V. 21.
23. Kryukov A.P., Mednikov A.F. Experimental study of HE-II boiling on a sphere. // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2006. V. 47. P. 836–841.
24. 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. // *Journal of Physics: Conf. Series* 1675 (2020) 012059 doi:10.1088/1742-6596/1675/1/012059.
25. Тепло и массоперенос на межфазных поверхностях конденсат—пар. / Крюков А.П., Левашов В.Ю., Жаховский В.В., Анисимов С.И. // Успехи физических наук, 2021. Т. 191, С. 113–146.
26. Levashov V.YU., Kryukov A.P., Kusov A.L. Flow structure near an evaporation surface. // *Fluid Dynamics*, 2024. V.59. № 6, С. 1850-1859.

References:

1. Takada S., Kobayashi H., Murakami M. and Kimura N. Comparative Study of Heat Transfer Performance and Visualization Images of Superfluid Helium Boiling in Narrow Two-dimensional channel. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020. № 012142.
2. 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*, 2017; 89: 157-162. № 897 012013
3. Puzina Yu.Yu. Kryukov A.P. Boiling modes of helium II on a cylindrical heater inside a porous structure. *High temperature Thermophysics*, 2023; 6 (4): 619-624.(In Russ)
4. Bondarenko V.L., Kupriyanov M.Yu., Verkhovny A.I., Kutsko A.G., and Sirota K.K. Influence of porous medium geometric parameters on superfluid He entropy filter operation. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2022; 58.
5. Bondarenko V.L., Gafov A.P. Estimation of cost of He-3 isotope extraction from natural helium by cryogenic methods. *Vestn. MGTU im. N. E. Bauman, Ser. Mashinost.*, 2012; 8:54–61.

6. Allain H., Quintard M., Prat M., Baudouy B. Upscaling of superfluid helium flow in porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010;53: 4852–4864.
7. Serebrov A.P., Lyamkin V.A., Fomin A.K., Onegin M.S. Source of ultracold neutrons based on superfluid helium for the PIK reactor. *Journal of Technical Physics*, 2022; 92(6). (In Russ)
8. Liming Zhu, Dajun Fan, Peng Zhang, Jun Wen, Yongping Hu, Xianjin Wang, Yugang Zhao, Yuxuan Wang, Junhui Zhang, Xiaofei Niu. Performance evaluation of plate heat exchangers with chevron-type corrugation pattern for the superfluid helium cryogenic system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2025, 106359.
9. Xin Zhang, Longyu Yang, Yixin Wang, Xueshuo Shang, Wendi Bao, Ziyi Li, Cheng Shao, Zheng Cui. Cryogenic helium flow in adiabatic capillary tubes: Numerical insights into choked flow and superfluid behavior in Joule-Thomson cryocoolers. *Cryogenics*, 2025; 147.
10. Shen Y, Liu D, Chen S, Zhao Q, Liu L, Gan Z. Study on cooling capacity characteristics of an open-cycle Joule-Thomson cryocooler working at liquid helium temperature. *Appl Therm Eng*, 2020; 166.
11. Qu Qianxi, Wang Liguang, Chen Huan, Dai Niannian, Jia Peng, Xu Dong, Li Laifeng. Study on flow characteristics of the cryogenic throttle valve for superfluid helium system. *Cryogenics*, 2024; 138.
12. Lisowski E, Filo G. CFD analysis of the characteristics of a proportional flow control valve with an innovative opening shape. *Energ Conver Manage*, 2016; 123: 15–28.
13. Jin Shang, Cui Lv, Jinzhen Wang, Huaiyu Chen, Sihao Liu, Ziwei Li, Linghui Gong, Jihao Wu. Development of cold compressors for a 500 W@2 K superfluid helium refrigeration system. *Cryogenics*, 2023; 123.
14. Durañona U., Abdel Maksoud W., Baudouy B., Berriaud C., Calvelli V., Dilasser G., Lorin C., Lottin J.-P., Pontarollo T., Stacchi F. Design of a magnet to study quench propagation in a Cable-In-Conduit-Conductor filled with stagnant superfluid helium. *Cryogenics*, 2022; 125.
15. Berriaud C, Maksoud WA, Calvelli V, Dilasser G, Juster F-P, Madur A. Conductor Design of the Madmax 9 T Large Dipole Magnet. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2020; 30:1–5.
16. Caldwell A., Dvali G., Majorovits B., Millar A., Raffelt G., Redondo J., Reimann O., Simon F., Steffen F. Dielectric Haloscopes: A New Way to Detect Axion Dark Matter. *Physical Review Letters*, 2017;118
17. Vitrano A., Stepanov V., Authelet G., Baudouy B. Experimental study of three-phase helium mixtures in confined channels. *Cryogenics*, 2023; 135.
18. Vitrano A, Baudouy B. Double phase transition numerical modeling of superfluid helium for fixed non-uniform grids. *Comput Phys Commun*, 2022; 273.
19. Korolev P.V., Kryukov A.P. Calculation method of a phase separator with direct capillary channels for the separation of superfluid helium and its vapors. *Bulletin of the MPEI*, 2024; 4: 133-142.
20. Korolev P.V., Kryukov A.P., Puzina Y.Y. Experimental study of the boiling of superfluid helium (he-ii) in a porous body. *Journal of applied mechanics and technical physics*, 2017; 4: 679-686
21. Puzina Yu.Yu., Kryukov A.P. Recovery heat flux at superfluid helium boiling in a U-shape channel with a porous backfill. *Cryogenics*, 2024; 141: 103864.
22. Kryukov A.P., Van Sciver S.W. Calculation of the recovery heat flux from film boiling in superfluid helium. *Cryogenics*, 1981; 21.
23. Kryukov A.P., Mednikov A.F. Experimental study of HE-II boiling on a sphere. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2006; 47: 836–841.
24. 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. *Journal of Physics: Conf. Series* 1675 (2020) 012059 doi:10.1088/1742-6596/1675/1/012059.
25. Heat and mass transfer on the interfacial surfaces of condensate-steam. Kryukov A.P., Levashov V.Yu., Zhakhovsky V.V., Anisimov S.I. *Successes of physical sciences*, 2021;191:113–146. (In Russ)
26. Levashov V.YU., Kryukov A.P., Kusov A.L. Flow structure near an evaporation surface. *Fluid Dynamics*, 2024; 59(6): 1850-1859.

Сведения об авторах:

Илья Арсланович Корняков, аспирант, кафедра низких температур; korniyakov_99@mail.ru

Юлия Юрьевна Пузина, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой низких температур; Puzina@mpei.ru

Information about authors:

Ilya A. Korniyakov, Graduate Student, Low Temperature Department; korniyakov_99@mail.ru

Yulia Yu. Puzina, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Low Temperature Department; Puzina@mpei.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 27.07.2025.

Одобрена после рецензирования/Revised 20.08.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 01.09.2025.