

УДК 536.24

Уменьшение амплитуды колебаний границы раздела фаз гелий-II – пар при добавлении монодисперсной засыпки в U-образный канал, заполненный сверхтекучим гелием*

Ю.Ю. Пузина, А.П. Крюков

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

E-mail: Puzina2006@inbox.ru

Рассматриваются экспериментальные данные по движению сверхтекучего гелия в U-образном цилиндрическом канале, заполненном засыпкой из металлических шаров. Представлена экспериментальная ячейка, результаты проведенных исследований в виде зависимостей положения границы раздела фаз пар–жидкость от времени. Обсуждаются различия характера колебаний этой границы в свободном канале и в стесненных условиях, причины возникновения таких движений. Показано, что в канале с монодисперсной пористой структурой амплитуда колебаний значительно снижается и возможно стационарное состояние межфазной поверхности.

Ключевые слова: эксперимент, сверхтекучий гелий, колебания межфазной поверхности, канал, монодисперсная засыпка, стесненные условия.

Введение

Применение пористых покрытий и структурированных материалов позволяет интенсифицировать теплообмен в свободном объеме и на поверхности, например, при стекании пленок жидкости [1] и кипении обычных жидкостей [2]. Для сверхтекучего гелия использование пористых структур (капиллярный фильтр, гипсовые смеси) предоставляет возможность увеличить в четыре раза пиковые и восстановительные тепловые потоки по сравнению с оголенным проводом (диаметром 40 мкм) [3]. Однако различные материалы и геометрия покрытий могут по-разному влиять на характеристики теплоотдачи образцов.

Вместе с тем исследование теплопередачи в сверхтекучем гелии по-прежнему остается фундаментальной задачей, особенно для проектирования систем криостатирования сверхпроводящих магнитных устройств [4]. Поскольку гелий используется не только в погружных системах, но и в больших системах с высоким уровнем теплонагруженности, в основном с принудительной циркуляцией, важным становится описание нелинейной связи градиента температур в жидкости и теплового потока, при этом

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-29-00342).

механизм теплопередачи обусловлен противотоком нормального и сверхтекучего компонентов [5].

В работе [6] экспериментально исследовалась стационарная теплопередача в сверхтекучем гелии, находящемся внутри произвольной упаковки полиэтиленовых сфер одинакового размера (диаметром 35, 49 и 98 мкм) при температурах от 1,7 до 2,1 К. При этом для аналитического описания используется полуэмпирическая теория Гортера – Меллинка с дополнительным фактором извилистости, который учитывает пористую среду. Продолжение этих исследований [7] направлено на определение индуцированного тепловым потоком перепада давления в гелии-II в такой же пористой засыпке. Рекомендации по расчетам перепада давлений в пакете сфер позволили развить подход [8] применительно к безвихревому течению гелия-II в канале с пористой вставкой [9]. Позднее пробные эксперименты для U-образного канала со свободной монодисперсной засыпкой из металлических сфер показали, что при определенной тепловой нагрузке в канале возникают низкочастотные колебания межфазной поверхности гелий-II — пар макроскопической амплитуды [10]. Подобное поведение не следовало из аналитического описания процесса для стационарной постановки задачи [8].

Для анализа факторов, приводящих к появлению колебаний, проведены эксперименты в канале без засыпки [11]. Оказалось, что возникающие колебания обусловлены высокой эффективностью теплопередачи в жидкости, неравновесными эффектами на границе раздела фаз пар – жидкость и скоростью динамических процессов. Это показало аналитическое описание процесса [12] и сравнение с экспериментами [11].

Продолжением работы [11] стали эксперименты в U-образном канале с монодисперсной пористой засыпкой, выполненные для той же геометрии рабочего участка.

Экспериментальная ячейка и результаты исследования

Общая схема экспериментальной установки для исследования процессов тепло- и массообмена в сверхтекучем гелии, подготовка и методика заправки подробно представлены в [13]. Описание экспериментальной ячейки в виде U-образного канала, расположение и конструкция нагревателя, последовательность выполнения эксперимента приведены в [11]. В настоящей работе нижняя часть стеклянной трубки (рис. 1) заполня-



лась свободной засыпкой монодисперсных шариков диаметром 240 ± 5 мкм, изготовленных из сплава Pb 96 % Sb 4 % по технологии [14].

В результате проведения экспериментальных исследований в интервале давлений 270–5050 Па и нагрузок 3–127 кВт/м² на основании анализа видеозаписей и наблюдений за межфазной поверхностью можно выделить следующие виды характерного поведения гелия-II в U-образном канале с монодисперсной пористой засыпкой при подаче тепловой нагрузки:

- отсутствие пара на межфазной поверхности нагреватель – жидкость при низкой нагрузке (3 серии);
- образование тонкой (около 1 мм) «дрожащей» пленки с переходом в квазистационарное состояние (10 серий);

Рис. 1. Внешний вид экспериментальной ячейки.

— после образования тонкой пленки по мере роста давления и температуры жидкости в криостате начинается развитие макроколебаний межфазной поверхности с постоянной амплитудой и частотой в пределах определенного диапазона параметров (10 серий);

— возрастание амплитуды колебаний с увеличением давления (температуры жидкости), при этом рост минимального расстояния от межфазной поверхности до нагревателя (6 серий);

— уменьшение амплитуды колебаний при давлении выше 4500 Па, при переходе через λ -точку (в нормальное состояние) затухание колебаний, остановка межфазной поверхности, в дальнейшем развитие пузырькового кипения на внешней поверхности U-образного канала (5 серий). Такой же процесс наблюдался и в свободном канале.

В ходе обработки экспериментальных данных обнаружено, что колебания межфазной поверхности начинаются при определенном давлении пара P_b в криостате. На рис. 2 приведены значения давлений, при которых на видеозаписи обнаруживается начало колебаний, интервал составляет 2650–3750 Па, что соответствует равновесным температурам жидкости 1,94–2,06 К. Интересно отметить, что в этом диапазоне функция Гортера–Меллинка, связывающая градиент температуры в гелии-II с тепловым потоком, достигает своего минимума. При нагрузках менее 18,3 кВт/м² (левая нижняя точка на графике) колебания не развиваются, а на поверхности нагревателя возникает тонкая паровая пленка. При большей тепловой нагрузке нагревателя q_w минимальное давление начала колебаний также увеличивается. В рассматриваемом диапазоне параметров зависимости начала колебаний от глубины погружения не обнаружено. Для сравнения в свободном канале колебания границы раздела фаз начинаются при 11,5 кВт/м².

Развитые колебания межфазной поверхности сверхтекучего гелия в U-образном канале с засыпкой происходят аналогично свободному каналу [10]. Под воздействием теплового потока, который обуславливает возникновение разности давлений между паровой пробкой вблизи нагревателя и свободной поверхностью жидкости в криостате, межфазная поверхность движется от нагревателя, объем парового пространства возрастает. При достижении определенного размера паровой пробки ее рост прекращается, а затем начинается движение границы раздела фаз к нагревателю, т.е. паровой объем начинает уменьшаться. Межфазная поверхность пар–жидкость останавливается на некотором расстоянии от нагревателя, и процесс повторяется вновь (рис. 3, нижняя часть канала не показана).

Таким образом, реализуются колебания с постоянной амплитудой и частотой на протяжении длительного (несколько минут) времени. Отличие канала с монодисперсной засыпкой от свободного канала проявляется в следующем. В свободном канале каждое колебание сопровождается схлопыванием паровой пробки и ударом жидкости о поверхность нагревателя, при этом фиксируется характерный звук. В канале с монодисперсной засыпкой при схлопывании всегда остается паровое пространство

Рис. 2. Давление пара в криостате P_b , соответствующее началу колебаний границы раздела фаз пар–жидкость, в зависимости от теплового потока нагревателя q_w .

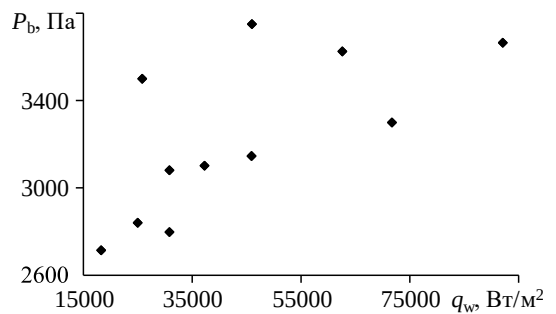




Рис. 3. Рост и уменьшение паровой пробки в канале

(интервал между снимками $\sim 0,1$ с).

$$P_b = 4400 \text{ Па}, q_w = 37,2 \text{ кВт/м}^2.$$

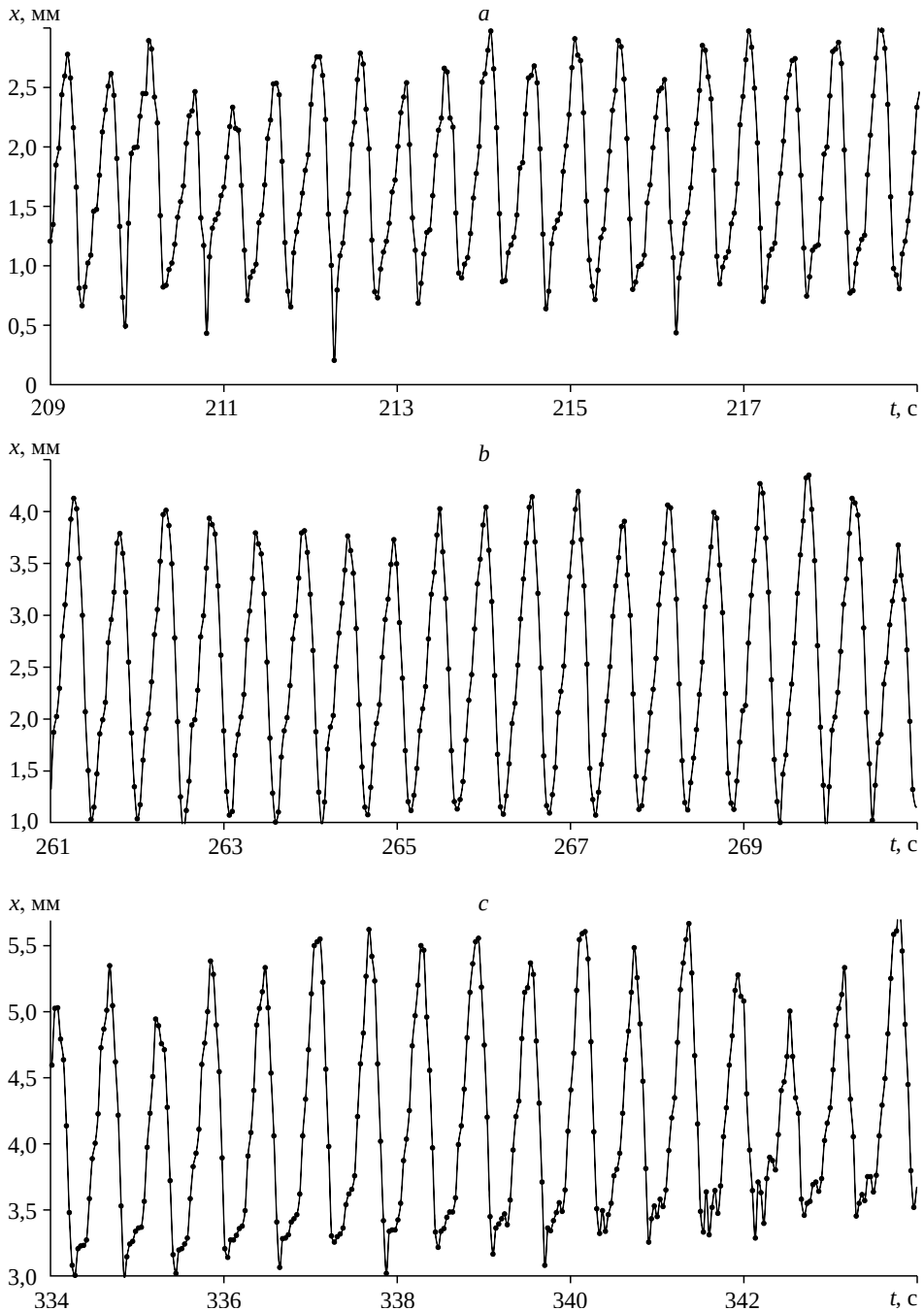
толщиной 0,5–3 мм между нагревателем и границей раздела фаз гелий-II–пар, т.е. в процессе колебаний жидкость не соприкасается с нагревателем.

По сравнению со свободным каналом, где амплитуда колебаний может превосходить видимое пространство канала (~ 90 мм), в стесненных условиях максимальная амплитуда колебаний не превосходила 8 мм при более высоких тепловых потоках.

Типичные зависимости положения границы раздела фаз от времени при разных значениях давления в криостате приведены на рис. 4 (за нуль принят момент подачи тепловой нагрузки). На основании кадров видеозаписи измеряется положение границы раздела фаз пар–жидкость в данный момент времени и обозначается точками, которые соединяются линиями для наглядности.

Для данных, приведенных на рис. 4, построены обобщающие графики (рис. 5). На рис. 5 представлены значения амплитуд и частот колебаний при различном давлении в криостате. Видно, что зависимости носят немонотонный характер. После образования тонкой пленки при подаче тепловой нагрузки $37,2 \text{ кВт/м}^2$ и давлении 550 Па проходит около 2 мин, прежде чем при давлении примерно 3100 Па межфазная поверхность начинает двигаться вверх-вниз. По мере увеличения давления пара в криостате амплитуда колебаний возрастает, при этом увеличивается и минимальное расстояние от нагревателя до границы раздела фаз пар–жидкость (см. рис. 4а, 4б). Однако при достижении давления 4500 Па амплитуда колебаний начинает снижаться, хотя расстояние до нагревателя продолжает увеличиваться (см. рис. 4а, 4с), а при переходе через λ -точку межфазная поверхность останавливается, после чего на внешней поверхности стеклянной трубки в области расположения нагревателя образуется очаг кипения нормальной жидкости.

Сравнение зависимостей на рис. 5 с аналогичными графиками на рис. 6, полученными для канала без монодисперсной засыпки [10], показывает следующее. В свободном канале амплитуда колебаний границы раздела фаз пар–жидкость монотонно снижается при увеличении давления (см. рис. 6а), так как при появлении пара межфазная поверхность сразу начинает колебаться (максимальное видимое расстояние от нагревателя до межфазной поверхности в кадре составляет 90 мм, поэтому график ограничен этим значением). В канале с монодисперсной засыпкой возникает промежуточная стадия формирования тонкой паровой пленки и ее квазистационарного состояния. Колебания начинаются только выше определенного давления (см. рис. 2). При повышении давления амплитуда колебаний возрастает (см. рис. 5а) до давления примерно 4500 Па, потом начинает снижаться. При этом на качественном уровне можно отметить, что в канале с монодисперсной засыпкой граница раздела фаз пар–жидкость представляет собой гладкую

Рис. 4. Колебания границы раздела фаз при $q_w = 37,2 \text{ кВт/м}^2$. $P_b = 4000$ (a), 4400 (b), 4800 (c) Па.

плоскую поверхность, тогда как в свободном канале при росте паровой пробки межфазная поверхность может деформироваться под влиянием инерционных сил (скорость движения до 1 м/с). Главное различие в зависимостях — существенное снижение амплитуды колебаний в канале с монодисперсной засыпкой (более чем в 10 раз) при более высоком (в 3,35 раза) по сравнению со свободным каналом уровне тепловой нагрузки.

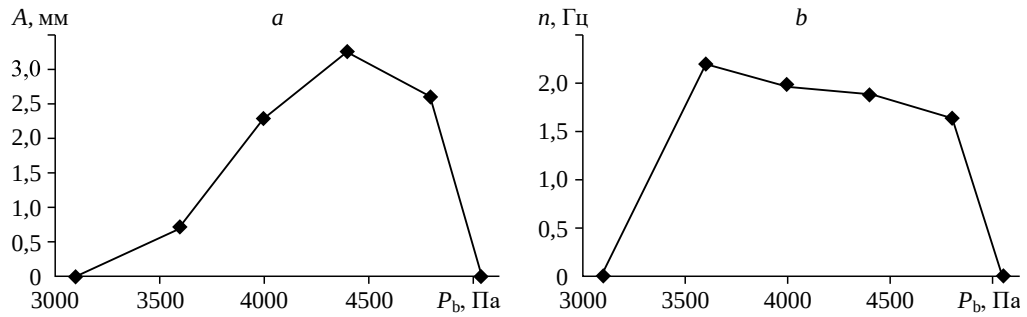


Рис. 5. Зависимость амплитуды A (a) и частоты колебаний n (b) от давления P_b в криостате $q_w = 37,2 \text{ кВт/м}^2$.

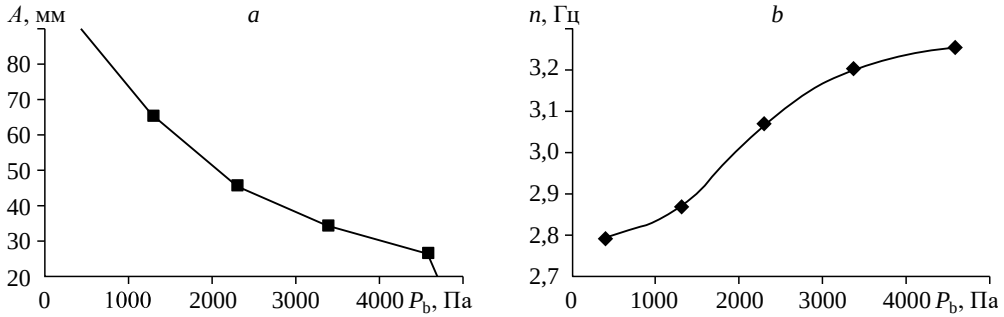


Рис. 6. Зависимость амплитуды A (a) и частоты колебаний n (b) от давления P_b в криостате для U-образного канала без монодисперсной засыпки $q_w = 11,1 \text{ кВт/м}^2$.

Частота колебаний в свободном канале увеличивается по мере уменьшения амплитуды колебаний (см. рис. 6b). В канале с монодисперсной засыпкой частота колебаний монотонно уменьшается, так же как и амплитуда (см. рис. 5b).

Колебания межфазной поверхности в канале с монодисперсной засыпкой и в канале без нее затухают при переходе через λ -точку, после которого формируется стационарная паровая пробка в канале, а на внешней поверхности рабочего канала образуется очаг кипения в месте расположения нагревателя.

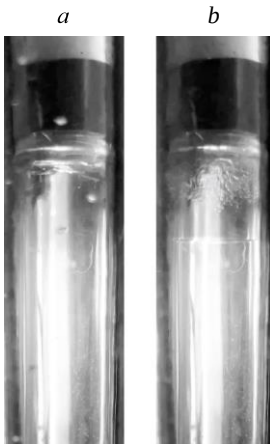


Рис. 7. Стационарное положение границы раздела фаз при $q_w = 37,2 \text{ кВт}$.

a — гелий-II, $P_b = 2300 \text{ Па}$;
b — гелий-I, $P_b = 5300 \text{ Па}$.

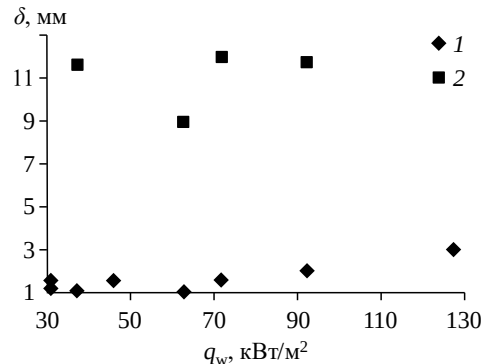


Рис. 8. Толщины стационарных паровых пленок δ при различных значениях теплового потока q_w .

1 — гелий-II, $P_b = 2300 \text{ Па}$,
2 — гелий-I, $P_b = 5300 \text{ Па}$.

Визуальное сравнение стационарных положений межфазной поверхности для гелия-II и гелия-I приведено на рис. 7, сравнение толщин стационарных паровых пленок при разных тепловых потоках нагревателя дано на рис. 8. Как видно на рис. 8, толщины стационарных паровых пленок δ для сверхтекучего гелия находятся в диапазоне 1–3 мм, тогда как при кипении обычной жидкости (гелия-I) — в интервале 9–12 мм.

На рис. 9 приведены зависимости положения границы раздела фаз от времени, выбранные для разных серий при одинаковом давлении, что позволяет проанализировать влияние теплового потока на амплитуду и частоту колебаний. Как видно из графиков, повышение тепловой нагрузки нагревателя не ведет к изменению амплитуды колебаний, а приводит к оттеснению межфазной поверхности жидкость–пар от нагревателя. Вместе с тем можно отметить и снижение однотипности колебаний для более высокого теплового потока (см. рис. 9b), что, возможно, связано с повышением частоты колебаний в 1,2 раза.

В таблице представлены основные качественные различия в характере поведения межфазной поверхности гелий-II–пар для случая свободного канала и с монодисперсной пористой засыпкой. Как следует из таблицы, монодисперсная засыпка влияет на величину теплового потока, при котором возникают колебания межфазной границы, на зависимость амплитуды и частоты колебаний от давления, на возможность достижения стационарного состояния.

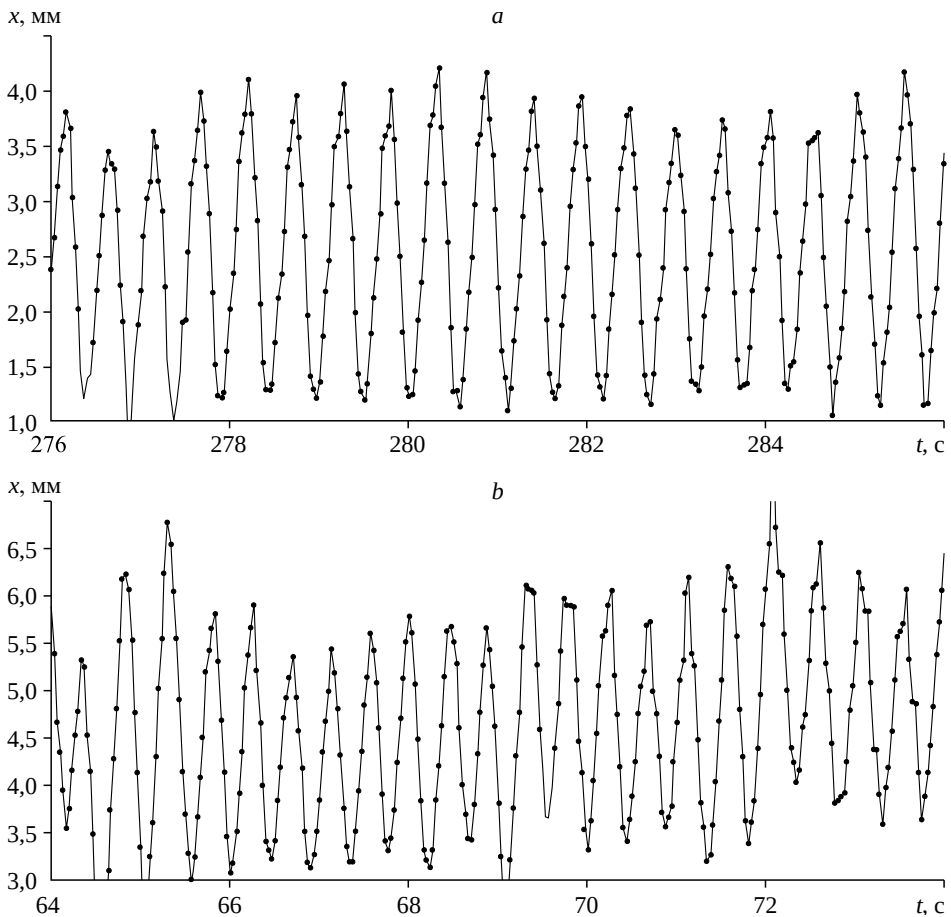


Рис. 9. Колебания границы раздела фаз при $P_b = 4400$ Па.

$q_w = 30,8$ (a), $92,1$ (b) кВт/м².

Таблица

Сравнение колебаний в свободном канале и с пористой засыпкой

Параметр сопоставления	Канал без монодисперсной засыпки	Канал с монодисперсной засыпкой
Диапазон теплового потока q_w , кВт/м ²	3–90	3–127
Возникновение колебаний	При подаче тепловой нагрузки $\geq 11,5$ кВт/м ²	При подаче тепловой нагрузки $\geq 18,3$ кВт/м ² и по достижении давления пара в криостате ≥ 2700 Па
Амплитуда	30–90 мм	≤ 8 мм
При возрастании давления в криостате	Амплитуда колебаний монотонно уменьшается	Амплитуда колебаний увеличивается, но при давлении > 4500 Па начинает уменьшаться
Стационарное состояние	Нет	Есть
При переходе через λ -точку	Межфазная поверхность останавливается, на внешней поверхности трубки происходит кипение гелия-I	

Закключение

Представлены результаты экспериментальных исследований движения межфазной поверхности гелия-II в U-образном канале, заполненном в нижней части свободной засыпкой из металлических монодисперсных гранул. Как и в случае свободного канала, при подаче тепловой нагрузки ниже определенной величины пар на поверхности нагревателя не образуется и жидкость находится в непосредственном контакте с нагревателем. Показаны стационарное состояние паровой пробки, условия начала колебаний и немонотонность зависимостей частоты и амплитуды колебаний в зависимости от давления над зеркалом жидкости (температуры жидкости в криостате). Представлены результаты обработки видеозаписей, в которых обнаружены макроскопические колебания границы раздела фаз с постоянными амплитудой и частотой. Так же как и для свободного канала, переход гелия из сверхтекучего состояния в нормальное сопровождается прекращением колебаний, формированием гладкой границы раздела фаз пар–жидкость и последующим развитием кипения на внешней поверхности стеклянной трубки. Основными отличиями от свободного канала являются возможность стационарного положения границы раздела фаз пар–жидкость и существенное снижение амплитуды колебаний при более высоком уровне тепловых нагрузок, а также снижение скорости движения границы раздела фаз гелий-II–пар.

Авторы благодарят И.А. Ячевского, И.А. Корнякова, Е.А. Евко за помощь в подготовке и организации экспериментов.

Список литературы

1. Volodin O., Pecherkin N., Pavlenko A. Combining microstructured surface and mesh covering for heat transfer enhancement in falling films of refrigerant mixture // Energies. 2023. Vol. 16. P. 782-1–782-11.

2. Дедов А.В. Обзор современных методов интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении // Теплоэнергетика. 2019. № 12. С. 18–54.

3. Arend I., Li Y.Z., Lüders K., Ruppert U. Heat flux investigations on wires coated with porous insulation in superfluid helium // Cryogenics. 1996. Vol. 36. P. 215–218.

4. Vitrano A., Baudouy B. Double phase transition numerical modeling of superfluid helium for fixed non-uniform grids // Computer Physics Communications. 2022. Vol. 273. P. 108275-1–108275-16.

5. Vitrano A., Baudouy B. Superfluid helium forced flow in the Gorter-Mellink regime // Cryogenics. 2023. Vol. 129. P. 103628-1–103628-8.

6. Vanderlaan M.H., Van Sciver S.W. Steady state He II heat transfer through random packed spheres // Cryogenics. 2013. Vol. 57. P. 166–172.

7. Vanderlaan M.H., Van Sciver S.W. He II heat transfer through random packed spheres: Pressure drop // Cryogenics. 2014. Vol. 63. P. P. 37–42.
8. Королев П.В., Крюков А.П. Движение сверхтекучего гелия в капилляре с паром при наличии продольного теплового потока // Вестн. МЭИ. 2002. № 1. С. 43–46.
9. Пузина Ю.Ю., Королев П.В., Крюков А.П. Течение гелия-II в канале с пористой вставкой при безвихревом сверхтекучем движении // Вестн. МЭИ. 2017. № 4. С. 8–14.
10. Korolyov P.V., Kryukov A.P., Puzina Yu.Yu., Yachevsky I.A. Experiments of superfluid helium flow in a channel with a monodisperse backfill // J. Phys. Conf. Series. 2020. Vol. 1683. P. 022017-1–022017-5.
11. Пузина Ю.Ю., Крюков А.П. Движение межфазной поверхности гелий II–пар в U-образном канале // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30, № 4. С. 751–762.
12. Крюков А.П., Пузина Ю.Ю. Колебания межфазной поверхности гелий II–пар при движении в канале относительно большого диаметра // Вестн. МЭИ. 2023. № 3. С. 138–144.
13. Крюков А.П., Королев П.В., Пузина Ю.Ю. Экспериментальное исследование кипения He-II внутри пористого тела // Прикл. механика и техн. физика. 2017. Т. 54, № 4. С. 126–134.
14. Анкудинов В.Б., Марухин Ю.А., Огородников В.П., Рыжков В.А. Технология получения монодисперсных сферических гранул // Металлург. 2019. № 6. С. 94–98.

*Статья поступила в редакцию 16 октября 2023 г.,
после доработки — 10 января 2024 г.,
принята к публикации 13 июня 2024 г.*