

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ
НА ПОВЕРХНОСТИ СЛОЯ ЖИДКОГО ^4He В НОРМАЛЬНОМ
И СВЕРХТЕКУЧЕМ СОСТОЯНИЯХ© 2025 г. А. А. Левченко^а, Л. П. Межов-Деглин^а, И. А. Ремизов^а,
П. Г. Селин^{а,*}, М. Р. Султанова^а^а Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна Российской академии наук
Россия, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, 2

* e-mail: selin@issp.ac.ru

Поступила в редакцию 26.06.2024 г.

После доработки 26.07.2024 г.

Принята к публикации 15.10.2024 г.

Описана конструкция установки, предназначенной для исследования особенностей взаимодействия вихревых течений, генерируемых капиллярно-гравитационными волнами на поверхности жидкого гелия ^4He в нормальном и сверхтекучем состояниях, с инжектированными зарядами. Приведен пример результатов изучения влияния порождаемых волнами вихревых течений в слое сверхтекучего гелия He-II глубиной 2.5 см при температурах $T \geq 1.5$ К на распределение токов отрицательных ионов по пяти сегментам погруженного в жидкость приемного коллектора.

DOI: 10.31857/S0032816225010231, EDN: GHZNR

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно (см., например, [1–8]), что инжектированный в жидкий ^4He свободный электрон локализуется в объеме жидкости в вакуумной полости — электронном пузырьке радиусом около $17 \text{ \AA}$ при давлении насыщенных паров. Эти отрицательно заряженные наночастицы (отрицательные ионы) можно попытаться использовать в качестве пробных частиц при изучении не только классической, но и квантовой турбулентности, порождаемой нелинейными капиллярными волнами на поверхности сверхтекучего He-II (квантовой бозе-жидкости [3, 7, 9, 10–13]).

Как было показано ранее (см., например, [3, 4]), при возбуждении квантовых вихрей в сверхтекучем He-II, охлажденном ниже температуры 1.0 К, отрицательные ионы локализуются вблизи кора вихря. Энергия связи электронного пузырька с вихревой нитью (глубина потенциальной ямы U_q) составляет $U_q \approx 50$ К, и в слабых электрических полях напряженностью $E \leq 30$ В/см можно наблюдать движение в жидкости заряженных клубков квантовых вихрей. С повышением температуры He-II до

1.65 К энергия связи отрицательных ионов с квантовыми вихрями сначала плавно уменьшается в несколько раз, а затем резко падает в узком интервале температур 1.65–1.70 К, так что при температурах выше 1.7 К энергия связи $U_q \leq 2$ К и отрицательные ионы, которые движутся в объеме He-II под влиянием приложенного электрического поля, практически не захватываются квантовыми вихрями.

В работе [14] было показано, что нелинейное взаимодействие между неколлинеарными капиллярными волнами, распространяющимися на поверхности слоя жидкости, приводит к генерации вихревого течения под поверхностью слоя. Мы воспользовались методикой, описанной в этой статье, для возбуждения вихревых течений на поверхности слоя гелия как в нормальном He-I, так и в сверхтекучем He-II состояниях [15–18].

Во втором разделе описана конструкция установки, предназначенной для изучения особенностей взаимодействия вихревых течений, генерируемых капиллярно-гравитационными волнами на поверхности жидкого ^4He , с инжектированными зарядами. Там же приведена методика

измерений. В третьем разделе показан один из результатов тестовых испытаний работоспособности установки. В Заключение кратко подведены итоги проделанной работы.

2. КОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Схема размещения основных узлов установки в объеме вакуумной полости оптического криостата приведена на рис. 1а. Рядом показана фотография металлического гелиевого криостата [16], снабженного плоскими оптическими окнами из кварцевого стекла 7 (рис. 1б). Вертикально ориентированный цилиндрический контейнер 1, в котором расположена рабочая ячейка, крепится на четырех медных хладопроводах 6 (см. рис. 1а) в вакуумной полости криостата. Контейнер 1 окружен холодным медным экраном 5, прикрепляемым к медному кольцу на дне гелиевой ванны криостата. Гелиевый экран окружен азотным экраном 4, который крепится на стенках азотной ванны криостата. Плоские кварцевые окна, установленные на азотном и гелиевом экранах, и наружные вакуумно-плотные окна 7, которые крепились на цилиндрических выносных тубусах, приваренных к обечайке криостата (7 на рис. 1б), позволяют следить за движением уровня жидкого гелия в объеме рабочей ячейки.

Методика регистрации волн, возбуждаемых колеблющимися плоскими волнопродукторами на поверхности слоя гелия в рабочей ячейке, подробно описана в работе [17]. Направленный на поверхность слоя жидкости лазерный луч от расположенного снаружи источника света 9 на рис. 1а, отражался от свободной поверхности слоя и попадал на оптический датчик 10 на рис. 1а, выход которого был подсоединен к наружной компьютеризированной системе регистрации и обработки результатов измерений. По амплитуде колебаний отраженного луча можно было судить об амплитуде колебаний волн, возбуждаемых на поверхности жидкости.

Конструкция рабочей ячейки, которая размещена внутри вертикально ориентированного цилиндрического контейнера, показана на рис. 2в. Изготовленный из нержавеющей стали контейнер 1 внутренним диаметром 150 мм и высотой 100 мм (толщина стенок 3 мм) снабжен прижимным прозрачным верхним окном 2 толщиной 3 мм, изготовленным из плавленого кварца. Для вакуумно-плотного соединения кварцевого окна 2 с верхним фланцем контейнера, а также прижимного медного диска 3 с нижним фланцем, как и окон 7 на рис. 2а, использовались пластиковые индиевые колечки. Контейнер окружен холодным экраном (см. рис. 1а) и соединен с дном гелиевой ванны криостата с помо-

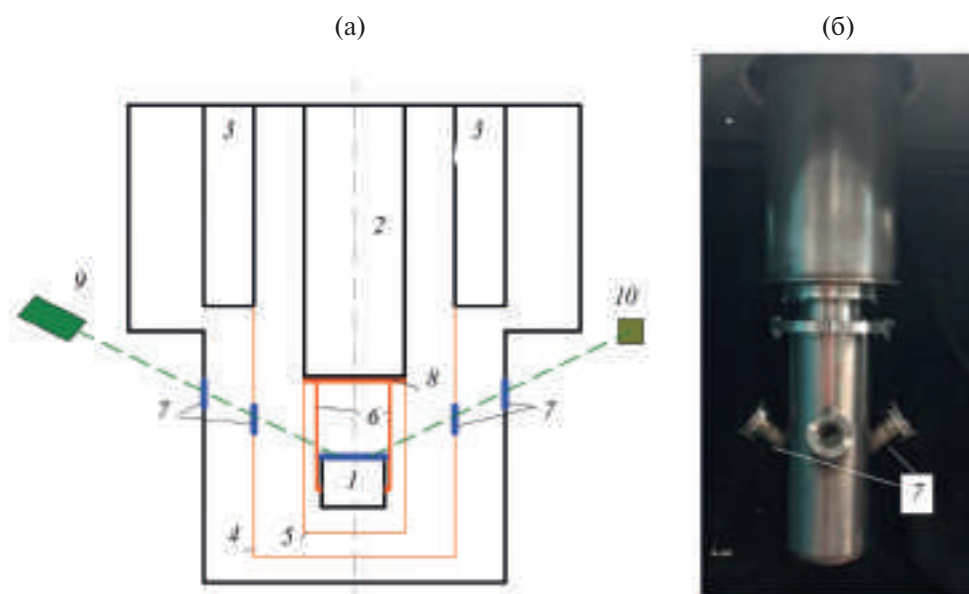


Рис. 1. а — Схема криогенной части установки: 1 — цилиндрический контейнер, 2 — гелиевая ванна криостата, 3 — азотная ванна, 4 — азотный экран, 5 — гелиевый экран, 6 — медные хладопроводы, 7 — кварцевые оптические окна, 8 — дно гелиевой ванны криостата, 9 — гелиевый лазер, 10 — полупроводниковый болометр; **б** — фотография криостата.

стью четырех медных стержней, которые служили одновременно хладопроводами.

Газообразный ^4He конденсировался в контейнер из наружного транспортного сосуда Дьюара через капилляр набора (на рис. 2в указано место ввода капилляра в контейнер), который проходил предварительно через гелиевую ванну криостата и был снабжен мелкопористым медным фильтром для предотвращения попадания посторонних твердых взвесей в объем ячейки. Набор жидкости проводили до тех пор, пока поверхность жидкости не достигала края боковых граней ячейки (уровень жидкости регистрировался с точностью порядка 0.1 мм). Температура жид-

кого гелия в ванне криостата и, соответственно, в объеме контейнера и рабочей ячейки понижалась до 1.5 К путем откачки паров жидкого гелия из ванны внешним насосом. Изменения температуры жидкого гелия в рабочей ячейке контролировали с помощью полупроводникового термометра, установленного на наружной стенке контейнера, как показано на рис. 2в.

Показанная схематически на рис. 2а, 2б рабочая ячейка крепилась внутри контейнера на восьми вертикальных латунных шпильках высотой 70 мм и диаметром 3 мм. Шпильки были предварительно ввинчены в специально выточенный кольцевой пояс в нижней части контейнера. Как видно на рис. 2б, рабочая ячейка представляла собой прямоугольный параллелепипед внутренними размерами $50 \times 50 \times 30 \text{ мм}^3$. Закрепленные на шпильках плоские боковые грани и дно ячейки были изготовлены из листового дюралюминия толщиной 2 мм. Все металлические грани были электрически изолированы от шпилек и друг от друга кварцевыми шайбами. Верхняя грань ячейки 4 (см. рис. 2а) была изготовлена из кварцевого стекла. На нижнюю поверхность кварцевой грани была заранее напылена полупрозрачная металлическая пленка.

При проведении измерений расстояние от поверхности жидкого гелия в ячейке до нижней поверхности кварцевой грани составляло 3 мм.

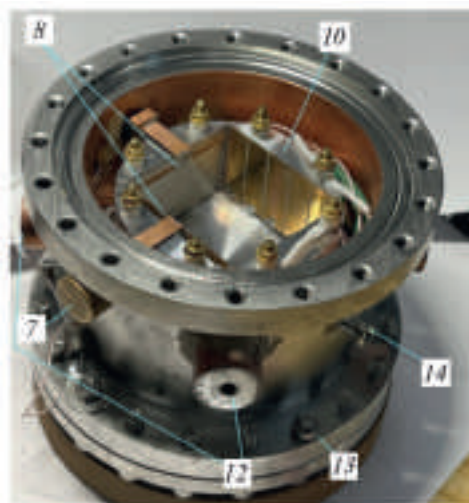
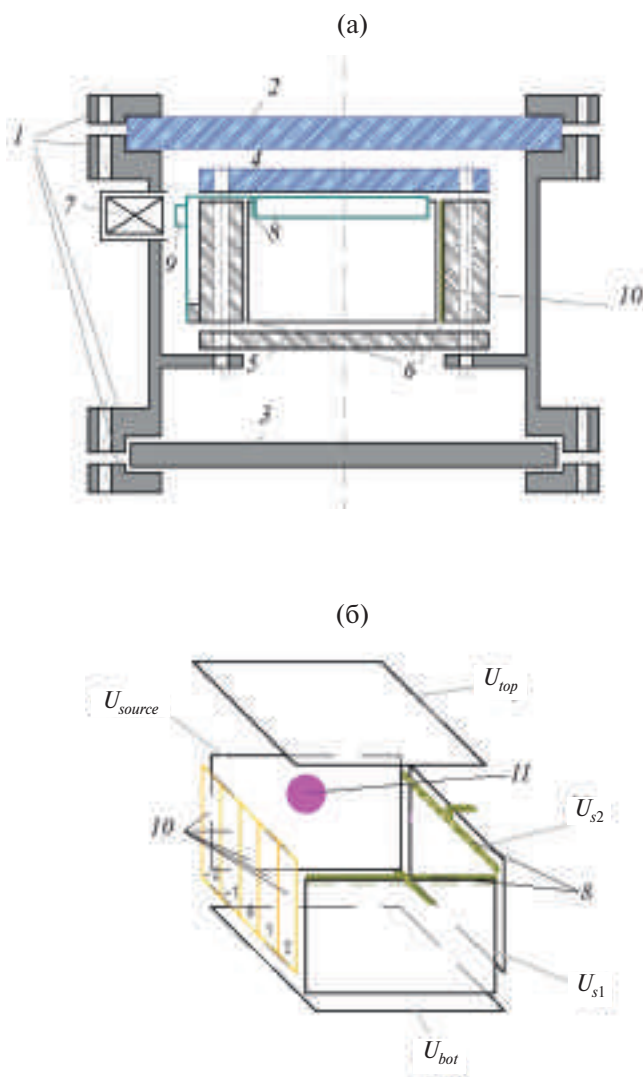


Рис. 2. а — Эскиз контейнера с экспериментальной ячейкой; б — схема экспериментальной ячейки; в — фотография ячейки в объеме контейнера: 1 — цилиндрический контейнер, 2 — прижимное прозрачное окно из кварцевого стекла, 3 — медный диск, 4 — прозрачная верхняя грань рабочей ячейки, 5 и 6 — нижняя и вертикальные боковые грани ячейки, 7 — электромагнитная катушка, 8 — плунжеры, 9 — неодимовый магнит, 10 — принимающий пяти-сегментный коллектор, 11 — источник зарядов, 12 — медные втулки для крепления хладопроводов, 13 — шайба для крепления резистивного термометра, 14 — ввод капилляра системы заполнения контейнера холодным ^4He .

Радиоактивный источник инжескированных зарядов в гелии 11 (пленка из тритида титана на металлической подложке) установлен на одной из вертикальных боковых граней ячейки (см. рис. 2а). Диаметр источника 3 мм, средняя энергия излучаемых источником β -частиц близка к 5 кэВ, максимальная примерно равна 18 кэВ. Под действием облучения в слое жидкости глубиной порядка 10 мкм вблизи источника зарядов образовывалась плазма из свободных электронов и положительно заряженных гелиевых ионов. Прикладывая отрицательные напряжения к грани, на которой установлен источник, можно было инжескировать отрицательные заряды в объем жидкого гелия.

В серии первых экспериментов [15] источник зарядов был установлен на противоположной приемному коллектору грани. При модернизации установки мы переместили источник на смежную грань [18]. Изменение расположения источника позволило получить более однородную конфигурацию поля и увеличить напряженность поля вблизи источника зарядов, что, в свою очередь, позволило увеличить поток зарядов, приходящих на коллектор. Коллектор 10 (см. рис. 2а, б) был изготовлен из листа фольгированного стеклотекстолита с медным покрытием. Внешняя сторона коллектора была приклеена к дюралюминиевой грани клеем БФ-4 и электрически изолирована от металлической грани. На медном покрытии были заранее вытравлены 4 дорожки шириной 1 мм. Таким образом, приемный коллектор состоял из пяти электрически изолированных друг от друга вертикально ориентированных приемных сегментов линейными размерами 9×30 мм², на поверхность которых перед сборкой ячейки дополнительно была напылена золотая пленка.

Каждый сегмент коллектора был подключен к независимому усилителю тока (рис. 3). Устройство усилителей тока описано в работе [19]. При проведении экспериментов суммарный коллекторный ток при различных конфигурациях поля не превышал 5000 фА. Все электрические провода, которые соединяли детали, расположенные внутри контейнера 1 (см. рис. 1а) с наружными усилителями тока и источниками напряжений системы управления и сбора данных экспериментов, проходили через герметичные разъемы со стеклянной изоляцией, которые располагались на дне контейнера 3 (см. рис. 2а).

Для возбуждения взаимно перпендикулярных волн на свободной поверхности жидкости в ячейке использовали два плоских металлических плунжера [14, 15, 18] (волнопродукторы 8 на рис. 2), основания которых были закреплены на нижней части двух смежных боковых граней. Характерные размеры плунжеров: $1 \times 3 \times 40$ мм³. Плунжеры располагались на расстоянии 3 мм от поверхности грани. Каждый плунжер приводился в движение своим электромагнитным приводом, переменное синусоидальное напряжение на который подавалось от двухканального функционального генератора (см. схему на рис. 3). Разность фаз между поступающими на плунжеры переменными напряжениями составляла 90°.

Катушка, управляющая движением плунжера, была установлена в специальном углублении (кармане) на боковой стенке контейнера 7 (см. рис. 2в), а на ножке плунжера напротив катушки клеем БФ-4 был закреплен кубик из неодимового магнита 9 (см. рис. 2а).

Плунжеры совершали возвратно-поступательное движение в горизонтальной плоскости вдоль поверхности слоя жидкого гелия. Частота накачки привода f_g в разных экспериментах составляла 20–50 Гц. Как и в работе [17], амплитуда и крутизна генерируемых на поверхности жидкости волн оценивалась по результатам измерений амплитуды колебаний отраженного от поверхности жидкости в ячейке лазерного луча (лазер и приемный детектор располагались снаружи, напротив окон криостата, как показано на рис. 1). По нашим оценкам, в большинстве проведенных измерений при накачке на частоте $f_g = 49.9$ Гц амплитуда стоячих капиллярных волн достигала $H \approx 0.02$ мм, крутизна волны достигала $kH \approx 0.06$, где k — волновой вектор.

Как показано на рис. 3, коллекторные токи, регистрируемые каждым из пяти сегментов коллектора, проходят через независимые усилители тока, далее поступают на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), и затем оцифрованный сигнал через шину PCI (peripheral component interconnect) поступает в память компьютера.

Постоянное электрическое напряжение, которое прикладывалось к разным граням параллелепипеда (см. рис. 2б), поступало от пяти независимых источников постоянного напряжения с общей землей [20]. Значения напряжений на каждой грани ячейки можно было менять от нуля до –450 В, тем самым создавая различные

конфигурации приложенного электрического поля, при которых отрицательные ионы двигались в объеме жидкого гелия от источника зарядов к приемному коллектору.

Регулировкой распределения напряжений на нижней U_{down} и верхней U_{up} гранях ячейки можно было задавать величину и направление перпендикулярной составляющей приложенного электрического поля $E_{\perp} \sim \Delta U_{\perp} / L = |U_{down} - U_{up}| / L$, где $L = 3$ см – глубина слоя жидкости в ячейке. Это позволяло “прижимать” движущиеся в жид-

кости от источника к коллектору инжектированные заряды к свободной поверхности жидкости или ко дну ячейки, чтобы усилить (или свести к минимуму) влияние вихревых течений, порождаемых волнами на поверхности слоя, на распределение токов по различным сегментам приемного коллектора. Выходные сигналы с усилителей тока $I_i(t)$ ($i = -2, -1, 0, +1, +2$) оцифровывали с помощью АЦП и записывали в память компьютера (см. рис. 3). Для выделения постоянной составляющей тока $I_i(t)$ на фоне наводок

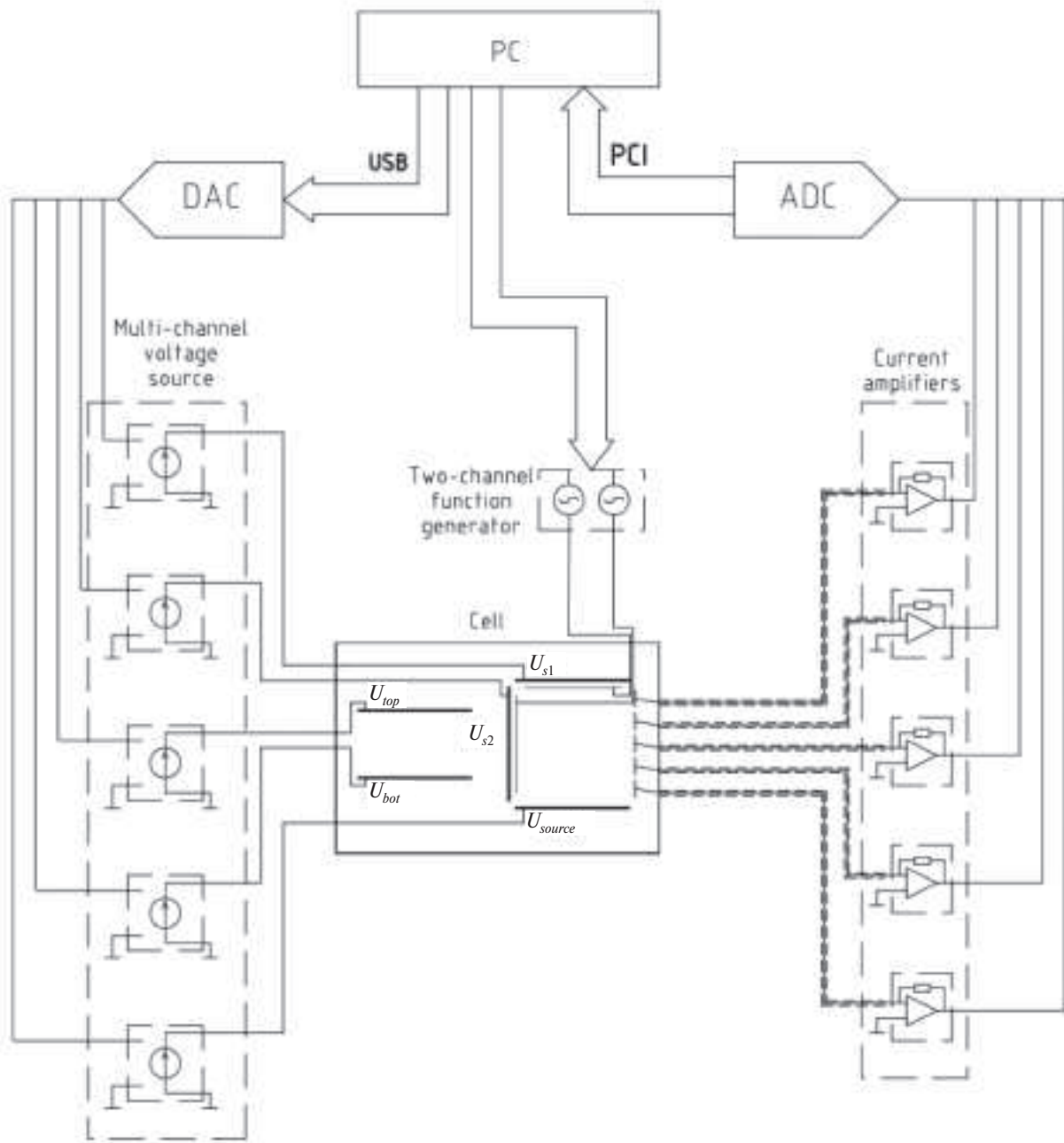


Рис. 3. Электрическая блок-схема установки.

от переменных полей, возникающих при включении колебаний плунжеров, регистрируемые зависимости $I_i(t)$ подвергались фурье-фильтрации на низких частотах.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

На рис. 4 приведен пример результатов тестовых испытаний работоспособности установки, который иллюстрирует, как изменяется с повышением температуры жидкости от 1.5 до 2.19 К распределение токов отрицательных ионов по пяти сегментам приемного коллектора $I_i(T)$ и полный ток коллектора $I_{sum}(T)$ при выключенной (пунктирные кривые) и включенной (сплошные кривые) волновой накачке на частоте $f_g = 49.9$ Гц. Длина капиллярной волны, возбуждаемой на поверхности слоя жидкости, $\lambda \approx 0.2$ см, крутизна капиллярных волн $kH \approx 0.06$.

Величина и распределение приложенных к граням рабочей ячейки постоянных напряжений при выключенной и включенной накачке одинаковы: напряжение на источнике $U_{source} = U_{s2} = -100$ В, на боковой, противоположной источнику грани напряжение $U_{s1} = 0$, напряжение на верхней грани $U_{up} = -50$ В, а на нижней $U_{down} = -100$ В. Коллектор находится под нулевым потенциалом. Движущиеся от источника зарядов к коллектору отрицательные ионы прижимаются вертикальной составляющей приложенного электрического поля к свободной поверхности слоя жидкости $E_{\perp} \sim |U_{down} - U_{up}| / L \sim 17$ В/см.

Видно, что при плавном повышении температуры предварительно охлажденного слоя He-II от 1.5 до 2.19 К распределение токов отрицательных ионов по сегментам приемного коллектора при включенной волновой накачке сильно изменяется в узком интервале температур вблизи 1.7 К, в отличие от распределения токов по сегментам в отсутствие накачки. Это может быть связано с тем, что при температурах вблизи 1.7 К вероятность захвата движущихся в слабом продольном электрическом поле электронных пузырьков квантовыми вихрями, порождаемыми неколлинеарными капиллярными волнами, экспоненциально уменьшается по сравнению с вероятностью захвата электронных пузырьков квантовыми вихрями при температурах He-II ниже 1.7 К [8], т. е. инжектированные в сверхтекучий гелий отрицательные ионы могут служить пробными частицами – трассерами для обнаружения квантовых вихрей в He-II.

При температурах выше 1.7 К, где захватом отрицательных ионов квантовыми вихрями можно пренебречь, основную роль должно играть упругое рассеяние инжектированных зарядов на вихревых структурах, например валах завихренности, которые формируются в объеме нормальной компоненты He-II так же, как и в объеме He-I при $T > T_{\lambda}$, в результате взаимодействия между обычными, классическими вихрями, порождаемыми нелинейными волнами на поверхности слоя жидкости [10, 11], а также рассеяния на клубках квантовых вихрей, возника-

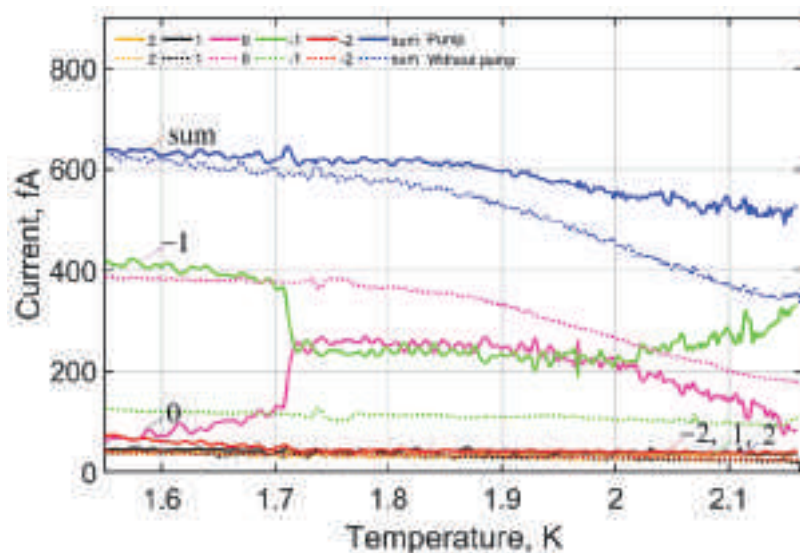


Рис. 4. Сплошные кривые описывают зависимость от температуры токов отрицательных ионов, регистрируемых центральными сегментами –1 (зеленая кривая) и 0 (сиреневая кривая) приемного коллектора при включенной волновой накачке на частоте $f_g = 49.88$ Гц. Токи, регистрируемые сегментами –2, 1 и 2, малы и слабо зависят от температуры. Синяя кривая описывает зависимость от температуры суммарного тока приемного коллектора I_{sum} .

ющих в объеме сверхтекучей компоненты He-II в результате сильного взаимодействия (трения) между нормальной и сверхтекучей компонентами при температурах выше 1 К.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установка, конструкция которой описана в данной статье, позволяет возбуждать капиллярно-гравитационные волны на поверхности жидкого ^4He и изучать взаимодействие инжектированных в жидкий гелий отрицательных зарядов (электронных пузырьков) с вихрями, порождаемыми этими волнами, в широком интервале температур от 4 до 1.5 К. Существенные изменения в распределении токов отрицательных ионов по центральным сегментам приемного коллектора при плавном повышении температуры слоя жидкости в узком интервале вблизи 1.7 К при включенной волновой накачке (см. рис. 4) могут быть связаны с изменением механизма взаимодействия электронных пузырьков с квантовыми вихрями. Это позволяет утверждать, что нелинейные капиллярные волны, распространяющиеся на поверхности сверхтекучей жидкости, возбуждают не только классические, но и квантовые вихри, т. е. разработанная и изготовленная нами установка пригодна для изучения как классической, так и квантовой турбулентности в сверхтекучем He-II.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны А.В. Лохову за помощь в создании и тестировании установки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания ИФТТ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шикин В.Б. // УФН. 1977. Т. 121. С. 457.
2. Шикин В.Б., Монарха Ю.П. Двумерные заряженные системы в гелии. М.: Наука, 1989.
3. Glaberson W.I., Strayer D.M., Donnelly R.J. // Phys. Rev. Lett. 1968. V. 20. P. 1428.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.20.1428>
4. Pratt W.P., Zimmermann W., Jr. // Phys. Rev. 1969. V. 177. P. 412.
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.177.412>
5. Кешишев К.О., Ковдря Ю.З., Межов-Деглин Л.П., Шальников А.И. // ЖЭТФ. 1969. Т. 56. С. 94.
6. Aitken F., Bonifaci N., von Haefen K., Eloranta J. // J. Chem. Phys. 2016. V. 145. 044105.
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4959293>
7. Aitken F., Bonifaci N., Mendoza-Luna L.G., von Haefen K. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2015. V. 17. P. 18535.
<https://doi.org/10.1039/C5CP02539G>
8. Walmsley P.M., Levchenko A.A., Golov A.I. // Journal of Low Temperature Physics. 2006. V. 145. P. 143.
<https://doi.org/10.1007/s10909-006-9235-3>
9. Андреев А.Ф., Компанеев Д.А. // ЖЭТФ. 1971. Т. 61. С. 2459.
10. Borghesani A.F. // International Series of Monographs on Physics. 2007. V. 137. P. 560.
11. Walmsley P.M., Golov A.I., Hall H.E., Levchenko A.A., Vinen W.F. // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 99. 265302.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.265302>
12. Eltsov V.B., de Graaf R., Hänninen R., Krusius M., Solntsev R.E., Lvov V.S., Golov A.I., Walmsley P.M. // Progress in Low Temperature Physics: Quantum Turbulence. V. 16. P. 46.
[https://doi.org/10.1016/S0079-6417\(08\)00002-4](https://doi.org/10.1016/S0079-6417(08)00002-4)
13. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. М.: Наука, 1986.
14. Filatov S.V., Parfenyev V.M., Vergeles S.S., Brazhnikov M.Yu., Levchenko A.A., Lebedev V.V. // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 116. 054501.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.054501>
15. Remizov I.A., Sultanova M.R., Levchenko A.A., Mezhev-Deglin L.P. // Low Temp. Phys. 2021. V. 47. P. 378.
<https://doi.org/10.1063/10.0004229>
16. Думе А.Ф., Межов-Деглин Л.П., Ревенко В.И. // ПТЭ. 1979. № 6. С. 160.
17. Brazhnikov M.Yu., Levchenko A.A., Mezhev-Deglin L.P. // IET. 2002. V. 45. № 6. P. 31.
<https://doi.org/10.1023/A%3A1021418819539>
18. Султанова М.Р., Ремизов И.А., Межов-Деглин Л.П., Левченко А.А. // Письма в ЖЭТФ. 2023. Т. 118. С. 596.
<https://doi.org/10.31857/S1234567823200089>
19. Ремизов И.А., Межов-Деглин Л.П., Султанова М.Р. Патент на изобретение № 2 754 201 РФ // Опул. 30.08.2021. Бюл. № 25.
20. Ремизов И.А., Межов-Деглин Л.П., Султанова М.Р. Патент на изобретение № 2 783 476 РФ // Опул. 14.11.2022. Бюл. № 32.