

СВЧ эксперименты в He II. Новые особенности незатухающих сверхтекучих потоков

А.С. Рыбалко, С.П. Рубец, Э.Я. Рудаковский, В.А. Тихий

*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина
E-mail: rybalko@ilt.kharkov.ua*

С.И. Тарапов, Р.В. Головащенко, В.Н. Деркач

Институт радиофизики и электроники НАН Украины, ул. Ак. Проскуры, 12, г. Харьков, 61085, Украина

Статья поступила в редакцию 11 марта 2008 г.

Проведено экспериментальное исследование устойчивости и колебательных свойств сверхтекучего кольцевого потока, возникающего вокруг цилиндрической поверхности дискового диэлектрического резонатора, погруженного в жидкий гелий. Скорость сверхтекучего потока контролировалась с помощью специальных тепловых пушек, находящихся в He II и генерирующих протитоки нормальной и сверхтекучей компонент, направленные по касательной к цилиндрической поверхности резонатора. В эксперименте измерялась амплитуда СВЧ сигнала, прошедшего через резонатор, и изучалось влияние на его амплитуду фазового и динамического состояния жидкости. Обнаружено, что в состоянии He II наблюдаются периодические осцилляции сигнала, причем каждый период начинается с острого всплеска амплитуды. Предполагается, что такое поведение означает потерю устойчивости сверхтекучего кольцевого потока, связанную с изменением числа квантов циркуляции сверхтекучей скорости за очень короткое время. Другой эффект обусловлен появлением в системе новых периодически повторяющихся резонансных пиков наряду с обычными модами шепчущей галереи. Эффект отсутствовал выше λ -точки, и предполагается, что он вызван собственными колебательными модами незатухающего сверхтекучего потока. Анализируются возможные причины наблюдаемых особенностей.

Проведено експериментальне дослідження стійкості та коливальних властивостей надплинного кільцевого потоку, який виникає навколо циліндричної поверхні дискового діелектричного резонатора, зануреного в рідкий гелій. Швидкість надплинного потоку контролювалася за допомогою спеціальних теплових гармат, які знаходилися в He II та генерували протитоки нормальної та надплинної компонент, направлених по дотичній до циліндричної поверхні резонатора. В експерименті вимірювалася амплітуда СВЧ сигналу, який проходив крізь резонатор, та вивчався вплив на його амплітуду фазового та динамічного стану рідини. Виявлено, що у стані He II спостерігаються періодичні осциляції сигналу, причому кожний період починається з гострого сплеску амплітуди. Припускається, що така поведінка означає втрату стійкості надплинного кільцевого потоку, яка пов'язана зі зміною числа квантів циркуляції надплинної швидкості за дуже малий проміжок часу. Інший ефект обумовлений появою у системі нових резонансних піків, що періодично повторюються, поряд зі звичайними модами галереї, яка шепотить. Ефект був відсутній вище λ -точки, та припускається, що він пов'язаний з власними коливальними модами надплинного потоку, який не затухає. Аналізуються можливі причини особливостей, що спостерігаються.

PACS: 67.10.Hk Квантовые эффекты в структуре и динамика невырожденных жидкостей;
67.30.eh Транспорт и гидродинамика.

Ключевые слова: сверхтекучий гелий, диэлектрический резонатор, шепчущая галерея.

1. Введение

В последнее время в экспериментах со вторым звуком [1] и с торсионным осциллятором в He II [2] была обнаружена электрическая активность сверхтекучего гелия. Эффект оказался неожиданным, поскольку атом гелия не обладает собственным дипольным моментом. А.М. Косевич был первым теоретиком, кто откликнулся на эти результаты и предложил модель [3] для описания электрических эффектов в сверхтекучей жидкости. Он предположил, что сверхтекучее состояние — это упорядоченное состояние изотропного квадрупольного момента, которое при наличии неоднородного сверхтекучего потока может проявлять электрические свойства. Затем появились другие теоретические работы, в которых предлагалась идея инерционной поляризации атомов гелия за счет ускорения [4], вихревая модель возникновения электрической поляризации He II [5,6], пирозлектрическая модель [7], а также модель, использующая представление о сверхтекучей компоненте как о суперпозиции двух сильно взаимодействующих когерентных бозе-конденсатов (ядерного и электронного) [8].

В настоящее время, хотя уже предложено несколько теоретических объяснений электрической активности сверхтекучего гелия, вполне удовлетворительной модели пока нет. Поэтому очень важным представляется получение новых экспериментальных фактов с использованием различных методик эксперимента. Недавно в опытах по рассеянию электромагнитных волн сверхвысокой частоты (СВЧ) в сверхтекучем гелии [9–11] было обнаружено резонансное поглощение СВЧ волны на ротонной частоте, которое сменяется индуцированным излучением СВЧ фотонов при наличии в He II искусственно создаваемого сверхтекучего потока. При этом сверхтекучий поток оказывал низкочастотное воздействие на СВЧ волну, что внешне проявлялось как модуляция СВЧ колебаний.

В экспериментах [9–11] изучались СВЧ моды шепчущей галереи диэлектрического дискового резонатора, погруженного в жидкий гелий, а сверхтекучий поток вокруг цилиндрической поверхности резонатора создавался с помощью специальных тепловых пушек. Такой сверхтекучий поток представляет собой макроскопическое квантовое образование, где циркуляция скорости сверхтекучей компоненты v_s квантуется в единицах \hbar/m , где m — масса атома гелия. Однако до сих пор оставались неизученными многие свойства самого сверхтекучего потока и прежде всего его устойчивость. Выяснение этих особенностей — цель данной работы. В этом случае СВЧ колебания являются удобным зондом, который позволяет регистрировать различные процессы, протекающие в сверхтекучем потоке.

2. Методика эксперимента

Все СВЧ эксперименты проводились с использованием дискового диэлектрического резонатора, который описан в работах [9–11]. При подаче СВЧ сигнала в резонатор генерировались моды шепчущей галереи, которые в условиях данного эксперимента можно рассматривать как бегущие по кромке диска волны с напряженностью электрического поля, направленной перпендикулярно его боковой поверхности. Кроме того, в резонаторе также присутствовала стоячая волна, однако ее амплитуда составляла всего ~1% от амплитуды бегущей волны. Несколько отличалась лишь электронная блок-схема, которая приведена на рис. 1.

В эксперименте использовался модуляционный метод СВЧ измерений. Непрерывный СВЧ сигнал, вырабатываемый генератором 1, поступал на модулятор 2, где с помощью низкочастотного синусоидального напряжения, подаваемого с генератора 3, проводилась модуляция СВЧ сигнала по амплитуде. Затем модулированный сигнал через аттенюатор 4 и волновод 5 подавался на дисковый диэлектрический резонатор 6, откуда через приемный волновод 7 поступал на детектор 8 и усилитель 9. В качестве последнего использовался Lock-in 5204, что позволило повысить чувствительность измерений. При этом амплитуда выделенного на детекторе низкочастотного сигнала пропорциональна амплитуде СВЧ сигнала. Таким образом, в эксперименте измерялась амплитуда сигнала, прошедшего через резонатор, погруженный в жидкий гелий, и изучалось влияние на этот сигнал фазового и динамического состояния жидкости в окрестности боковой поверхности диска.

Как и в работе [11], распространение электромагнитных волн в He II исследовалось в условиях, когда в жидкости искусственно создавались встречные потоки нормальной и сверхтекучей компонент с помощью

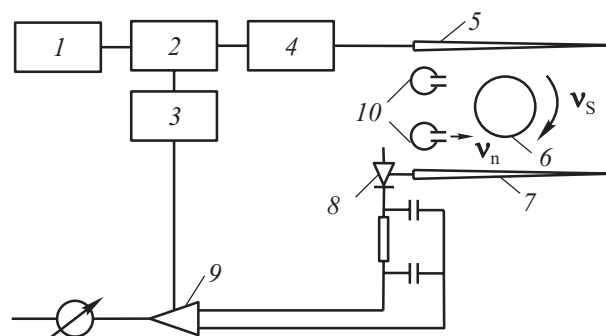


Рис. 1. Блок-схема СВЧ измерений: 1 — СВЧ генератор; 2 — модулятор; 3 — генератор низкой частоты; 4 — аттенюатор; 5 — возбуждающий волновод; 6 — дисковый диэлектрический резонатор; 7 — приемный волновод; 8 — детектор; 9 — усилитель; 10 — «тепловые пушки».

тепловых пушек. Тепловые пушки представляли собой теплоизолированные колбы, соединенные с внешней гелиевой ванной соплом и содержащие внутри нагреватели и термометры. Тепловой поток, создаваемый нагревателем пушки, генерировал противоток нормальной и сверхтекучей компонент. При этом каждое сопло ориентировано таким образом, чтобы потоки были направлены по касательной к цилиндрической поверхности резонатора. Режим работы тепловой пушки определялся выбором параметров — мощности, подаваемой на нагреватель, и размера сопла. Выделяемая мощность в нагревателе не должна была выводить рефрижератор из нормального режима работы, а площадь плоского нагревателя выбиралась из расчета 10^{-3} Вт/см², чтобы на поверхности его не образовывались пузырьки. Площадь сопла пушки выбиралась такой, чтобы тепловой поток в сопле не превышал 10 Вт/см², а поверхность сопла была гладкой и не содержала выступов, которые могут стать местом возникновения вихрей.

3. Осцилляции амплитуды сигнала при длительном воздействии теплового потока

Уже первые эксперименты, в которых была обнаружена электрическая активность He II [1], показали, что переменное электрическое поле может возбуждать в He II второй звук, т.е. вызывать относительное движение нормальной и сверхтекучей компонент. Полученный результат позволил предположить, что при распространении электромагнитных волн в He II электрическая компонента волны будет также генерировать потоки сверхтекучей и нормальной компонент. В СВЧ экспериментах с использованием мод шепчущей галереи на жидкий гелий вблизи боковой поверхности резонатора действует сложная система пондеромоторных сил, которые обусловлены градиентом электрического поля. Такие силы «втягивают» диэлектрическую жидкость в эту область и возбуждают в ней колебания давления и скоростей. При включенной тепловой пушке можно ожидать, что создаваемый ею поток нормальной компоненты тормозится вблизи поверхности резонатора, а встречный поток сверхтекучей компоненты трансформируется в вихревое течение с квантованной циркуляцией вокруг резонатора, что приводит к дополнительным особенностям взаимодействия СВЧ волны с жидкостью.

Проведенные СВЧ эксперименты [9–11] подтвердили наличие взаимодействия электромагнитной волны с He II и позволили высказать предположение о возникновении незатухающего сверхтекучего кольцевого потока. В пользу этого свидетельствовали следующие экспериментальные факты:

1) аномальное поведение, гистерезис и изменения амплитуды СВЧ сигнала при первом охлаждении жид-

кости ниже λ -точки и последующем отогреве в область He I [9];

2) возникающий сверхтекучий поток можно усилить или ослабить с помощью тепловых пушек [10,11];

3) все наблюдаемые аномальные эффекты проявляются только в сверхтекучей области (ниже λ -точки).

Поскольку используемый в эксперименте диэлектрический дисковый резонатор может регистрировать процессы, происходящие в He II на расстоянии от цилиндрической поверхности резонатора порядка длины волны шепчущей галереи (1,5–7 мм), то речь идет о циркулирующем сверхтекучем потоке в слое соответствующего размера.

В данной работе исследовано влияние тепловых потоков большей мощности при их более длительном воздействии и в условиях, когда частота колебаний была далека от роторного резонанса (при несущей частоте 66–174 ГГц). Типичный пример такой зависимости приведен на рис. 2 для одной из мод шепчущей галереи. Начальный момент времени соответствовал состоянию, когда нагреватель тепловой пушки был выключен, а амплитуда моды в резонансе имела некоторое стационарное значение A_0 . При этом приемный усилитель ρ (рис. 1) был настроен на частоту модуляции $\omega_m = 434$ Гц.

В момент времени, отмеченный на рис. 2 стрелкой 1, на нагреватель тепловой пушки подавалась мощность \dot{Q} , которая увеличивалась линейно со временем в течение 5 мин (рис. 2,б). В течение этого времени амплитуда $A(t)$ СВЧ сигнала вначале уменьшалась, а затем, пройдя через весьма острый минимум, достигала нового стационарного значения A_1 , которое было меньше A_0 . Качественно такое поведение можно объяснить следующим образом. После включения тепло-

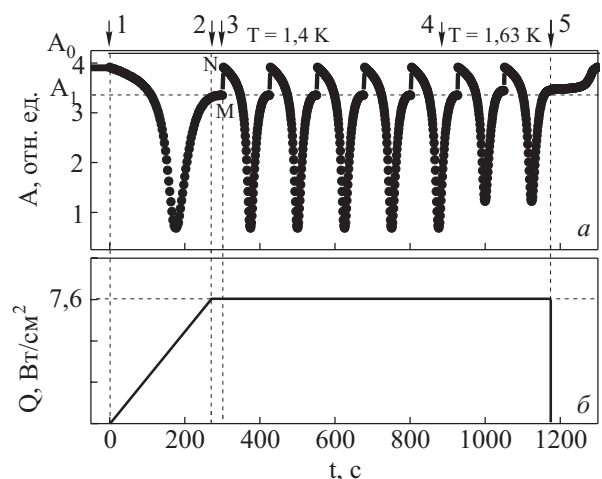


Рис. 2. Кинетика изменения амплитуды СВЧ сигнала с несущей частотой 173,36 ГГц (а) и подаваемой мощности при длительном воздействии теплового потока (б). Объяснения в тексте.

вой пушки незатухающий сверхтекучий поток вокруг поверхности резонатора оказывает низкочастотное воздействие на СВЧ волну, проявляющееся как низкочастотная модуляция СВЧ колебаний. При этом частота модуляции Ω , как было установлено ранее [11], растет с ростом мощности \dot{Q} , и в тот момент, когда величина Ω совпадала с частотой ω_m , на которую был настроен приемный усилитель, наблюдался минимум сигнала $A(t)$ (рис. 2,а). Отметим, что если усилитель настроить на другую частоту модуляции ω_m , то максимум сигнала $A(t)$ достигался при другом значении \dot{Q} . Этот факт служил дополнительным доказательством того, что вокруг дискового резонатора уже сформировался круговой сверхтекучий поток.

После того как амплитуда сигнала $A(t)$ достигала нового стационарного значения A_1 (этот момент времени отмечен стрелкой 2, рис. 2,а), мощность, подаваемая на нагреватель тепловой пушки, стабилизировалась. При этом амплитуда сигнала была постоянной в течение ~ 10 с (в масштабе рис. 2 этого не видно) вплоть до момента времени 3. После этого наблюдалось anomальное поведение амплитуды сигнала: сначала она возростала скачком до значения A_0 (участок MN), не изменялась в течение ~ 20 с, а затем уменьшалась, проходя через такой же острый минимум. Этот процесс повторялся со строгой периодичностью до тех пор, пока поддерживалась стационарная температура жидкости.

В момент времени 4 температуру He II повышали скачком с 1,4 до 1,63 К, однако осцилляции амплитуды продолжались. Они носили качественно такой же характер, лишь несколько уменьшилась амплитуда сигнала в минимуме. В момент времени 5 тепловая пушка была выключена, после чего осцилляции прекратились, а амплитуда сигнала за несколько минут практически вернулась к своему исходному значению A_0 . В некоторых случаях возврат к значению A_0 происходил так же быстро, как и на участке 2–3 (рис. 2). При изменении частоты амплитудной модуляции СВЧ сигнала на более высокую минимум сигнала на кривой смещался вправо. Выше λ -точки все описанные выше эффекты отсутствовали, что свидетельствует о том, что необычные осцилляции СВЧ сигнала связаны с влиянием циркулирующего сверхтекучего потока вокруг резонатора.

Характер описанной аномалии был бы неполным без регистрации быстротекущих процессов, происходящих в момент времени 2. Для этой цели в приемной части вместо усилителя 9 (рис. 1) был включен быстродействующий запоминающий осциллограф, время развертки которого составляло $0-2 \cdot 10^{-6}$ с, а также удален выходной фильтр детекторной секции. Это позволило зарегистрировать кинетику процесса, происходящего в момент времени 3 (рис. 3). Как видно на

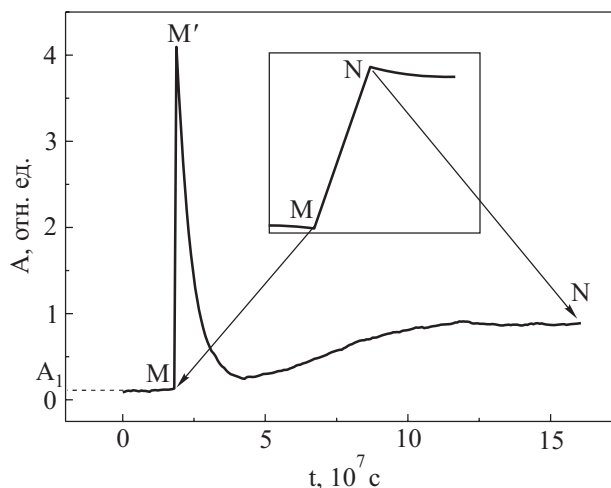


Рис. 3. Кинетика быстродействующего процесса, начавшегося в момент времени 3. На вставке показан соответствующий участок на рис. 2, снятый с усилителя низкой частоты.

рисунке, амплитуда $A(t)$ резко возростала (в ~ 2 раза) в момент 3 с постоянной времени $\sim 10^{-8}$ с, которая ограничивалась постоянной времени детектора δ . При этом максимальное значение амплитуды в момент ее резкого возрастания было намного больше, чем исходная амплитуда в вакууме и тем более в жидкости. Последующее плавное увеличение амплитуды сигнала от значения A_1 до A_0 определялось постоянной времени резонатора.

Период между аномалиями для режима, приведенного на рис. 2, составлял 125 с. При уменьшении мощности, подаваемой на нагреватель тепловой пушки от 7 до 6,3 Вт/см² в сопле, время между скачками увеличилось на 14 с. Кинетика изменения амплитуды модулированного СВЧ сигнала при воздействии постоянного по мощности теплового потока (рис. 2) показывает, что после того, как циркуляция сверхтекучего потока изменилась скачком, за определенный промежуток времени восстанавливалась прежняя циркуляция потока, поскольку тепловая пушка продолжала работать. После этого весь процесс повторялся снова, и так происходило многократно до тех пор, пока подавалась мощность на нагреватель пушки.

Для объяснения наблюдаемого поведения амплитуды СВЧ сигнала можно предположить, что в момент времени 3 (рис. 2) циркулирующий сверхтекучий поток становится неустойчивым, и на участке MN происходит скачок циркуляции сверхтекучей скорости. Время, за которое происходил переход сверхтекучего потока в состояние с другим значением циркуляции, составляет $\sim 10^{-8}$ с, что на несколько порядков меньше, чем если бы процесс происходил со скоростью звука. Это позволяет предположить, что происходит не разрушение сверхтекучего потока, а лишь измене-

ние количества квантов циркуляции. По-видимому, этот процесс имеет не механическое, а электромагнитное происхождение, и, следовательно, существует связь электромагнитного поля бегущей волны шепчущей галереи с движением жидкости.

Зарегистрированный в работе эффект в какой-то мере аналогичен явлению проскальзывания фазы сверхтекучего потока, наблюдавшегося ранее в экспериментах с He II [12,13] при продавливании жидкости через узкое отверстие. Авторы [12,13] также наблюдали осцилляции амплитуды сигнала, измеряя механический отклик мембраны на процессы, происходящие в He II, в отличие от настоящей работы, где регистрировался электродинамический отклик. Процесс проскальзывания фазы в экспериментах [12,13] происходил быстро, однако используемая в работах аппаратура не позволяла сделать количественные оценки времени проскальзывания. Что же касается электродинамического отклика, то, как следует из рис. 3, в этом случае возможна регистрация быстро протекающих процессов. Наблюдаемая зависимость периода осцилляций от мощности потока, генерированного пушкой, позволяет предположить, что в эксперименте наблюдается быстрое изменение квантованной циркуляции, похожее на проскальзывание фазы.

Сверхтекучий поток, возникающий вокруг поверхности резонатора, очень чувствителен к наличию относительного движения резонатора и потока даже при неработающих пушках. Для проверки этого факта производился легкий толчок криостата, что вызывало собственные колебания консоли длиной ~1 м, на которой подвешена криогенная часть рефрижератора вместе с резонатором. При этом резонатор перемещался относительно кольца и, как видно на рис. 4, это вызывало затухающие осцилляции амплитуды СВЧ сигнала с частотой 0,5 Гц. Если же подобную операцию провести выше λ -точки, то никаких изменений амплитуды сигнала не зарегистрировано. Полученные результаты также доказывают, что сверхтекучий поток является независимой инерционной системой. Тот факт, что амплитуды СВЧ сигналов до и после толчка равны по величине, свидетельствует о неразрушении макроскопического квантового состояния. Отметим, что наличие осцилляций амплитуды СВЧ сигнала, вызванных вибрациями системы, может служить методом неразрушающего контроля сверхтекучего потока.

Еще одним фактором, влияющим на устойчивость сверхтекучего потока, могут быть квантованные вихри, которые легко рождаются в He II. Для проверки возможного влияния этого фактора был проведен специальный эксперимент, в котором вихри в жидкости создавались искусственно с помощью колеблющейся пластины размером 0,5×1 см, прикрепленной к якорю электромагнита. Последний располагался на расстоя-

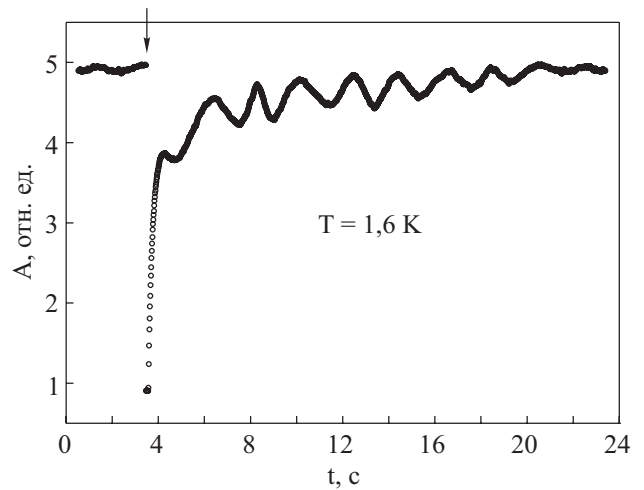


Рис. 4. Изменение амплитуды СВЧ сигнала в He II после легкого толчка криостата (стрелкой отмечен момент внешнего воздействия).

нии 3 см от поверхности дискового резонатора, что исключало его влияние на добротность резонатора. Величина колебаний пластины подбиралась в He I такой, чтобы при работающей пушке вызываемые ими осцилляции амплитуды сигнала не превышали шумовую дорожку более чем в 2 раза. Если кольцевой сверхтекучий поток был уже сформирован и затем включался электромагнит, генерирующий вихри, то амплитуда сигнала соответствовала значению в He I, что означало разрушение сверхтекучего потока. Также не удавалось создать циркулирующий сверхтекучий поток при работающих одновременно пушке и колеблющейся пластине. Если же систему, находящуюся в состоянии He I, т.е. в отсутствие сверхтекучести кольца, охлаждать в область He II при работающем электромагните, то амплитуда СВЧ сигнала не изменялась, что означало, что сверхтекучий поток так и не возник. Таким образом, проведенные предварительные эксперименты показали, что при генерации вихрей достаточной интенсивности сверхтекучий кольцевой поток может быть разрушен. Указанный круг вопросов требует более детального исследования.

4. Наблюдение дополнительных резонансных пиков в He II

При исследовании спектра мод шепчущей галереи после погружения резонатора в He II были обнаружены дополнительные резонансные пики, которые появлялись с периодической последовательностью между пиками, соответствующими азимутальным модам шепчущей галереи (рис. 5). Эти пики отсутствовали при измерениях в вакууме, а также в экспериментах с He I. При низкой температуре добротность дополнительных резонансных пиков достигала 2000, а их фор-

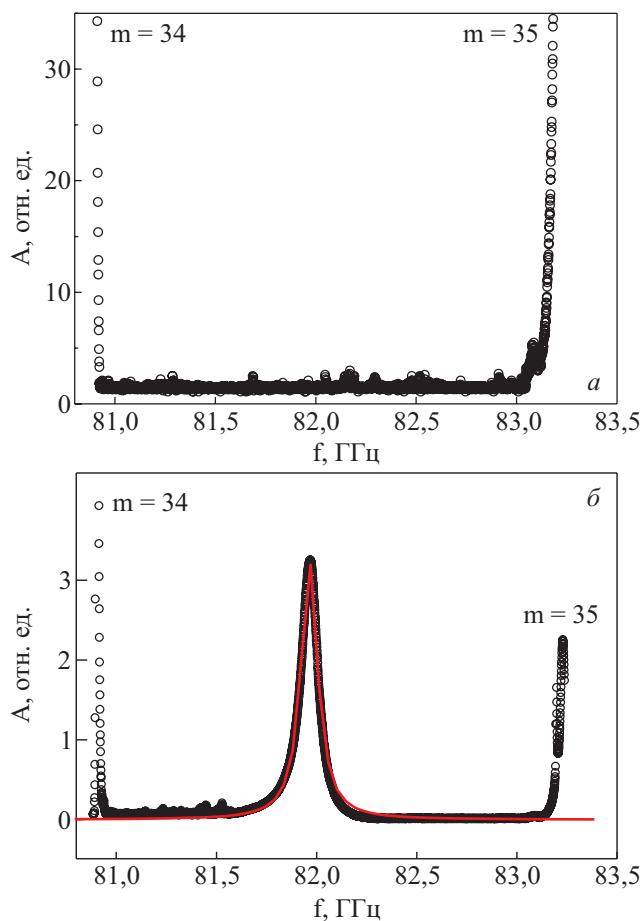


Рис. 5. Собственные резонансные моды шепчущей галереи и сверхтекучего кольца между ними при T, K : 2,35 (а) и 1,4 (б). Сплошная линия — аппроксимация резонансной кривой лоренцианом.

ма хорошо аппроксимировалась лоренцианом, что видно на рис. 5. Амплитуда пиков в максимуме была в 100–1000 раз меньше, чем амплитуда соседних мод шепчущей галереи.

При включении тепловой пушки добротность дополнительных пиков заметно уменьшалась (рис. 6), а в момент неустойчивости кольца, описанном в разд. 3, они исчезали. Аналогичное исчезновение дополнительных пиков можно было наблюдать и при одновременном включении двух тепловых пушек, действующих в противоположных направлениях, что вызывало полное торможение потока. Появление таких дополнительных пиков естественно связать с наличием сверхтекучей жидкости, в частности, с существованием сверхтекучего потока вокруг цилиндрической поверхности резонатора.

Расстояния по частоте между соседними дополнительными пиками были приблизительно одинаковыми и составляли 3,76 ГГц, в то время как разность частот между смежными азимутальными пиками шепчущей галереи была 2,30 ГГц. Отметим, что после замены кварцевого резонатора лейкосапфировым резонато-

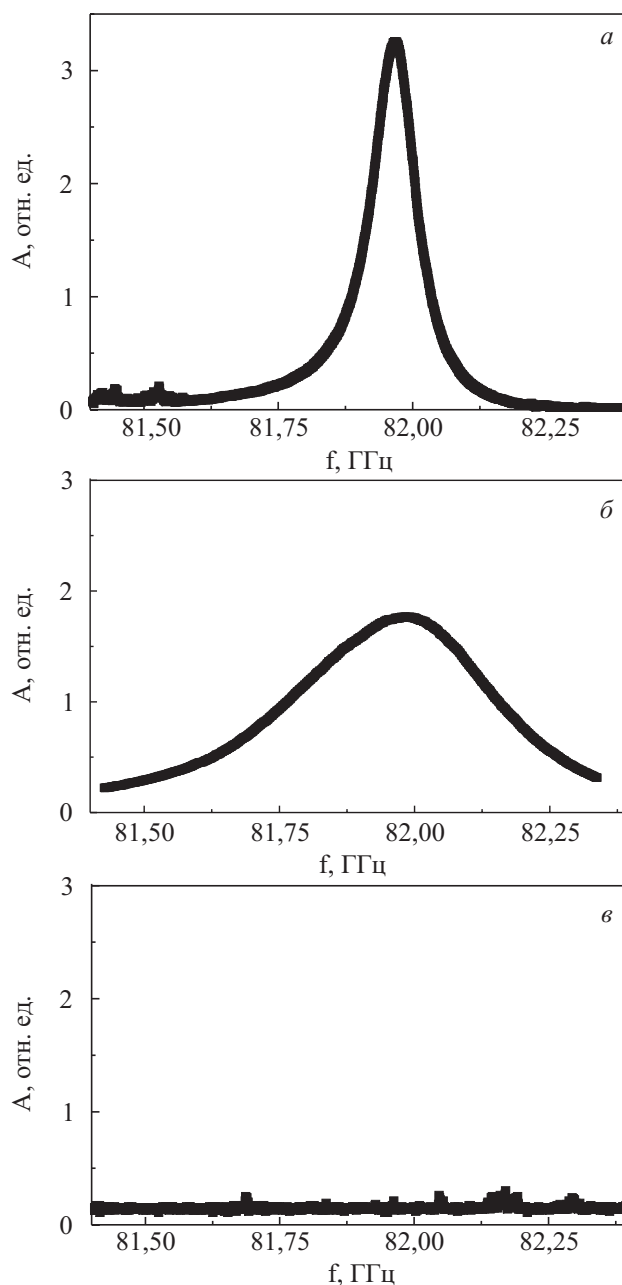


Рис. 6. Влияние мощности теплового потока пушки \dot{Q} на одну из собственных резонансных мод сверхтекучего кольца при $\dot{Q}, \text{Вт/см}^2$: 0 (а); 1(б); 8 (в). $T = 1,4 K$.

ром диаметром 20 мм также наблюдались дополнительные пики, но расстояние между смежными пиками было несколько большим.

Одна из причин появления дополнительных резонансных пиков может быть связана с тем, что моды шепчущей галереи возбуждаются не только в диэлектрическом дисковом резонаторе, но и в прилегающей к нему области сверхтекучего гелия. Другими словами, речь идет об образовании дополнительного резонатора радиусом R с модами шепчущей галереи, связанного со сверхтекучим кольцевым потоком. В связи с наличием в этой области относительного движения

нормальной и сверхтекучей компонент, как было показано в работе [14], должна наблюдаться анизотропия диэлектрической проницаемости. Возможно, различия между диэлектрическими проницаемостями гелия в кольцевом потоке и оставшейся объемной жидкости было достаточно для возбуждения в этом волноводе собственных колебательных мод. Этот вопрос требует специального рассмотрения. Пока было проведено лишь моделирование этой ситуации путем помещения вокруг дискового резонатора кольца из фторопласта. В этом случае, как и ожидалось, наблюдались собственные резонансные моды этого фторопластового кольца.

5. Заключение

Эксперименты, описанные в данной статье, показали, что СВЧ техника — весьма эффективное средство исследования сверхтекучих систем. Речь идет не только о прямом взаимодействии СВЧ фотонов с элементарными возбуждениями He II [9–11], но и об использовании мод шепчущей галереи в качестве зонда для изучения других процессов, происходящих в сверхтекучем гелии.

Описание гидродинамических полей вокруг резонатора, возбужденных электрическим полем СВЧ волны, и вычисление диссипации энергии СВЧ сигнала в гелии — сложные гидродинамические задачи, формулировка и решение которых в настоящее время отсутствуют. Можно высказать только некоторые качественные соображения относительно этих процессов. Если жидкий гелий находится в нормальном состоянии (He I), то действие пондеромоторных сил должно приводить к излучению кромкой резонатора волн первого звука и диссипации энергии СВЧ волны, обусловленной вязкостью жидкости и потоком звуковой энергии от резонатора. В He II СВЧ волна шепчущей галереи должна возбуждать в окрестности кромки дискового резонатора более сложные и разнообразные гидродинамические процессы. Кроме излучения первого и второго звуков в радиальном направлении, возможно также возбуждение микроскопических вихревых колец на кромке диска и макроскопического квантованного потока сверхтекучей компоненты вокруг резонатора. Такому разнообразию гидродинамических процессов должен соответствовать и другой уровень диссипации энергии СВЧ сигнала в He II по сравнению с He I. Кроме того, спонтанная и индукционная поляризация вихрей и вихревых колец в He II, рассмотренная в работах [5,6], может приводить к эффекту электромагнитного излучения при зарождении, аннигиляции и нестационарного перемещения вихревых возбуждений. В отсутствие детально разработанной теории перечисленных выше процессов эти соображения можно рассматривать как качественную

интерпретацию описанных в данной статье экспериментальных наблюдений.

Неожиданной оказалась неустойчивость сверхтекучего кольцевого потока, которая, возможно, связана с изменением числа квантов циркуляции или с проскальзыванием фазы волновой функции сверхтекучего потока. Не исключено, что неустойчивость инициируется за счет вращения Земли. В этом плане предполагается проведение дополнительных экспериментов для изучения возможного влияния вращения Земли на время жизни сверхтекучего потока. Ранее влияние вращения Земли на состояние сверхтекучего потока в He II исследовалось в работах группы Паккарда [15,16]. Авторам удалось создать сверхтекучий гироскоп, являющийся аналогом сверхпроводящего радиочастотного СКВИДа, и использовать это устройство для определения скорости вращения Земли. Возможно, аналогичное устройство может быть создано и на основе системы, исследованной в данной работе.

Незатухающий сверхтекучий поток можно рассматривать как опорную инерциальную систему отсчета, или как гироскоп, находящийся в вакууме [17–19]. Что же касается дискового резонатора, то его положение изменяется в меру вращения Земли, что может вызывать прецессию, деформацию и искажение сверхтекучего кольцевого потока [5,6]. Возможно, этого оказывается достаточно для развития неустойчивости кольца с данным значением циркуляции, а новое сверхтекучее кольцо теперь создается вокруг нового положения дискового резонатора, поскольку вместе с резонатором поворачивается электромагнитное поле и тепловая пушка.

Другой новый эффект, наблюдаемый в работе, — это появление дополнительных резонансных пиков в спектре мод шепчущей галереи при переходе системы в сверхтекучее состояние. Эти пики нуждаются в идентификации.

Авторы благодарят И.Н. Адаменко, В.Н. Григорьева, А. Куклова, В.А. Майданова, Ю.П. Монарху, Ю.М. Полуэктова, С.С. Соколова, Е.С. Сыркина, С.И. Шевченко за полезные дискуссии. Особая благодарность В.Д. Нацкику за конструктивные замечания к тексту статьи.

Работа выполнена при поддержке грантов CRDF (проект 2853) и УНТЦ (проект 3718).

1. А.С. Рыбалко, *ФНТ* **30**, 1321 (2004).
2. А.С. Рыбалко, С.П. Рубец, *ФНТ* **31**, 820 (2005).
3. А.М. Косевич, *ФНТ* **31**, 50 (2005); там же, 1100 (2005).
4. L.A. Melnikovsky, *Cond-mat/0505102*, v. 1, 2 (2005).
5. В.Д. Нацик, *ФНТ* **33**, 1319 (2007); там же **34**, 625 (2008).
6. В.М. Локтев, М.Д. Томченко, *ФНТ* **34**, 7 (2008).

7. В.Д. Ходусов, *Вісник Харк. Університету, серія фізична «Ядра, частини, поля»* № 642, 79 (2004); *там же* № 721, 31 (2006).
8. Э.А. Пашицкий, С.М. Рябченко, *ФНТ* **33**, 12 (2007).
9. А. Rybalko, S. Rubets, E. Rudavskii, V. Tikhii, V. Derkach, and S. Tarapov, *J. Low Temp. Phys.* **148**, 527 (2007).
10. А. Rybalko, S. Rubets, E. Rudavskii, V. Tikhii, S. Tarapov, R. Golovashchenko, and V. Derkach, *Phys. Rev.* **B76**, 140503 (2007).
11. А.С. Рыбалко, С.П. Рубец, Э.Я. Рудаковский, В.А. Тихий, Р.В. Головащенко, В.Н. Деркач, С.И. Тарапов, *ФНТ* **34**, 326 (2008).
12. E. Varoquaux, J. Avenel, and M. Meisel, *Can. J. Phys.* **65**, 1377 (1987).
13. E. Hoskinson, Y. Sato, I. Hahn, and R.E. Packard, *Nature Phys.* **2**, 23 (2006).
14. А.Ф. Андреев, *Письма ЖЭТФ* **31**, 191 (1980).
15. K. Schwab, B. Bruckner, and R.E. Packard, *Nature* **386**, 585 (1997).
16. K. Schwab, B. Bruckner, and R.E. Packard, *Fiz. Nizk. Temp.* **24**, 143 (1998).
17. J. Anandan, *Phys. Rev. Lett.* **47**, 463 (1981).
18. M. Cerdonio and S. Vitale, *Phys. Rev.* **B29**, 481 (1984).
19. R.E. Packard and S. Vitale, *Phys. Rev.* **B46**, 3540 (1992).

Microwave experiments in He II. New peculiarities of persistent superflows

A.S. Rybalko, S.P. Rubets, E.Ya. Rudavskii,
V.A. Tikhii, S.A. Tarapov,
R.V. Golovashchenko, and V.N. Derkach

The experimental study of stability and oscillating properties of a superfluid ring flow arising

around the cylindrical surface of a disk dielectric resonator immersed in liquid helium was carried out. The superflow velocity was controlled with special thermal guns located in He II and generating the counterflows of normal and superfluid components oriented tangentially to the resonator surface. In the experiment, the amplitude of a microwave signal passed through the resonator was measured and the influence of phase and dynamic state of the liquid on the amplitude was studied. It is found that in He II one can observe periodic signal oscillations with each of the periods starting from a very sharp amplitude splash. It is suggested that such a behavior of the signal is connected with a loss of stability of the ring superflow due to a change in the number of circulation quanta of the superfluid velocity in a very short time interval. Other effect consists in observing in the system new recurrent resonance peaks along with the familiar whispering gallery modes. The effect was not observed at temperatures above the λ -point. One can suggest that it is connected with hypothetical oscillating modes of the persistent flow. Some possible reasons for the peculiarities observed are analyzed.

PACS: 67.10.Hk Quantum effects on the structure and dynamics of nondegenerate fluids;
67.30.eh Transport and hydrodynamics.

Keywords: superfluid helium, dielectric resonator, whispering gallery.