

Взаимодействие электромагнитных волн сверхвысокой частоты со сверхтекучим потоком в He II

А.С. Рыбалко¹, С.П. Рубец¹, Э.Я. Рудаковский¹, В.А. Тихий¹,
Р. Головащенко², В.Н. Деркач², С.И. Тарапов²

¹Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина
E-mail: rybalko@ilt.kharkov.ua

²Институт радиофизики и электроники НАН Украины
ул. Проскуры, 12, г. Харьков, 61085, Украина

Статья поступила в редакцию 13 ноября 2007 г.

Экспериментально исследовано поглощение электромагнитных волн в жидком гелии в области частот 40–200 ГГц и температур 1,4–2,8 К. Проведено регистрирование спектра колебаний мод «шепчущей галереи» диэлектрического дискового резонатора, который был погружен в жидкий гелий. Сверхтекучие потоки в He II были созданы искусственно с помощью двух «тепловых пушек». Обнаружена узкая линия поглощения СВЧ волны при частоте, соответствующей энергии одиночного ротонного возбуждения. Установлено, что с ростом скорости сверхтекучего потока v_s радикально изменяется характер резонансной линии: поглощение СВЧ фотонов сменяется их индуцированным излучением, что видно по резкому усилению высокочастотного сигнала. Наблюдаемый эффект можно качественно объяснить в рамках двухуровневой модели He II. Обнаружено ступенчатое изменение скорости сверхтекучего потока при непрерывном увеличении мощности, подаваемой на нагреватель пушки, что может свидетельствовать о квантовании величины v_s . Показано, что сверхтекучий поток оказывает низкочастотное воздействие на СВЧ волну, которое внешне проявляется как модуляция СВЧ колебаний. Проанализированы возможные причины этого эффекта.

Експериментально досліджено поглинання електромагнітних хвиль у рідкому гелії в області частот 40–200 ГГц і температур 1,4–2,8 К. Проведено реєстрування спектра коливань мод «галереї, що шепотить» діелектричного дискового резонатора, що був занурений у рідкий гелій. Надплинні потоки в He II було створено штучно за допомогою двох «теплових гармат». Виявлено вузьку лінію поглинання НВЧ хвилі при частоті, що відповідає енергії одиночного ротонного збудження. Встановлено, що з ростом швидкості надплинного потоку v_s радикально змінюється характер резонансної лінії: поглинання НВЧ фотонів змінюється їхнім індукованим випромінюванням, що видно по різкому підсиленню високочастотного сигналу. Спостережуваний ефект можна якісно пояснити у рамках дворівневої моделі He II. Виявлено ступінчасту зміну швидкості надплинного потоку при безперервному збільшенні потужності, що подається на нагрівач гармати, що може свідчити про квантування величини v_s . Показано, що надплинний потік здійснює низькочастотну дію на НВЧ хвилю, яка зовнішньо проявляється як модуляція НВЧ коливань. Проаналізовано можливі причини цього ефекту.

PACS: 67.10.Hk Влияние квантовых эффектов на структуру и динамику невырожденных жидкостей;
67.30.eh Перенос и гидродинамика.

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

1. Введение

Недавно обнаружены новые неожиданные особенности в электрических свойствах сверхтекучего гелия

[1,2], связанные с возникновением электрической индукции в волне второго звука, а также в торсионных экспериментах. Поскольку механизм связи между электрическими и механическими явлениями в He II

остается пока непонятным, представляется важным накопление новых экспериментальных фактов в этом направлении.

Одним из возможных механизмов появления электрической индукции в He II может быть поляризация атомов гелия ускорением линейным [3] и/или центробежным [4]. Тогда при наличии относительного движения нормальной и сверхтекучей компонент может возникать процесс смещения зарядов и появление динамических дипольных моментов атома. Это, в свою очередь, может привести к ряду особенностей при рассеянии электромагнитных волн в He II. По этой причине были начаты эксперименты с электромагнитными волнами сверхвысокой частоты (СВЧ), сравнимой с энергией элементарных возбуждений в He II [5,6]. Ранее СВЧ эксперименты в He II проводили при двух фиксированных частотах 36 ГГц [7] и 72 ГГц [8], были обнаружены особенности в поглощении волны лишь вблизи λ -точки.

СВЧ эксперименты [5,6] дали новый неожиданный результат. Наряду с обычными диэлектрическими потерями в жидкости обнаружено резонансное поглощение электромагнитной волны на частоте, соответствующей минимальной энергии ротона. Показано, что при повышении температуры резонансная частота понижается, а ее температурная зависимость хорошо согласуется с температурной зависимостью ротонной щели, полученной из нейтронных экспериментов. Что же касается закона сохранения импульса, то в условиях эксперимента за счет наличия границы между сверхтекучим гелием и диэлектрическим резонатором реализовался пространственно неоднородный случай. В таких условиях можно полагать, что в процессе взаимодействия электромагнитной волны со сверхтекучим гелием наряду с ротонами в He II вблизи стенки рождаются также фононы в твердом теле резонатора [5,6].

Отметим, что СВЧ эксперименты [5,6] также подтвердили существование связи между электрическими и механическими процессами в сверхтекучем гелии. Действительно, можно предположить в соответствии с результатами работы [1], что электрическая компонента электромагнитной волны индуцирует относительное колебательное движение нормальной и сверхтекучей компонент He II вокруг резонатора. А далее благодаря поляризации жидкости должно происходить взаимодействие электромагнитной волны со сверхтекучим потоком. При этом характер взаимодействия СВЧ волны со сверхтекучим потоком должен существенно зависеть от его скорости. Для проверки этого утверждения представлялось целесообразным продолжить эксперименты [5,6], добавив в них один важный элемент — наличие независимого сверхтекучего потока, скорость которого можно было контроли-

ровать. Результаты таких экспериментов составляют содержание настоящей работы.

2. Методика эксперимента

Используемая в работе экспериментальная установка состояла из двух частей — системы электродинамических измерений характеристик He II и системы создания направленных потоков в жидкости. Кратко первая часть установки была описана в статьях [5,6], а подробная ее схема приведена на рис. 1.

Основным элементом первой системы был погружаемый в сверхтекучий гелий дисковый диэлектрический резонатор 1, в котором возбуждались волны «шепчущей галереи» [8–10], распространяющиеся вокруг его цилиндрической поверхности. В качестве элементов возбуждения использовали диэлектрические прямоугольные волноводы 2, нагруженные на согласованную нагрузку. Концы диэлектрических волноводов были покрашены смесью угольного порошка и клея БФ-2. Размеры покрашенной области и плотность смеси подбирали так, чтобы свести к минимуму отраженную волну. Вторым прямоугольным концом антенны были герметично вклеены в полые металлические волноводы 3, выходящие из криостата. Диэлектрические волноводы (антенны) 2 располагали в плоскости диска 1 с диаметрально противоположных сторон и ориентировали так, что вектор электрической компоненты возбуждающего поля был перпендикулярен оси диска.

Таким образом, задавалось выделенное направление распространения волны в резонаторе и возбуждалась бегущая в прямом направлении волна. Если

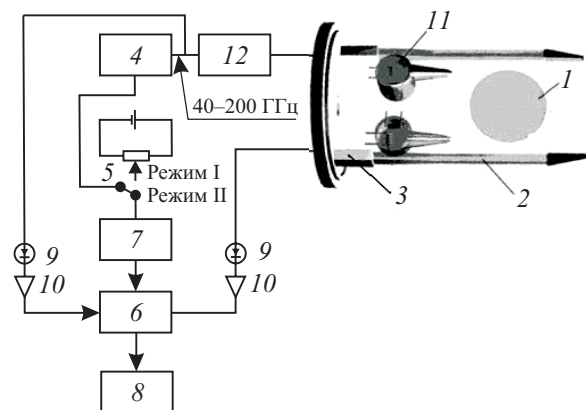


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 — диэлектрический дисковый резонатор; 2 — диэлектрические волноводы; 3 — полые металлические волноводы; 4 — генератор электромагнитных волн СВЧ; 5 — переключатель режима работы; 6 — приемный модуль; 7 — блок сопряжения; 8 — персональный компьютер; 9 — детектор; 10 — усилитель; 11 — теплоизолированные колбы с нагревателями и термометрами; 12 — аттенуатор.

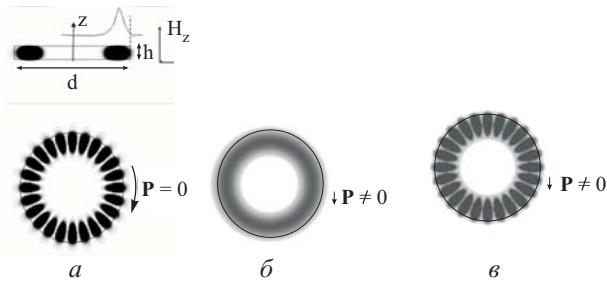


Рис. 2. Распределение электромагнитной энергии в диэлектрическом резонаторе: стоячая волна «шепчущей галереи» (темные области соответствуют пучностям) (а), резонансная бегущая волна (б), случай, реализованный в эксперименте (суперпозиция стоячей и резонансно бегущей волн) (в).

вдоль образующей дискового резонатора укладывалось целое число волн, то бегущая волна «шепчущей галереи» становилась резонансной. При этом вектор Пойнтинга $\mathbf{P} = [\mathbf{E} \times \mathbf{H}]$ такой волны совпадает с направлением движения волны.

Если же в резонаторе по каким-либо причинам возникла другая бегущая волна, движущаяся в обратном направлении, то при равных амплитудах обеих бегущих волн устанавливалась стоячая волна. На рис. 2,а показано распределение энергии такой волны в диэлектрическом резонаторе. В этом случае вектор Пойнтинга такой волны равен нулю. Распределение электромагнитной энергии для первого сценария, когда возбуждается только резонансная бегущая волна, показано на рис. 2,б. При этом вектор Пойнтинга отличен от нуля. Однако реализация чистой бегущей волны требует отсутствия в волноводе 2 отраженной волны, что обычно выполнить очень сложно. Поэтому в условиях данного эксперимента в дисковом резонаторе возникали две бегущих волны, движущиеся в противоположных направлениях, причем обратная (отраженная) волна имела меньшую амплитуду. В результате суперпозиции этих волн на фоне бегущей резонансной волны возникала стоячая волна ~20 дБ меньшей амплитуды.

Сам резонатор был изготовлен из высококачественного кристаллического кварца, в котором главная кристаллографическая ось располагалась вдоль оси цилиндра. Диаметр резонатора d и его толщину h выбирали из условий генерации высокочастотных мод «шепчущей галереи» [9]: $d \geq m\lambda_0\sqrt{3}/(\pi\sqrt{\epsilon})$, $h \leq \lambda_0/\sqrt{\epsilon}$, где λ_0 — длина волны в вакууме, m — азимутальный индекс моды, ϵ — диэлектрическая проницаемость материала резонатора. Использовали резонатор с $d = 19,00$ мм и толщиной $h = 1,00$ мм, что позволило уверенно регистрировать азимутальные моды «шепчущей галереи» типа HE_{mn} .

При измерении поглощения электромагнитной волны, как известно, для обеспечения оптимального согласования измерительного устройства с исследуемым объектом необходимо, чтобы их волновые сопротивления были сравнимы. В связи с тем, что при низких температурах добротность резонатора (а значит, и его волновое сопротивление R) сильно возрастала, было необходимо ограничить рост R с понижением температуры. Для этой цели расстояния между антеннами 2 и резонатором 1 подбирались такими, чтобы волноводы вносили дополнительные потери и добротность резонатора Q в вакууме ограничивалась сверху значением $3 \cdot 10^6$.

В эксперименте резонатор располагали горизонтально в камере, заполняемой жидким гелием. Крепление резонатора осуществляли посредством подпружиненных металлических стержней, расположенных в центре диска. При работе резонатора на модах «шепчущей галереи» влияние этих стержней на его резонансные свойства было минимальным.

Для возбуждения резонатора использовали набор генераторов 4, перекрывающий частотный диапазон 40–200 ГГц, причем нижний предел диапазона ограничивался пропусканием волноводов. В эксперименте можно было использовать два режима работы: «режим II» сканирования частоты грубо, точно и прецизионно и «режим I» фиксированной частоты. Включение нужного режима осуществлялось с помощью переключателя 5 (рис. 1).

Спектр электромагнитных колебаний системы, представлявший собой множество радиальных и азимутальных мод, регистрировали на экране монитора 8 в виде спектральных характеристик в реальном времени. В данных экспериментах использовали лишь азимутальные моды (моды «шепчущей галереи») типа HE_{mn} с радиальным индексом $n = 1$ и азимутальным индексом $m = 17-85$. Интервал частот между смежными модами для данного резонатора ~2,3 ГГц, а шаг перестройки частоты резонатора задавался блоком сопряжения 7 и обычно составлял в грубом режиме 1–10 МГц, в точном режиме — 30–140 кГц в зависимости от используемого генератора. Особое внимание уделялось частотной стабилизации генераторов. Для этого генератор предварительно прогревали при необходимом напряжении управления в течение длительного времени. В дальнейшем, чтобы не нарушать тепловой режим лампы обратной волны генератора, напряжение ее питания изменялось в пределах нескольких милливольт на фоне 1000–1500 В со скоростью 100 Гц/с. Это позволяло за короткое время реализовать прецизионный режим работы и наблюдать отдельные детали спектра моды.

Для возбуждения в He II относительного движения нормальной и сверхтекучей компонент использовали

метод теплового потока, предложенный и реализованный Капицей [11]. В экспериментальной ячейке располагались две теплоизолированные колбы II (рис. 1), содержащие нагреватель и термометр и соединенные с гелиевой ванной через сопло. При включении нагревателя возникал тепловой поток, генерирующий встречное движение нормальной и сверхтекучей компонент He II. При этом поток сверхтекучей компоненты был направлен в сторону нагревателя, а встречный поток нормальной компоненты вырывался из сопла. Важно, что скорость потоков можно было контролировать, изменяя мощность \dot{Q} , подаваемую на нагреватель.

В самом узком месте тепловой пушки — в ее сопле (имеющем сечение $10 \text{ мкм} \times 1 \text{ мм}$) связь между \dot{Q} и скоростями нормальной и сверхтекучей компонент v_n и v_s выражается соотношением [12]:

$$\dot{Q} = \rho S T v_n = \rho_s S T (v_n - v_s) \quad (1)$$

(здесь S энтропия на единицу массы) справедливым, если при включении нагревателя «тепловой пушки» создается противоток нормальной и сверхтекучей компонент без результирующего переноса вещества:

$$\rho_n v_n + \rho_s v_s = 0. \quad (2)$$

Из соотношений (1) и (2) следует, что при $T = 1,4 \text{ К}$ и $\dot{Q} = 7 \text{ Вт/см}^2$ на выходе тепловой пушки скорости потоков должны составлять $v_n \approx 260 \text{ см/с}$ и $v_s \approx 40 \text{ см/с}$. Что же касается значений v_n и v_s вблизи стенки резонатора, то этот вопрос требует дополнительного количественного рассмотрения.

Направление сопла такой «тепловой пушки» было выбрано так, чтобы тепловой поток двигался по касательной к цилиндрической поверхности резонатора. Если предположить, что нормальная компонента вблизи стенки резонатора тормозилась в меру своей вязкости, то тогда вокруг резонатора возбуждалось круговое движение сверхтекучей компоненты со скоростью v_s , определяемой мощностью \dot{Q} , подаваемой на нагреватель. Другая такая же тепловая пушка располагалась на противоположной стороне резонатора, что позволяло создавать сверхтекучий поток в обратном направлении.

3. Влияние сверхтекучего потока на резонансное поглощение (излучение) электромагнитной волны

Спектр поглощения СВЧ волны в He II вначале исследовали при выключенной тепловой пушке. По сравнению с вакуумом добротность мод «шепчущей

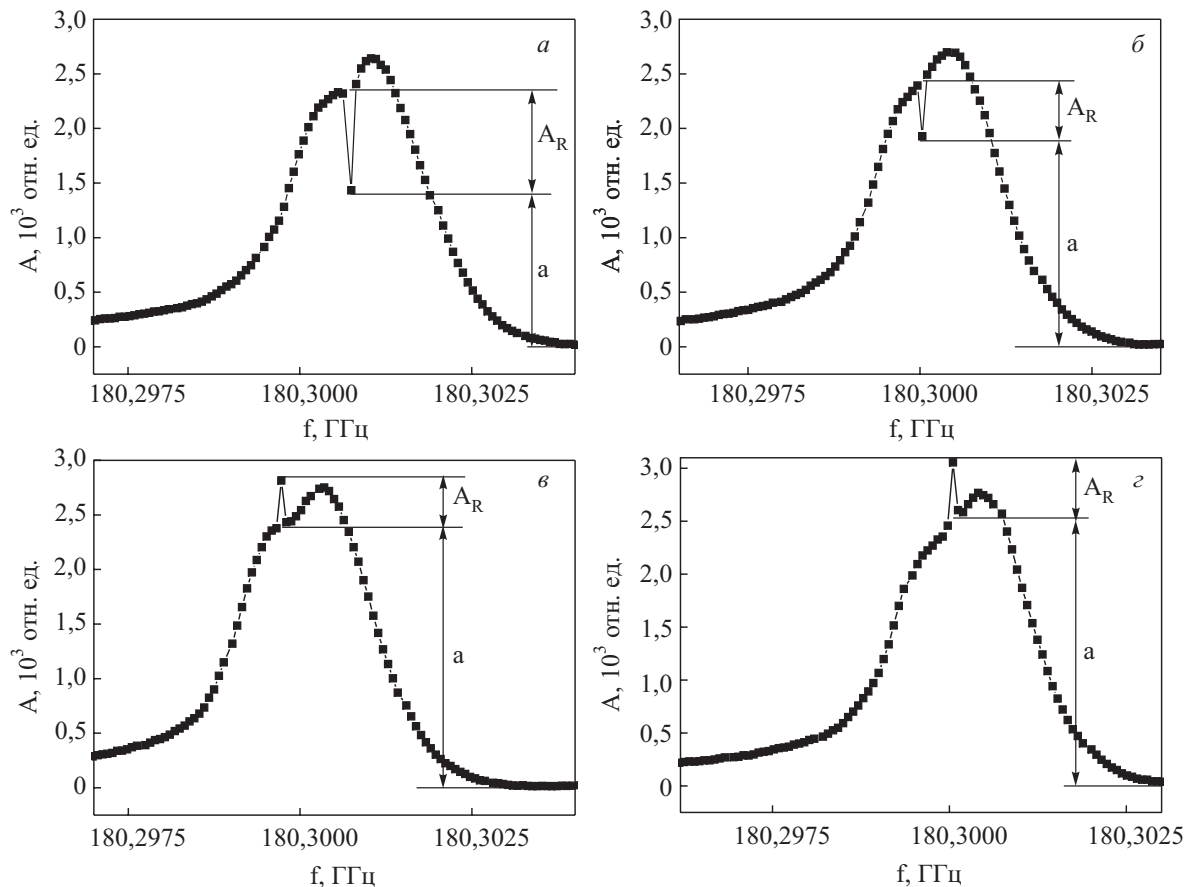


Рис. 3. Эволюция формы кривой резонансного поглощения СВЧ волны (мода $m = 78$) при $T = 1,4 \text{ К}$ с ростом мощности \dot{Q} , Вт/см^2 , подаваемой на нагреватель тепловой пушки: 0 (а); 3,0 (б); 5,0 (в); 7,0 (з).

галереи» в жидком гелии уменьшалась, и положение моды смещалось в меру изменения диэлектрической постоянной. Анализ формы каждой из мод показал, что она может быть аппроксимирована гладкой функцией типа гауссиана. Вместе с тем при некоторой частоте, зависящей от температуры, обнаружена особенность — провал в виде очень узкой линии. Типичная форма кривой СВЧ поглощения показана на рис. 3,а для температуры $T = 1,4$ К и моды «шепчущей галереи» $m = 78$. Этот частотный пик поглощения при $f_R = 180,3$ ГГц, как уже указывалось в [5,6], соответствует энергии ротонного возбуждения (8,65 К).

Добротность линии резонансного поглощения была очень высокой и составляла $\sim 10^8$ при температуре 1,4 К. При приближении к λ -точке ширина линии увеличивалась, что показано на рис. 4, где также показана и инструментальная ширина, определяемая используемыми генераторами, которая составляла 30–100 кГц.

Характер резонанса существенно изменяется при наличии искусственно создаваемых потоков в жидкости. При включении нагревателя одной из тепловых пушек возникали дополнительные встречные потоки сверхтекучей и нормальной компонент, направленные по касательной к цилиндрической поверхности резонатора. В эксперименте температура жидкости стабилизировалась при значении, соответствующем положению линии резонансного поглощения вблизи вершины, и регистрировалась эволюция линии в зависимости от мощности \dot{Q} , подаваемой на нагреватель одной из пушек. При этом скорость суммарного незатухающего сверхтекучего потока могла изменяться в широких пределах в зависимости от величины \dot{Q} . Эксперименты показали, что с ростом \dot{Q} радикально изменяется характер резонансного поглощения СВЧ волны (рис. 3,б). Как видно на рисунке, при увеличении мощности \dot{Q} амплитуда A_R линии поглощения вначале уменьшается по абсолютной величине, затем проходит через нуль и начинает возрастать. Это озна-

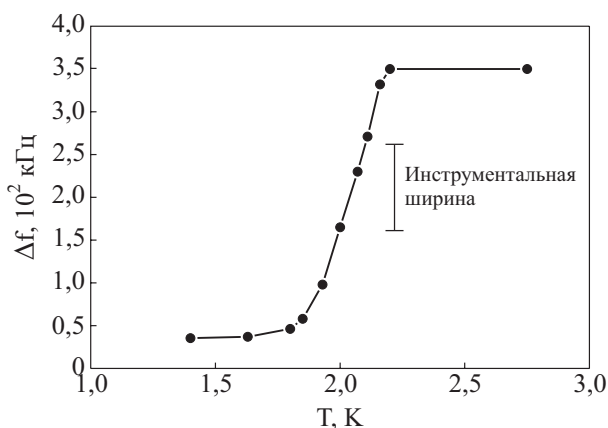


Рис. 4. Температурная зависимость ширины резонансной линии.

чает резкое возрастание вынужденных колебаний системы, т.е. усиление высокочастотного сигнала.

На рис. 5 приведена зависимость амплитуды резонанса A_R (см. рис. 3) от вводимой мощности \dot{Q} (или от скорости сверхтекучего потока вблизи боковой цилиндрической поверхности резонатора). В пределах экспериментального разброса эта зависимость является практически линейной.

Если зафиксировать частоту генератора на резонансе (режим I) и включить медленно развертку тока через нагреватель тепловой пушки, то можно наблюдать за изменением амплитуды A_R . На вставке рис. 5 в крупном масштабе показан типичный участок такой зависимости. Обращает внимание тот факт, что изменение амплитуды A_R происходит не непрерывно, а небольшими скачками. Такой эффект, по-видимому, свидетельствует о квантовании скорости сверхтекучего потока в условиях существования незатухающего сверхтекучего кольца.

Если допустить, что скорость сверхтекучей компоненты v_s вокруг цилиндрической поверхности резонатора радиусом $r = 0,96$ см квантуется по закону $v_s = n\hbar / Mr$ (n — число квантов циркуляции, M — масса атома гелия), то величина v_s , соответствующая одиночному кванту должна составлять $1,6 \cdot 10^{-4}$ см/с. Изменение мощности нагревателя \dot{Q} , отвечающее одной такой ступеньке, составляет $4,8 \cdot 10^{-6}$ Вт/см², что соответствует изменению v_s на выходе из тепловой пушки согласно (1) и (2) на величину $1,8 \cdot 10^{-4}$ см/с. Однако точное изменение скорости v_s вблизи поверхности резонатора оценить не удалось.

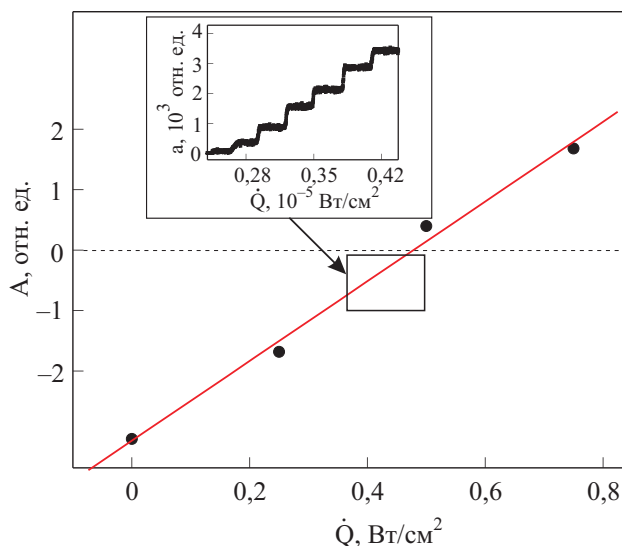


Рис. 5. Зависимость амплитуды резонанса от вводимой мощности \dot{Q} . Экспериментальные точки соответствуют значениям \dot{Q} , приведенным на рис. 3,а–в. На вставке в крупном масштабе показана зависимость $a(\dot{Q})$ при постоянной скорости развертки тока через нагреватель тепловой пушки.

Проведенные эксперименты подтвердили существование в He II очень узкой спектральной линии на роторных частотах. При достаточно больших значениях \dot{Q} (или v_s) вместо резонансного поглощения СВЧ фотонов (и рождения ротонов) наблюдается резонансное усиление высокочастотного сигнала. Механизм резонансного поглощения и излучения СВЧ фотонов в He II при наличии сверхтекучего потока пока остается неясным. Наличие резонанса позволяет предположить, что жидкий гелий можно рассматривать как некоторую двухуровневую систему с разностью энергий между уровнями, равной роторной щели. При включении тепловой пушки увеличивается заселенность верхнего возбужденного уровня (т.е. числа ротонов), поскольку температура внутри камеры выше, чем в объеме. Роторные возбуждения распространяются в область резонатора и там взаимодействуют с электромагнитным полем. Хотя механизм такого взаимодействия еще предстоит выяснить, однако сам факт наличия связи между электрическими и термомеханическими процессами в He II, отмеченный в [1,2], подтверждается результатами настоящей работы. Последующий переход системы из верхнего на основной уровень связан с потерей энергии системы и увеличением энергии электромагнитного поля. Это соответствует индуцированному излучению СВЧ фотонов, т.е. усилению электромагнитной волны. Отметим, что излучение фотонов происходит когерентно с электромагнитным полем, вызвавшим это излучение. При этом усиление сигнала свидетельствует о том, что энергия излучения больше, чем потери в резонаторе.

При выключенной тепловой пушке избыточную заселенность имеет энергетически более выгодный нижний уровень. Если на жидкость начинает воздействовать электромагнитная волна, то под действием СВЧ фотонов на роторной (резонансной) частоте происходит рождение роторных возбуждений и поглощение СВЧ фотонов. И наоборот, если заселенность верхнего уровня превышает допустимые термодинамические значения, то возникает индуцированное излучение фотонов в присутствии резонатора, как синхронизирующего устройства.

Резонанс, наблюдаемый в СВЧ экспериментах, имеет ширину линии, сравнимую с линиями сверхтонкого расщепления в разреженных газах [13,14], но имеет на 2 порядка большую частоту. Обычно в газовой среде ширина линии определяется столкновениями между частицами, поэтому для наблюдения в спектре очень узкой линии используется разреженный газ так, чтобы время жизни системы в возбужденном состоянии было меньше времени между столкновениями. В конденсированных средах узкая линия резонанса поглощения γ -кванта наблюдается в эффекте Мессбауэра.

Ранее в жидком гелии проводили эксперименты по рамановскому рассеянию [16] и рассеянию нейтронов [17], однако узкую спектральную линию, соответствующую излучению или поглощению одиночного ротона, не наблюдали. Наши эксперименты отличались тем, что, во-первых, измерения проводили в условиях относительного движения компонент жидкости, причем направление потока жидкости и направление бегущей волны «шепчущей галереи» были параллельны или антипараллельны. Во-вторых, инструментальная ширина измерительных устройств, используемых в работах [16,17], превышала $\sim 0,5$ К, что на много порядков больше, чем ширина резонансной линии. В нашей работе инструментальная ширина составляла всего $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ К, что соответствует частоте ~ 100 кГц. В этих условиях наблюдение очень узкой спектральной линии в области частот 102–180 ГГц становится возможным.

4. Низкочастотное воздействие сверхтекучего потока на СВЧ волну

В ходе эксперимента обнаружен еще один неожиданный эффект: если облучать жидкость высокочастотным сигналом на резонансной частоте ω_0 , то после охлаждения ниже λ -точки принятый сигнал на детекторе ϑ становится непостоянным, возникают биения низкой частоты через несколько минут после стабилизации температуры. Другими словами, величина амплитуды a (см. рис. 3) начинает осциллировать с некоторой частотой Ω и амплитудой Δa . После искусственного создания дополнительного сверхтекучего потока с помощью тепловой пушки заметно увеличивается частота биений Ω , амплитуда биений сигнала при этом достигает 5–7%.

Для определения частоты биений Ω проведен фурье-анализ огибающей СВЧ сигнала. На рис. 6 показан типичный фурье-спектр сигнала для двух значений мощности. На рисунке видно, что частота биений лежит в области низких частот (~ 104 Гц) и растет с увеличением \dot{Q} .

Особый интерес представляет случай, когда $\dot{Q} = 0$. В этих условиях отношение сигнал–шум на фурье-спектрах было не таким большим, как при $\dot{Q} \neq 0$ (см. рис. 6), и поэтому проводили усреднение спектра по результатам многих измерений. При этом использовали прецизионный режим сканирования частоты генератора [5]. Поскольку из-за флуктуационного дрейфа частоты генератора положение резонанса могло немного смещаться каждый раз, то участок спектра вблизи резонансной линии подвергали многократному сканированию с последующим совмещением положения максимума. После усреднения 25–30 таких измерений была получена линия, показанная на рис. 7. Полученный усреднен-

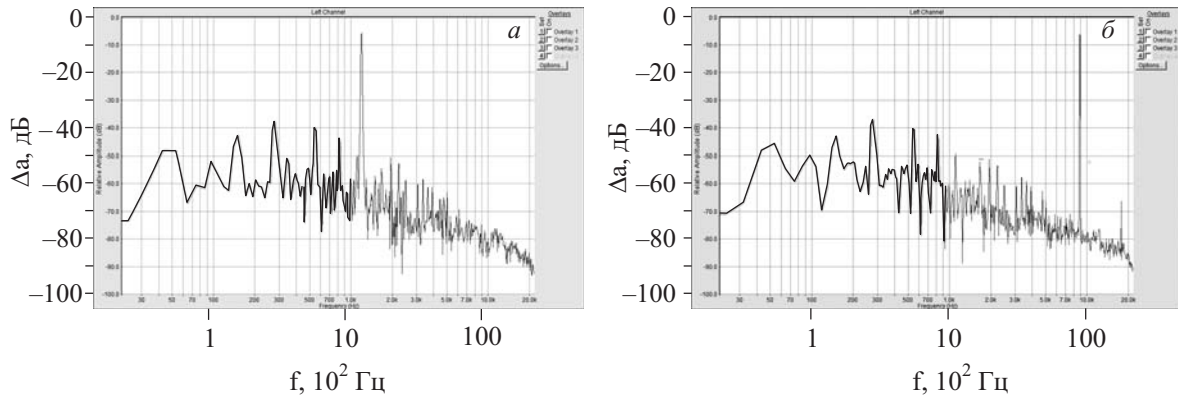


Рис. 6. Фурье-спектр биений СВЧ сигнала при различных значениях мощности \dot{Q} , подаваемой на нагреватель тепловой пушки: $\dot{Q} = 1,4 \cdot 10^{-1}$ Вт/см², $T = 2,12$ К (а); $\dot{Q} = 10^{-1}$ Вт/см², $T = 2,16$ К (б).

ный спектр, показал, что частота биений в этом случае соответствует ультразвуковой частоте ($\sim 10^{-2}$ Гц). В He I, как и ожидалось, биения сигнала отсутствуют, а ниже λ -точки величина и форма фурье-образа зависели от температуры.

Более наглядно эволюция низкочастотного сигнала с ростом подаваемой мощности показана на рис. 8, причем измерения проводили в момент резонанса, т.е. когда частота электромагнитной волны совпадала с ротонной частотой. Что же касается изменения частоты биений с ростом \dot{Q} , то при малых значениях \dot{Q} зави-

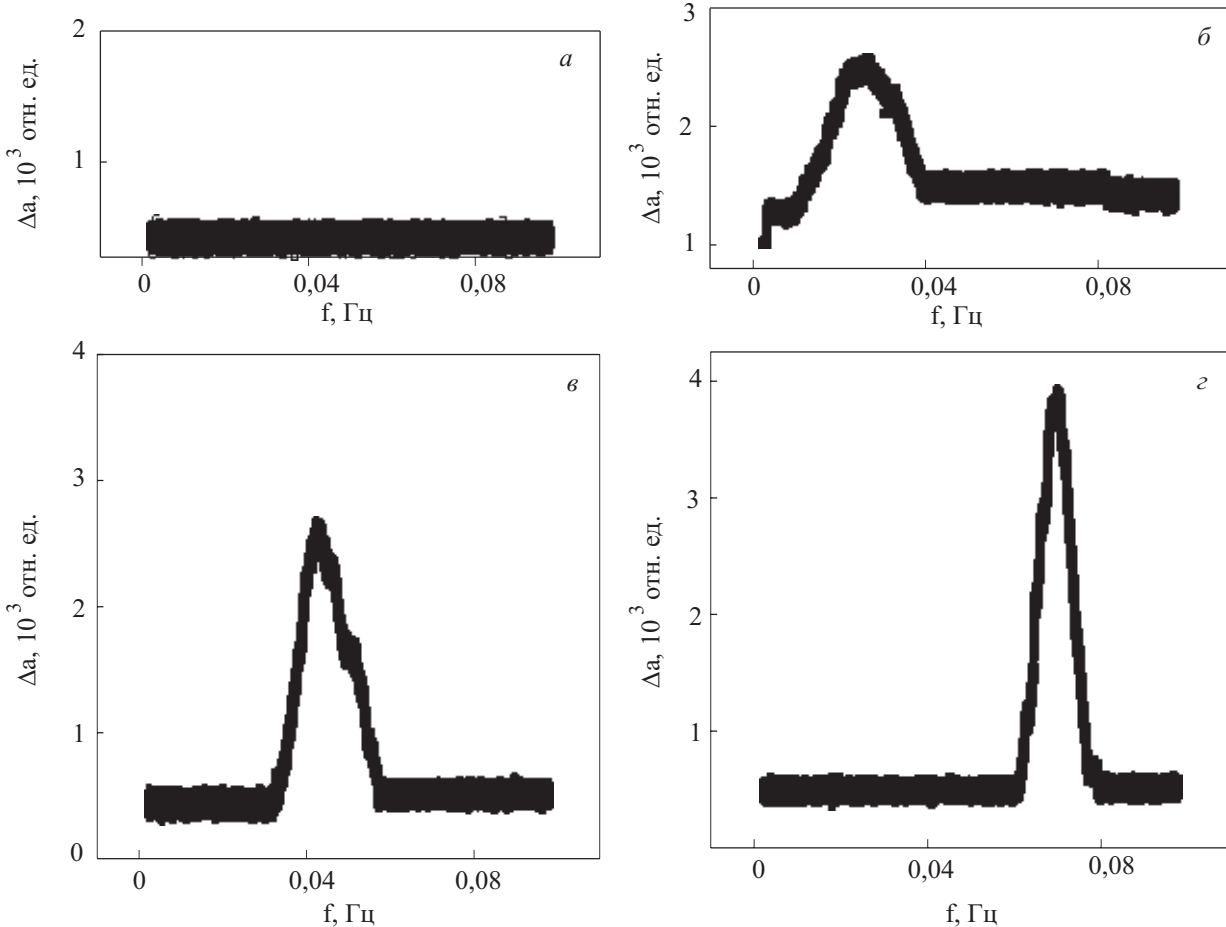


Рис. 7. Усредненный фурье-спектр детектируемого сигнала при выключенной тепловой пушке для разных температур жидкости: $T = 2,75$ К, $f_r = 102$ ГГц (а); $T = 2,16$ К, $f_r = 118$ ГГц (б); $T = 2,12$ К, $f_r = 140$ ГГц (в); $T = 1,4$ К, $f_r = 180$ ГГц (г).

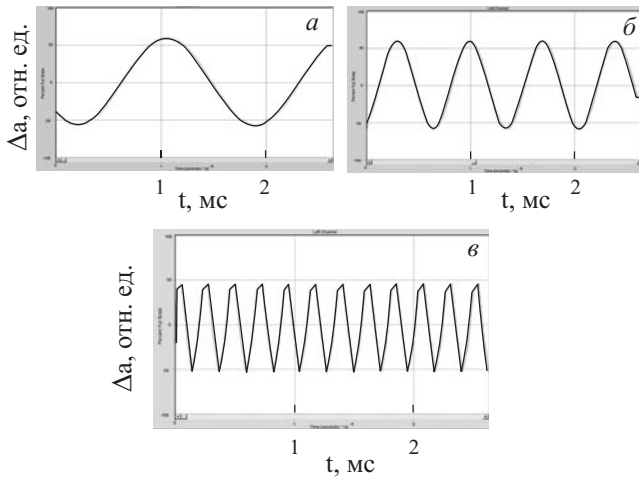


Рис. 8. Изменение частоты биений СВЧ сигнала при $T = 2,12$ К с увеличением подаваемой мощности \dot{Q} , Вт/см²: $1,0 \cdot 10^{-1}$ (а); $2,5 \cdot 10^{-1}$ (б); $6,7 \cdot 10^{-1}$ (в).

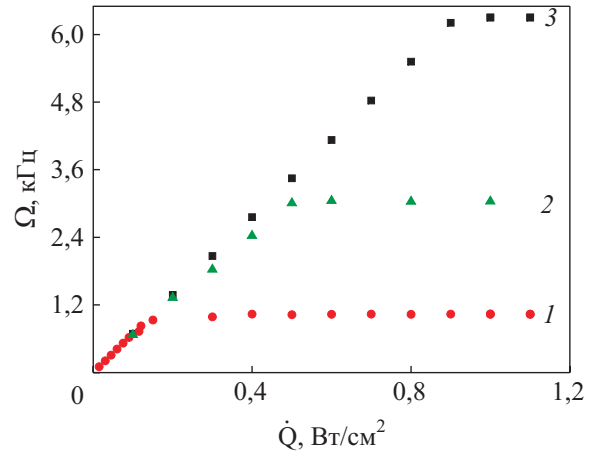


Рис. 9. Зависимость частоты биений от мощности, подаваемой на тепловую пушку при различных температурах T , К : 1,4 (1); 2,05 (2); 2,1 (3).

симость $\Omega(\dot{Q})$ является почти линейной, а затем наступает насыщение, при котором частота принимает некоторое предельное значение Ω_c (рис. 9), которое зависит от температуры. Следует заметить, что при этом амплитуда низкочастотной волны медленно уменьшалась с ростом \dot{Q} . Температурная зависимость предельной частоты Ω_c представлена на рис. 10. Как видно на графике, при приближении к λ -точке предельная частота биений резко возрастала.

До сих пор речь шла о включении одной тепловой пушки. Если же мощность подавали на нагреватель другой тепловой пушки, генерирующей сверхтекучий поток в противоположном направлении, то в результате суперпозиции двух потоков можно было добиться полной компенсации потоков. Подчеркнем, что в этом случае биений СВЧ сигнала не наблюдали. Этот факт непосредственно свидетельствует о том, что биения электромагнитной волны возникают в результате взаимодействия ее со сверхтекучим потоком.

На рис. 11 показано изменение амплитуды низкочастотного сигнала при различных манипуляциях с потоками, создаваемыми пушками. В исходном состоянии была включена вторая пушка, которая сформировала вокруг резонатора стационарный сверхтекучий поток с частотой биений $\Omega_0 = 1000$ Гц. После этого селективный усилитель 10 (рис.1) был настроен на частоту $\Omega_1 = 417$ Гц. В момент времени 1 вторая пушка была выключена, а на первую подана мощность \dot{Q}_1 , изменяющаяся со временем с постоянной скоростью (рис. 11,б). В этих условиях происходило искусственное торможение потока, поэтому частота сигнала понижалась. Суммарная скорость потока уменьшалась, и в момент, когда частота сигнала совпадала с частотой, на которую был настроен усили-

тель, наблюдалось резкое увеличение сигнала. Как видно на рис. 11,а это произошло примерно через 4 мин после включения первой пушки. В момент времени 2 была включена вторая пушка (рис. 11,в), т.е. работали обе пушки, причем изменение со временем мощностей \dot{Q}_1 и \dot{Q}_2 было одинаковым. При этом амплитуда сигнала оставалась практически постоянной, что свидетельствовало о постоянстве скорости потока до момента времени 3 (выключения второй пушки), а первая продолжала работать. В этом случае поток продолжил торможение, пока v_s не достигла нуля. Затем, поскольку пушка продолжала работать, начал возбуждаться поток в противоположном направлении. Связанная с этим частота биений начала увеличиваться, и в момент, когда частота низкочастотных колебаний снова совпала с частотой настройки усилителя, на кривой появился второй максимум.

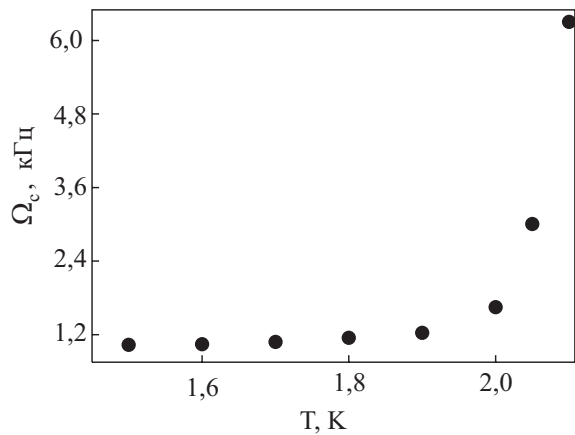


Рис. 10. Температурная зависимость предельной частоты биений.

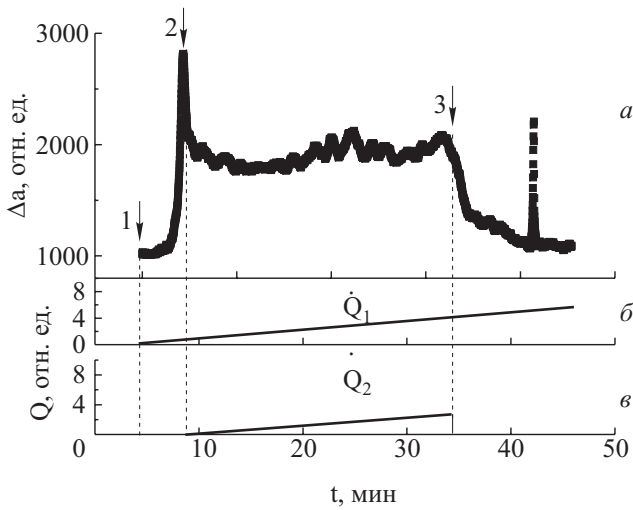


Рис. 11. Временная зависимость амплитуды детектированного сигнала при использовании двух тепловых пушек (а); (б) и (в) — соответствующее изменение мощности \dot{Q}_1 и \dot{Q}_2 ; Момент времени 1 соответствует включению первой пушки; момент 2 — включение второй пушки, генерирующей поток в противоположном направлении; момент 3 — выключение второй пушки.

Природа низкочастотного сигнала, выделяемого на детекторе, пока до конца не понятна. Можно предположить, что сигнал соответствует разностной частоте двух высокочастотных независимых волн, бегущих в резонаторе и по волноводу. В этом случае детектор работает как смеситель и частота сигнала соответствует доплеровской частоте.

Если частоту СВЧ волны при отсутствии сверхтекучего потока обозначить через ω_0 (такая частота обычно задается используемым генератором), то при наличии отличной от нуля скорости v_s частота СВЧ колебаний в жидкости, движущейся со скоростью v_s , должна измениться в меру эффекта Доплера:

$$\omega_v = \omega_0 [1 - (v_s / c) \cos \theta], \quad (3)$$

где c — скорость света, θ — угол между направлением распространения волны и направлением сверхтекучего потока.

Таким образом, в условиях данного эксперимента в сверхтекучей жидкости присутствовали колебания двух частот ω_0 и ω_v . При этом биения, возникающие при сложении периодических колебаний с близкими частотами, внешне проявляются как модулированные колебания. Поскольку в эксперименте скорость v_s была либо параллельна, либо антипараллельна вектору Пойнтинга электромагнитной волны, то $\cos \theta = \pm 1$. Тогда значение регистрируемой частоты биений

$$\Omega = |\omega_y - \omega_0| = \frac{\omega_0 v_s}{2c}. \quad (4)$$

Оценки показали, что, если величину v_s , входящую в (4), найти по известному значению мощности \dot{Q} , используя формулы (1) и (2), и предположить, что вблизи резонатора она мало изменилась, то полученная частота модуляции Ω согласуется с измеренными значениями в пределах 40%.

Поскольку частота низкочастотного сигнала практически соответствует области звуковых частот, то модулированные колебания можно преобразовать в звук с использованием соответствующей аппаратуры. Для этого выход низкочастотного усилителя 10 (рис. 1) подключали к акустической системе, и тогда можно было слышать изменение звуковой частоты с изменением мощности, подаваемой на нагреватель. Таким образом, влияние сверхтекучего потока на модуляцию становится очень наглядным. Было также продемонстрировано, что при включении второй тепловой пушки, тормозящей сверхтекучий поток, частота звука уменьшалась вплоть до прекращения звука при полной компенсации потоков.

Второй возможной причиной появления низкочастотного сигнала может быть взаимодействие стоячей волны «шепчущей галереи» с движущимся сверхтекучим потоком*. В этом случае должна происходить амплитудная модуляция СВЧ сигнала. Для проверки этой версии запланированы специальные эксперименты.

Отметим, что низкочастотные осцилляции в сверхтекучем гелии при наличии в нем теплового потока, проходящего через узкое отверстие, наблюдали ранее в группе Паккарда [18,19]. В этих экспериментах тепловой поток создавался в камере, где жидкость имела слабую связь с внешней ванной He II через узкие отверстия. Для регистрации колебаний авторы использовали гибкую мембрану, являющуюся стенкой камеры, смещение которой измеряли. Обнаружено, что частота наблюдаемых осцилляций, как и в нашей работе, увеличивалась с ростом мощности, подаваемой на нагреватель. Также совпала и частота осцилляций, регистрируемых в [18,19], с частотой модуляции, наблюдаемой в нашей работе. Отличие состояло в том, что в [18,19] измерялся механический отклик мембраны, а в нашей работе — электродинамический отклик на процессы, происходящие в сверхтекучем гелии, природу которых еще предстоит выяснить. Авторы [18] назвали звук, полученный после преобразования наблюдаемых колебаний, «квантовым свистом».

* На такую возможность было указано В.Н. Григорьевым и В.А. Майдановым.

5. Заключение

Проведенная серия экспериментов позволила обнаружить новые эффекты, наблюдаемые при взаимодействии электромагнитных волн сверхвысокой частоты со сверхтекучим потоком в He II, генерируемым нагревателем. Оказалось, что в области ротонных частот можно наблюдать как поглощение СВЧ фотонов (и рождение одиночных ротонов), так и излучение (точнее, усиление) электромагнитных волн. Все определяется скоростью сверхтекучего потока, которая изменялась в зависимости от мощности, подаваемой на нагреватель не непрерывным образом, а небольшими квантами в соответствии с правилами квантования циркуляции сверхтекучего потока.

Другой интересный эффект связан с тем, что сверхтекучий поток, генерируемый тепловой пушкой, вызывает низкочастотное воздействие на электромагнитную волну. При этом низкочастотная составляющая, выделенная на детекторе, оказалась связанной со скоростью потока. Если искусственно с помощью двух одновременно работающих пушек реализовать случай, когда скорость потока равна нулю, то такое воздействие на СВЧ волну исчезает. Когда же обе пушки были выключены, низкочастотный сигнал наблюдался на ультранизкой частоте, что соответствует очень малому значению скорости сверхтекучего потока. Последнее подтверждает тот факт, что электромагнитная волна сама может вызвать относительное движение нормальной и сверхтекучей компонент He II.

Неясным остается механизм связи между электрическими и механическими процессами, происходящими в сверхтекучей жидкости. Нуждается в обосновании и выбор модели, согласно которой He II можно рассматривать как некоторую двухуровневую систему с расстоянием между уровнями энергии, равном ротонной щели, что позволило качественно объяснить процессы взаимодействия между ротонами и СВЧ фотонами.

Авторы выражают благодарность А.Ф. Андрееву, В.Н. Григорьеву, К. Коно, В.А. Майданову, В.Д. Нацки, Э.А. Пашицкому, Ю.М. Полуэктову, М. Томченко, И. Фомину, С.И. Шевченко, Х. Яяма за полезные замечания и обсуждение изложенных результатов.

Работа выполнена при поддержке грантов CRDF (проект 2853), УНТЦ (проект 3718) и МОН Украины М 226.

1. А.С. Рыбалко, *ФНТ* **30**, 1321 (2004).
2. А.С. Рыбалко, С.П. Рубец, *ФНТ* **31**, 820 (2005).
3. L.A. Melnikovsky, *Cond-mat/0505102*, v.1, 2, (2005); v. 3 (2006).
4. В.Д. Нацки, *ФНТ* **31**, 1201 (2005), *ФНТ* **33**, 1319 (2007).
5. А. Rybalko, E. Rudavskii, S. Rubets, V. Tikhiy, V. Derkach, and S. Tarapov, *J. Low Temp. Phys.* **148**, 527 (2007).

6. A. Rybalko, S. Rubets, E. Rudavskii, V. Tikhiy, S. Tarapov, R. Golovashchenko, and V. Derkach, *Phys. Rev.* **B76**, 140503 (2007).
7. E.M. Ganapolsky, A.V. Golik, and A.P. Korolyuk, *Phys. Rev.* **B51**, 11962 (1995).
8. V.N. Derkach, R.V. Golovashchenko, S.V. Nedukh, A.S. Plevako, and S.I. Tarapov, *Proc. 30th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 13th Intl. Conf. on Terahertz Electronics, IRMMW-THz 2005*, Williamsburg, (2005), p. 192.
9. J. Krupka, K. Derzakowski, A. Abramowicz, M.E. Tobar, and R.G. Geyer, *IEEE Trans. on MTT* **47**, 752 (1999).
10. И.А. Соколов, *Электронная техника. Сер. 10, Микроэлектронные устройства* (1990), №1 (79). С. 36.
11. П.Л. Капица, *ЖЭТФ* **11**, 1 (1941).
12. K.R. Atkins, *Liquid Helium*, Cambridge Univ. Press (1959).
13. А.М. Прохоров, *УФН* **85**, 599 (1965).
14. С.А. Ахманов, Р.В. Хохлов, *УФН* **88**, 439 (1966).
15. Р.А. Абарцумян, П.Г. Крюклов, В.С. Легохов, *ЖЭТФ* **51**, 1969 (1966).
16. T.J. Greytak, R. Woerner, J. Yan, and R. Benjamin, *Phys. Rev. Lett.* **25**, 1547 (1970).
17. D.G. Henshaw, A.D.B. Woods, *Phys. Rev.* **121**, 1266 (1961).
18. E. Hoskinson and R.E. Packard, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 155303 (2005).
19. Y. Sato, E. Hoskinson, and R. Packard, *International Symposium on Quantum Fluids and Solids QFS2006*, Kyoto, OE2 (2006).

Interaction between microwave electromagnetic waves and superfluid current in He II

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

The absorption of electromagnetic waves is studied experimentally in liquid helium in a frequency range 40–200 GHz at temperatures of 1.4–2.8 K. The spectrum of «whispering gallery» of fluctuations modes was registered in a dielectric disk resonator immersed in liquid helium. Superfluid currents in He II were stimulated by two «thermal guns». A narrow line of UHW wave absorption was observed at the frequency of single-roton excitation. It is found that with increasing the superfluid current velocity v_s the character of the resonance line changes drastically: the absorption of UHW photons is replaced by their stimulated radiation, as seen from the sharp amplification of the high-frequency signal. This effect can be explained within the framework of the two-level model of He II. A stepwise change of superfluid velocity is observed with a continuous increase in the power supplied to the heater gun, what can argue in favor of quan-

tization of v_s . It is shown that the superfluid current has a low-frequency influence on UHW wave, which manifests itself externally as a modulation of UHW oscillations. Possible reasons for this effect are analyzed.

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

Keywords: superfluid helium, dielectric resonator, whispering gallery.