

## **О ВОЗМОЖНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХ ТИПОВ ВОЗМУЩЕНИЙ В СВЕРХТЕКУЧЕМ ГЕЛИИ: ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ И ВИХРЕВОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ**

А.А. Есина, В.Б. Ефимов

### **АННОТАЦИЯ**

В данной работе формулируется задача и представлены характеристики измерительной ячейки для изучения взаимодействия волн второго звука и квантованных вихрей, т. е. взаимодействие потенциального и вихревого движений в сверхтекучем гелии. Первоначально гармонические волны второго звука за счет сильной нелинейности передают энергию через каскады кратных гармоник от частот накачки в область вязкостной диссипации – акустическая турбулентность потенциальных потоков. Реализация такой турбулентности возможно в цилиндрическом резонаторе волн второго звука. Для сверхтекучего гелия возможно существование квантованных вихрей и формирование квантовой турбулентности. Для создания квантовой турбулентности нами использовались кварцевые камертоны. Экспериментально были получены добротности резонатора волн второго звука и кварцевого камертона, использующегося в качестве генератора вихрей. Полученные спектры нелинейных волн второго звука в резонаторе демонстрируют возникновение энергетических потоков в квазиодномерной геометрии, а вольтамперные характеристики камертона в сверхтекучем гелии показывают переход от ламинарного к турбулентному режиму.

### **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

СВЕРХТЕКУЧИЙ ГЕЛИЙ, ВТОРОЙ ЗВУК, КВАНТОВАННЫЕ ВИХРИ, КВАРЦЕВЫЙ КАМЕРТОН

## **IF ON THE POSSIBILITY OF OBSERVING THE INTERACTION OF TWO TYPES OF EXITATIONS IN SUPERFLUID HELIUM: POTENTIAL AND VORTEX TURBULENCE**

A.A. Esina, V.B. Efimov

### **ABSTRACT**

The present work formulates the problem and the characteristics of the experimental cell for study the interaction of second-sound waves and quantized vortices, i.e., the interaction of potential and vortical motions in superfluid helium. Initially, harmonic waves of the second sound, due to strong nonlinearity, transfer energy through frequency cascades of multiple harmonics from the pumping region to the viscous dissipation region. This is acoustic turbulence of potential fluxes. Realization of such turbulence is possible in a cylindrical resonator of second-sound waves. For superfluid helium, the existence of quantized vortices and the formation of quantum turbulence are possible. We used quartz tuning forks for create quantum turbulence. The quality factors of the second-sound wave resonator and the quartz tuning fork used as a vortex generator were measured experimentally. The obtained spectra of nonlinear second-sound waves in the resonator demonstrate the occurrence of energy flows in a quasi-one-dimensional geometry. The current-voltage characteristics of a tuning forks in superfluid helium show a transition from a laminar to a turbulent regime.

## **KEYWORDS**

SUPERFLUID HELIUM, SECOND SOUND, QUANTIZED VORTICES, QUARTZ TUNING FORK

## **ВВЕДЕНИЕ**

Исследование турбулентных процессов – одна из актуальных задач в современной физике. Турбулентность – явление, имеющее место как в живой, так и неживой природе, и проявляется в стохастизации поведения диссипативной среды, возникающее при больших возбуждениях в нелинейных средах без диссипации (или со слабой диссипацией) с большим числом степеней свободы. Для турбулентности характерна передача энергии накачки через инерционный интервал, где преобладают нелинейные процессы, в область высоких (реже низких) частот, где она рассеивается из-за преобладающих диссипативных процессов т.е., в частности, турбулентность может возникать в системе взаимодействующих нелинейных волн в слабодиссипативных (бездиссипативных) средах.

Одной из таких систем является система нелинейных тепловых возмущений в гелии-II волн второго звука. Особенности поведения этих волн создают уникальные экспериментальные возможности для изучения явлений распространения, взаимодействия волн в достаточно простой геометрии (например, в квазиодномерной геометрии), исследовать процессы формирования и распада турбулентных состояний [1]. Для волн второго звука в сверхтекучем гелии характерны уникальные законы зависимости скорости волны от ее амплитуды, очень малое затухание волны и линейный закон дисперсии. Нелинейная зависимость скорости волн от амплитуды и возможность менять коэффициент нелинейности  $\square_2$  как по величине, так и по знаку изменением температуры позволяет изучать процессы взаимодействия нелинейных волн, формировать турбулентное состояние взаимодействующих волн, изучать процессы передачи энергии при такой турбулентности (турбулентность Бюргера).

На процессы перекачки энергии в частотном пространстве можно влиять, внося в систему возмущение. Для сверхтекучего гелия такой вид возбуждений существует – квантованные вихри, взаимодействие с которыми сильно нелинейных волн еще мало исследовано.

Генерация квантованных вихрей в сверхтекучем гелии может осуществляться различными способами, например, с помощью колеблющихся тел [2]. В последнее время в качестве такого генератора квантованных вихрей хорошо себя зарекомендовали кварцевые камертоны, преимуществами которых являются простота использования, дешевизна и высокая добротность. Кварцевые камертоны (кварцевые осцилляторы для электронных часов) способных генерировать вихри как в виде отдельных вихревых колец, так и в виде запутанных вихревых клубков. Особенности поведения кварцевых камертонов при переходе в турбулентный режим также изучены достаточно хорошо в широком диапазоне температур.

Исследование взаимодействия нелинейных волн второго звука с квантованными вихрями, генерируемыми кварцевым камертоном, позволят лучше понять, как квантовая вихревая турбулентность влияет на энергетический каскад в системе волн. В данной работе приводятся предварительные результаты изучения режимов работы резонаторов волн второго звука и кварцевых камертонов для дальнейшего применения для решения поставленной задачи.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Все измерения проводились в стеклянном криостате в диапазоне температур от 1,25 К до 2,05 К. Измерительная ячейка волн второго звука представляет собой кварцевый цилиндрический резонатор, размеры которого –  $L = 7$  см (длина) и  $D = 2$  см (диаметр). На одном торце резонатора находится пленочный никелевый нагреватель сопротивлением  $R_H = 230 \Omega$ , использующийся в качестве генератора тепловых волн, а на другом торце – сверхпроводящий детектор-болометр, представляющий собой пленку из оловянной бронзы с рисунком в форме меандра и сопротивлением  $R_B = 2,3 \text{ k}\Omega$ . Чувствительность болометра составляет примерно 1 В/К, что позволяет уверенно регистрировать изменения температуры в десятки милликельвин. В стенке резонатора имеется небольшое отверстие для помещения внутрь кварцевого камертона. Вид ячейки представлен на рис. 1.

В экспериментах использовались в основном заводские кварцевые камертоны с номинальной частотой  $f_{vac} = 32,768$  кГц, а также камертон с частотой  $f_{vac} \approx 31$  кГц и размером ножки примерно  $0,5 \times 1 \times 3$  мм, характеристики которого и будут представлены в данной работе. Колебания камертона возбуждались с помощью переменного напряжения, возникающий при этом ток отклика пропусклся через I-V-преобразователь со встроенным усилителем и подавался на синхронный детектор.

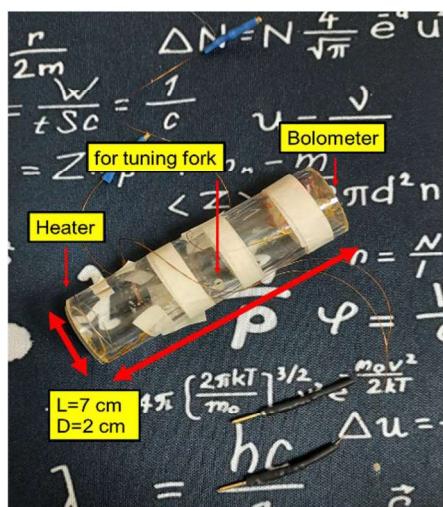


Рис.1. Резонатор волн второго звука для изучения взаимодействия акустической и квантовой турбулентности. Справа приведен кварцевый камертон, позволяющий создавать квантовые вихри

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Характеристики резонатора волн второго звука были получены в области температур 1,55 - 1,65 К, где скорость распространения волн второго звука почти не зависит от температуры и составляет примерно 20 м/с. В соответствии со своими размерами, резонатор имеет набор собственных частот, значения и номера которых представлены на рис. 2а). Измерение этих частот проводилось при минимальной величине накачки, чтобы снизить нелинейные эффекты. В качестве рабочей была выбрана 25-я мода с частотой  $f_{25} = 1,8228$  кГц, ее добротность составляет  $\sim 10^3$ . Резонансная кривая данной моды представлена на рис. 2б).

В данной области температур коэффициент нелинейности волн второго звука имеет большое положительное значение, из-за чего изначально гармоническая волна

преобразуется в ударную с разрывом на фронте, что представлено на рис.3а). При этом возникает перекачка энергии из основной моды в область высоких частот как показано на Фурье-спектрах регистрируемых сигналов (рис. 3б).

Показатель степени в зависимости энергии возникающих кратных гармоник от их частоты  $E \sim f^m$  близок к значению  $m = -5/3$ , что говорит о реализации прямого каскада колмогоровского типа. Величины накачки выбраны так, чтобы не превысить критическую амплитуду (скорость) волн второго звука, при которой включится механизм Гортера-Меллинка и начнется процесс рождения квантованных вихрей. Мощности тепловых потоков такого процесса начинаются с величин  $\approx 50$  мВт/см<sup>2</sup>. Таким образом, форма и амплитуда волн обусловлена только нелинейными искажениями без вклада затухания на вихревых клубках.

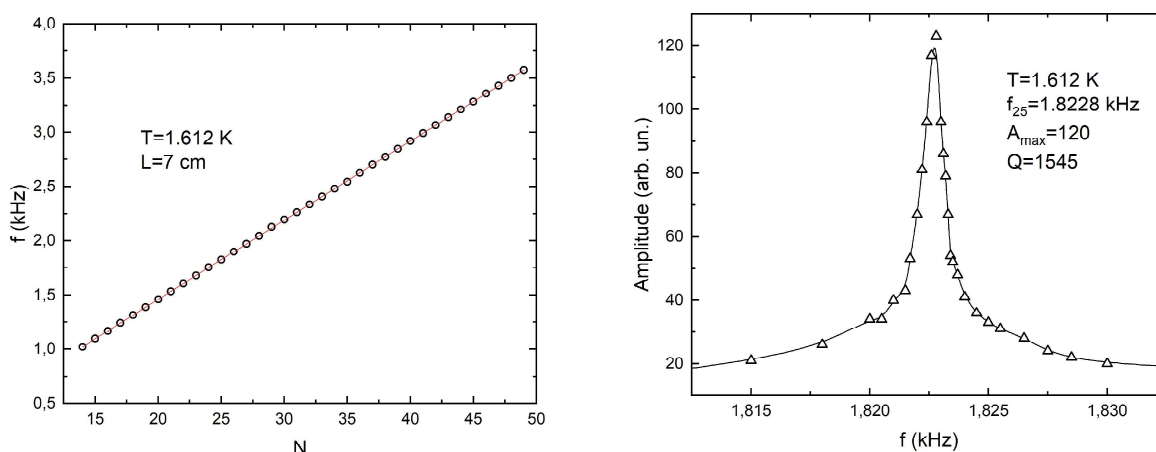


Рис. 2. а) Набор собственных мод резонатора волн второго звука; б) Резонансная кривая 25-й моды

В качестве генератора квантовой турбулентности выбран кварцевый камертон. Резонансная частота такого камертона в вакууме была  $f=31\,169$  Гц при добротности  $Q \approx 6 \cdot 10^3$ . Характеристики этого камертона в сверхтекучем гелии представлены на рис.4. При достижении критической скорости колебаний камертона в сверхтекучем гелии (т. е. критической скорости обтекания гелием ножек камертона) начинают рождаться квантованные вихри. Это отражается на ВАХ камертона в виде изменения линейной зависимости отклика камертона от величины накачки, что характерно для ламинарного движения тела в жидкости, на квадратичную. Наиболее явно переход виден при самой низкой температуре, при более высоких температурах резкому переходу в турбулентный режим препятствует вязкость нормальной компоненты гелия.

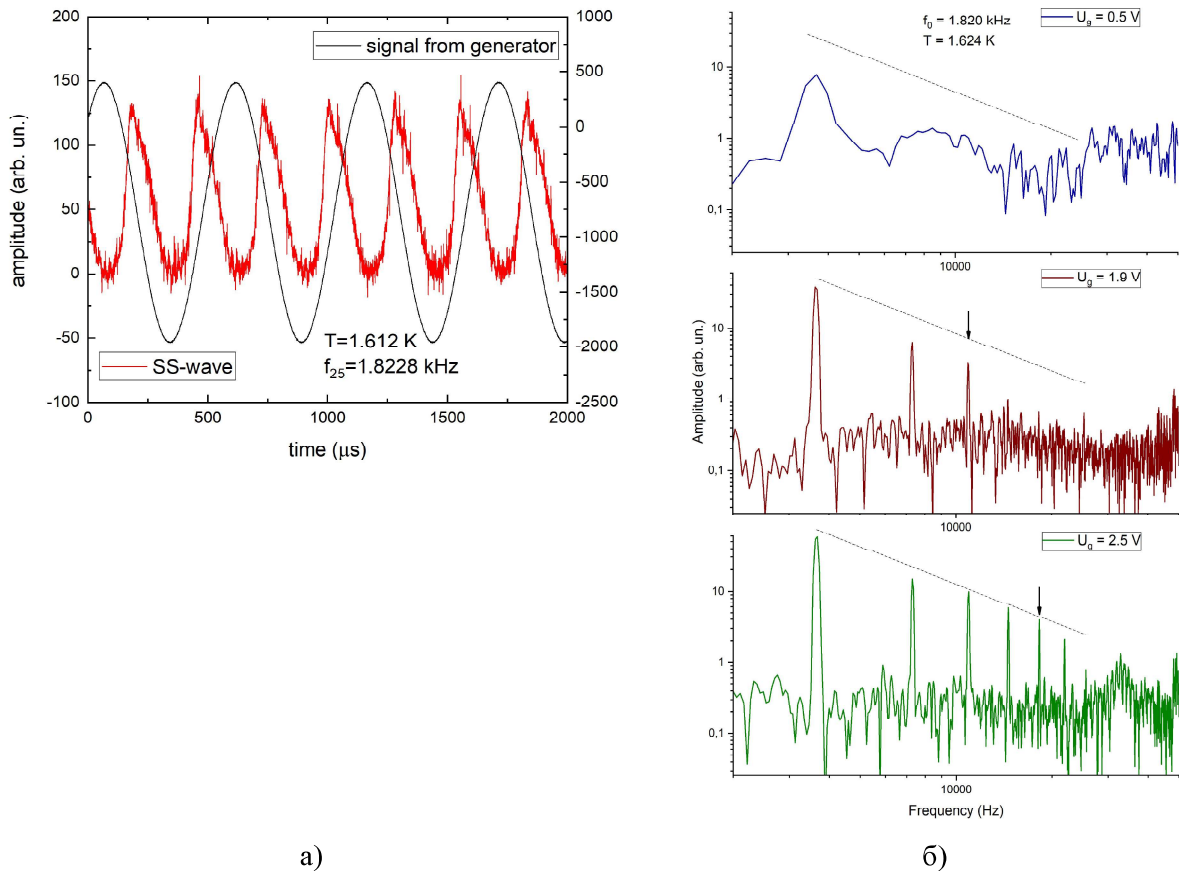


Рис.3. а) Гармонический сигнал, подаваемый на нагреватель, и генерируемая им нелинейно искаженная волна второго звука; б) спектры нелинейных волн второго звука при разных накачках, 25-я мода. Стрелочками обозначен конец инерциального интервала.

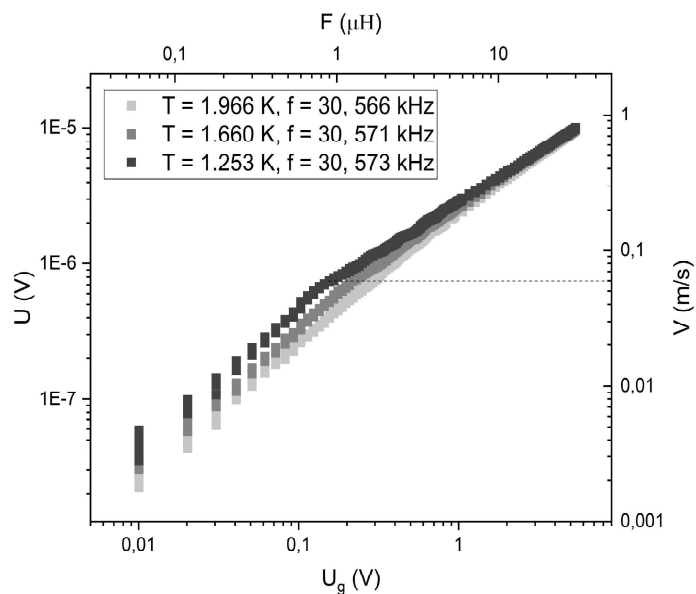


Рис.4. ВАХ камертона в сверхтекучем гелии при разных температурах. Пунктирной линией показан переход от линейной зависимости к квадратичной при критической скорости, составляющей примерно 6 см/с. Пересчет напряжения накачки в силу и тока отклика в скорость произведен в соответствии с электромеханической константой для этого камертона  $a = 1,5 \cdot 10^{-5}$  Кл/м.

Для кварцевых осцилляторов величина приложенной силы  $F$  и скорость движения ножек камертона  $v$  определяется величиной приложенного переменного напряжения  $U_{ac}$  и тока в цепи  $I$  через электромеханическую константу  $a$  [3]. Так  $F$  вычисляется с помощью соотношения

$$F = \left(\frac{a}{2}\right) U_{ac},$$

а скорость движения ножек камертона  $v$  через выражение

$$I(t) = a \frac{dy(t)}{dx} = av(t),$$

где для вычисления электромеханической константы  $a$  необходимо измерить добротность такого осциллятора в идеальных условиях (в вакууме) и определить его электрическое сопротивление  $R=U_0/I_0$  в условиях резонанса

$$a = \sqrt{\frac{2m\Delta\omega}{R}}.$$

В последнем уравнении неопределенна масса осциллятора, которая вычисляется из геометрических размеров ножки камертона. Сравнение вычисленной скорости движения ножки камертона в резонансе с непосредственно измеренной величиной показало близкие величины [4], что позволяет достаточно точно определять реальную скорость колебания кварцевого камертона.

## ВЫВОДЫ

Полученные в экспериментах данные добротности резонатора волн второго звука и камертона имеют высокую чувствительность и обеспечивают возможность проведения запланированных исследований влияния квантованных вихрей на процессы передачи энергии при акустической турбулентности. Представленные в данной работе результаты хорошо согласуются с результатами, полученными ранее другими научными группами.

Работа была выполнена в рамках проекта РНФ 22-22-00718.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимов В.Б., УФН, 188, 10, 1025-1048 (2018)
2. R. Hanninen, M. Tsubota, W. F. Vinen, Phys. Rev. B75, 064502 (2007)
3. R. Blaauwgeers, M. Blazkova, M. Clovecko, et al, JLTP, 146, 5/6 (2007)
4. V.B. Efimov, Deepak Garg, O.Kolosov, P.V.E. McClintock, JLTP, 158, 3/4, 456-461 (2010)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ефимов Виктор Борисович – доктор физико-математических наук, профессор (ORCID: 0000-0002-9195-2458). Институт физики твердого тела РАН, г. Черноголовка Московской обл. e-mail: efimov@issp.ac.ru

А.А.Есина – младший научный сотрудник (ORCID: 0000-0001-5700-3729). . Институт физики твердого тела РАН, г. Черноголовка Московской обл. e-mail: orlova\_lkk@issp.ac.ru