

ИССЛЕДОВАНИЕ МАКРОСКОПИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ КВАНТОВО-ВИХРЕВЫХ СИСТЕМ В СВЕРХТЕКУЧЕМ ГЕЛИИ МЕТОДОМ ЗАТУХАНИЯ ПРОБНЫХ ОДИНОЧНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТЕПЛА.

В.Б. Ефимов, А.А. Орлова

АННОТАЦИЯ

В данной работе представлена простая и эффективная методика исследования особенностей формирования, временной эволюции и распада вихревых клубков, формируемых противотоком нормальной и сверхтекучей компонент He-II. Данная методика позволяет оценить стационарную плотность вихревых нитей при конкретной температуре гелиевой ванны и мощности тепловой накачки, скорости формирования и распада вихревых клубков, а также проверить равномерность распределения вихрей вдоль направления распространения теплового потока в разные моменты от включения/выключения накачки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

СВЕРХТЕКУЧИЙ ГЕЛИЙ, ВТОРОЙ ЗВУК, КВАНТОВЫЕ ВИХРИ, ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

INVESTIGATION OF MACROSCOPIC DYNAMICS OF QUANTUM VORTEX SYSTEM BY SINGLE HEAT PULSE ATTENUATION METHOD IN HE-II.

V.B. Efimov, A.A. Orlova

ABSTRACT

This paper presents a simple and effective method for investigating features of formation, time evolution and decay of vortex tangles formed by the counterflow of normal and superfluid components of He-II. This method allows us to estimate the stationary vortex line density at a helium bath temperature and a heat excitation power, the rate of formation and decay of vortex tangles, and verify the homogeneity of vortex distribution along the direction of heat flow propagation at different times from the excitation switch on / off.

KEYWORDS

SUPERFLUID HELIUM, SECOND SOUND, QUANTUM VORTICES, TURBULENCE

ВВЕДЕНИЕ

Турбулентность – одно из физических явлений, интенсивно исследуемых в последнее время. Это явление проявляется в стохастизации поведения сильнонелинейных слабодиссипативных сред при их сильном возбуждении, для него характерны поток энергии из области накачки в область диссипации через интервал (называемый инерционным), в котором преобладают нелинейные процессы. Такие каскады могут наблюдаться, например, в системе взаимодействующих нелинейных волн на поверхности жидкости или специфических волн в квантовых жидкостях, где реализуется передача энергии в область высоких (реже низких) частот (акустическая турбулентность), или же

при взаимодействии вихревых структур, где энергия перетекает из вихрей одних масштабов в другие (вихревая турбулентность).

Крупномасштабные вихревые явления, встречающиеся регулярно в природе и оказывающие большое влияние на нашу жизнь (циклоны и антициклоны, ураганы, торнадо), очень сложно изучать напрямую в силу их огромного размера, нестабильности и невоспроизводимости условий, моделирование же подобных структур в экспериментах с классическими жидкостями осложнено тем, что такие жидкости обладают существенной вязкостью, доминирующей над нелинейностью, а также требуют характерных размеров экспериментальных установок порядка десятков сантиметров или даже метров.

Сверхтекучий гелий, благодаря своей крайне низкой вязкости и сверхтеплопроводности, обусловленной противотоком нормальной и сверхтекучей компонент, является перспективной средой для моделирования и изучения нелинейных волновых и вихревых процессов, а также их взаимного влияния. Также в сверхтекучем гелии могут существовать особые вихри, называемые квантовыми вихрями, относительно простая структура и легкость генерации которых является преимуществом экспериментов со сверхтекучим гелием по сравнению с экспериментами с классическими жидкостями. Эти вихри интересны и сами по себе: это топологические структуры, представляющие собой одномерную область (core) радиусом порядка ангстрема, в которой предполагается нарушение сверхтекучести, и вокруг которого циркулирует сверхтекучая компонента гелия. В силу ее свойств на циркуляцию накладывается условие, что ее значение должно быть равно целому числу квантов циркуляции. Такие нити могут заканчиваться только на стенках сосуда или свободной поверхности жидкости, или же замыкаться сами на себя, образуя вихревые кольца. Более близкими по свойствам к таким вихрям могут быть, например, сверхтекучие вихри в недрах нейтронных звезд и гипотетические «космические струны», являющиеся дефектами пространства-времени.

Рождение большого количества таких вихрей приводит к образованию запутанной системы нитей, называемой вихревым клубком, такое состояние называется квантовой вихревой турбулентностью и качественно описывается в рамках феноменологической модели Вайнена, определяющей баланс между рождением и распадом вихрей [1]. Это состояние довольно сложное и еще мало изучено. Оно интересно и с практической стороны, так как оно существенно снижает теплопроводность жидкого сверхтекучего гелия, который, в частности, используется для охлаждения сверхпроводящих магнитов, что может привести к их поломке и последующей угрозе для жизни работающих с установкой людей.

Квантовые вихри рождаются в больших количествах при скоростях течения жидкости выше критических, что можно реализовать как механически (генерация волн на поверхности жидкости, колебание твердого тела в объеме и т.д.), так и с помощью нагрева, приводящего к возникновению противотока нормальной и сверхтекучей компонент и взаимодействию этих компонент при критической скорости противотока. Так как квантовые вихри сильно влияют на противоток, то и детектировать их количество можно с помощью тепловых волн – второго звука. Данная работа описывает эксперименты и полученные в них результаты для детектирования вихревой системы с помощью тепловых импульсов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная ячейка представляет собой два перпендикулярно пересекающихся канала (вертикальный – круглого сечения диаметром $d = 2,8$ mm; горизонтальный – квадратного сечения со стороной $b = 2,8$ mm), в каждый из которых помещаются два металлических пленочных нагревателя сопротивлением $R = 100$ -500 Ом. Нагреватель, находящийся в горизонтальном канале, используется в качестве источника квантовых вихрей, на него с генератора подаются электрические сигналы различной формы – постоянное напряжение, синусоидальный сигнал, импульсы разной частоты и скважности и т.д. Нагреватель в вертикальном канале используется для генерации пробных прямоугольных тепловых импульсов небольшой амплитуды и длительностью ~ 10 μ s, затухание которых является мерой концентрации вихрей в месте пересечения двух каналов. Для регистрации амплитуды прошедшего теплового импульса с противоположного торца цилиндрического волновода был расположен сверхпроводящий детектор-болومتر с чувствительностью ~ 10 V/K, что позволяло регистрировать изменения температуры в $\sim 0,1$ mK. Нагреватели и генератора, и детектора вихрей можно было перемещать в своих каналах и фиксировать на разные расстояниях относительно перекрестья каналов.

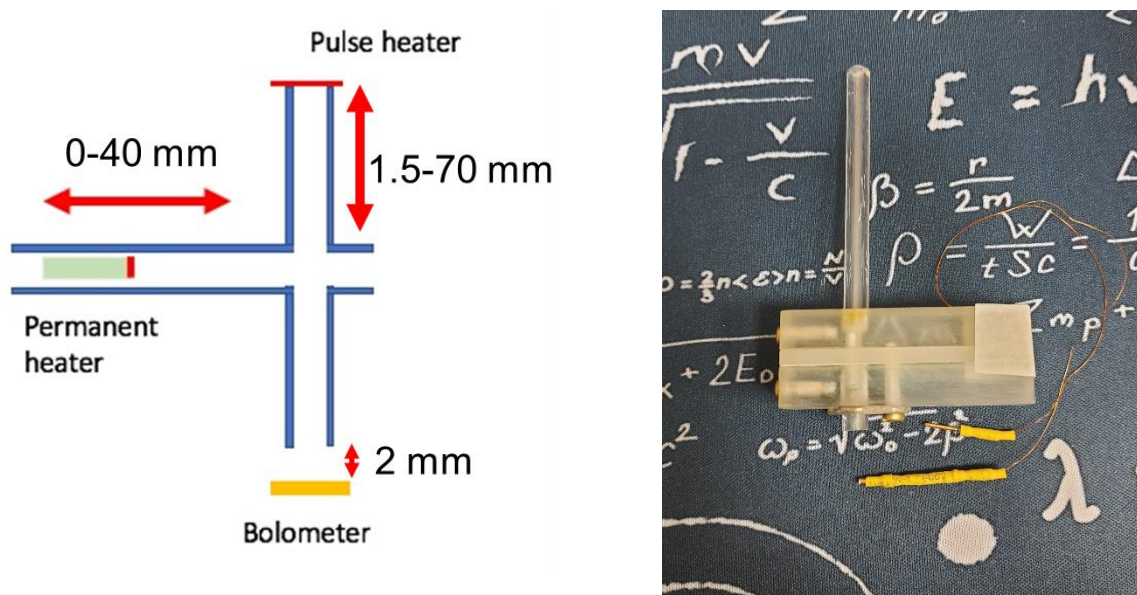


Рис. 1. Экспериментальная ячейка

Ячейка помещалась в стеклянный оптический криостат с системой откачки паров гелия. Температура гелиевой определялась по давлению насыщенных паров гелия.

Одинокные прямоугольные тепловые импульсы удобно использовать в качестве детекторов состояния вихревой системы по следующим причинам: при малой амплитуде импульсов и их малой длительности они сами никак не влияют на вихревую систему, в то время как изменение их формы и амплитуды при взаимодействии с вихрями интерпретировать наиболее просто. Однако второй звук – это сильно нелинейные волны, но коэффициент нелинейности может принимать разные значения в зависимости от температуры, в частности, при $T = 1.88$ K он становится равен нулю, что определило температурную область проведения этих экспериментов. При данной температуре тепловые импульсы не претерпевают нелинейных искажений. Чтобы это проверить, мы

исследовали зависимость формы и амплитуды коротких импульсов от амплитуды сигнала, подаваемого с генератора, результаты представлены на рис. 2.

Методика эксперимента следующая: на нагреватель – источник вихрей подается электрический сигнал выбранной формы и амплитуды с генератора, в результате чего в горизонтальном канале возникает тепловой поток, который определяется противотоком нормальной и сверхтекучей компонент гелия. После включения теплового потока в вертикальном канале со второго нагревателя запускается несколько импульсов второго звука, которые регистрируются болометром. Затем измеряются амплитуды этих импульсов, результат усредняется и пересчитывается из единиц напряжения в единицы температуры по калибровочным кривым болометра. Затем амплитуда (мощность) теплового потока увеличивается, и все шаги повторяются заново.

При достижении критической мощности теплового потока начинают рождаться квантовые вихри, при увеличении мощности будет увеличиваться и их количество. Таким образом, амплитуда пробных импульсов уменьшается все сильнее с увеличением мощности теплового потока, пока квантовая вихревая турбулентность полностью не воспрепятствует распространению тепла от источника импульсов.

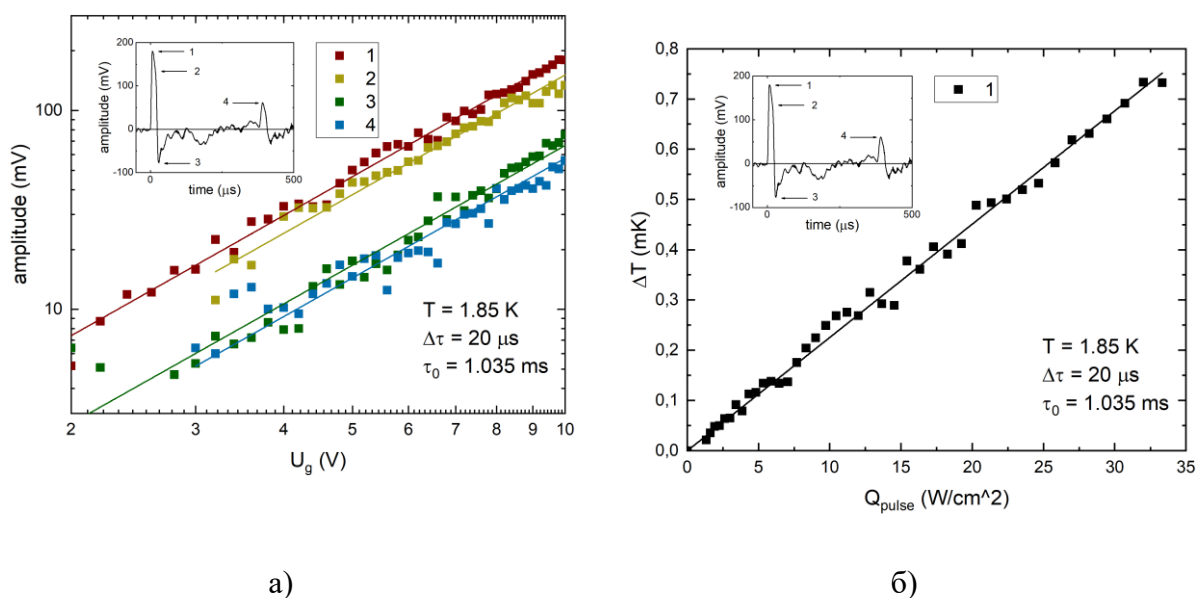


Рис. 2. а) Зависимость амплитуды импульсов второго звука, регистрируемых болометром, от амплитуды, подаваемой с генератора, $f \sim U^2$; б) амплитуда импульсов в пересчете на единицы температуры и мощности теплового потока, $\Delta T \sim Q$. На вставке изображены импульсы, зарегистрированные болометром, а также отмечены элементы, амплитуда которых была измерена: 1 – амплитуда на фронте импульса, 2 – амплитуда на спаде импульса, 3 – амплитуда импульса охлаждения, 4 – амплитуда импульса, отраженного от элементов ячейки и прошедшая тройной путь.

В данной работе были получены результаты при следующих условиях: положение источника импульсов относительно перекрестья остается неизменным и составляет ≈ 2 mm, источник вихрей располагался на расстоянии $L = 15$ mm (ближнее положение) и $L = 35$ mm (максимально дальнее положение) от перекрестья каналов. На источник вихрей подавался сигнал постоянного напряжения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Если исходить из предположения, что постоянный тепловой поток распространяется равномерно по всей длине канала со скоростью второго звука, то и рождаемые вследствие противотока нормальной и сверхтекучей компонент квантовые вихри также распределяются равномерно по всей длине волновода. Однако результаты экспериментов с мощными импульсами второго звука большой длительности [2] указывали на то, что вихри начинают рождаться в большом количестве вблизи поверхности нагревателя и образуют вихревой клубок, препятствующий дальнейшему теплоотводу. В таком случае, чем дальше будет расположен нагреватель – источник постоянного нагрева от перекрестья каналов в настоящем эксперименте, тем меньше будет затухание импульсов второго звука.

Мы провели измерения при двух крайних положениях нагревателя, генерирующего квантовые вихри, результаты представлены на рис. 3. Можно видеть качественно схожие квадратичные зависимости величины затухания импульсов от мощности теплового потока в горизонтальном канале. Разницу в амплитудах изначальных импульсов можно объяснить не параллельностью нагревателя-источника импульсов сечению канала при его перестановке.

Интересным моментом является отклонение от квадратичной зависимости величины затухания при увеличении дистанции нагревателя-источника вихрей от перекрестья каналов. Мы можем видеть, что при больших мощностях постоянного теплового потока ($> 3 \text{ W/cm}^2$) зависимость переходит в линейный вид, что может говорить о том, что в данном положении концентрация вихрей оказывается меньше, чем если бы источник вихрей находился вблизи источника импульсов.

Также нами были приблизительно измерены времена, за которые импульсы затухают после включения максимальной накачки вихревой системы, и за которые они полностью восстанавливаются после ее отключения. Результаты представлены на рис. 4. Мы можем видеть, что восстановление амплитуды импульсов происходит постепенно в течении нескольких секунд после выключения теплового потока, в то время как их затухание происходит практически мгновенно после включения теплового потока. Это указывает на то, что формирование вихревой структуры происходит за времена меньше разрешения наших экспериментов (менее секунды), в то время как распад вихревой системы требует времена существенно большие (несколько десятков секунд).

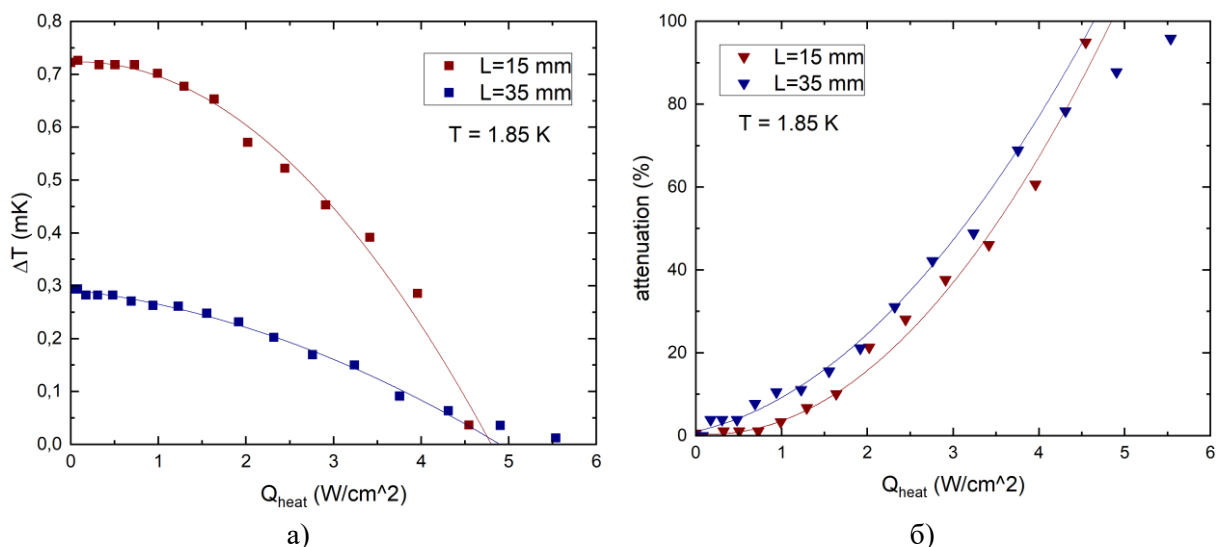


Рис. 3. а) Зависимость амплитуды импульсов, зарегистрированных болометром, от мощности теплового потока, б) величина относительного затухания от мощности теплового потока, $f \sim Q^2$.

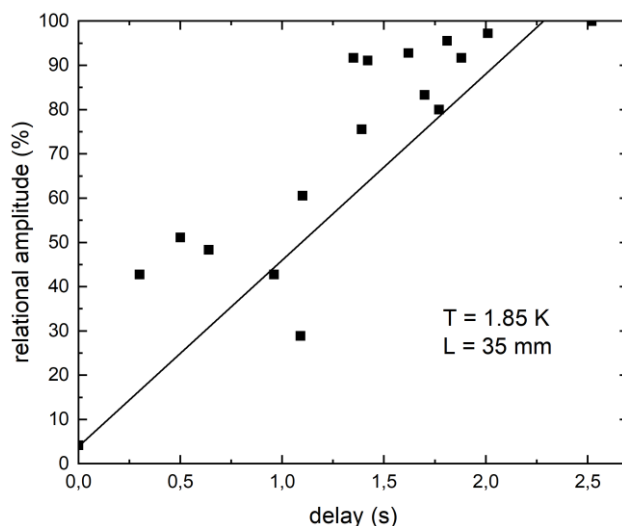


Рис. 4. Зависимость относительной амплитуды импульсов от времени, спустя которое они были запущены после выключения постоянного теплового потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На данный момент результаты неоднозначны, однако имеются интересные особенности, требующие дальнейшего более качественного и подробного изучения. Полученные в ходе работы времена распада вихревой системы воспроизводят результаты, полученные в работе [2].

Выражаем большую благодарность Лохову А. В. за изготовление ячеек для наших измерений.

Работа была выполнена в рамках хоз.договора №1377-23

ЛИТЕРАТУРА

1. Vinen W. F. Mutual friction in a heat current in liquid helium II (part III). Proc. Roy. Soc. A 242, 493 (1957).

2. Efimov, V. B.; Orlova, A. A.; Kondaurova, L. P.; Gorkun, A. G. Heat Transfer under Pulsed Heating in Superfluid Helium. *Low Temperature Physics* 45(9):988-993 (2019).
DOI: 10.1063/1.5121268
3. Ефимов В. Б. Квантовая турбулентность в сверхтекучем гелии. *УФН* 193 63–95 (2023).
DOI: 10.3367/UFNe.2021.11.039096

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ефимов Виктор Борисович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник (ORCID: 0000-0002-9195-2458). Институт физики твердого тела, г. Черноголовка Московской обл. e-mail: victor_efimov@yahoo.co.uk

Орлова Алеся Александровна – младший научный сотрудник (ORCID: 0000-0001-5700-3729). Институт физики твердого тела, г. Черноголовка Московской обл. e-mail: orlova_lkk@issp.ac.ru