

# **УСТАНОВКА ПО ИЗУЧЕНИЮ ВИХРЕВОГО ДВИЖЕНИЯ В УЗКОМ ЗАЗОРЕ МЕЖДУ ДИСКАМИ В СВЕРХТЕКУЧЕМ НЕ-II**

П.Г. Селин, А.А. Левченко

## **АННОТАЦИЯ**

В последнее время во всём мире наблюдается всё больший интерес к проблемам турбулентности. В связи с развитием методов регистрации движения и анализа данных появилась возможность более точной регистрации турбулентности и обработки данных.

В качестве модельных объектов для исследования турбулентности используются вода, жидкий водород, жидкий гелий и другие жидкости. Особый интерес для исследования представляет сверхтекучий гелий, так как в нём возникают квантовые вихри при скоростях выше некоторой критической и изучение свойств которых способствует расширению существующих представлений о физике турбулентных явлений.

## **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

ГИДРОДИНАМИКА, НЕЛИНЕЙНАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, КВАНТОВАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

## **SETUP FOR THE STUDY OF VORTEX MOTION IN A NARROW GAP BETWEEN DISKS IN SUPERFLUID HE-II**

P.G. Selin, A.A. Levchenko

## **ABSTRACT**

Recently, throughout the world there has been increasing interest in the problems of turbulence. Advances in motion recording and data analysis techniques have made it possible to more accurately record turbulence and process data.

Water, liquid hydrogen, liquid helium and other liquids are used as model objects for studying turbulence. Superfluid helium is of particular interest for research, since quantum vortices arise in it at speeds above a certain critical value, and the study of the properties of which helps expand existing ideas about the physics of turbulent phenomena.

## **KEYWORDS**

HYDRODYNAMICS, NON-LINEAR TURBULENCE, QUANTUM TURBULENCE, QUANTUM PHYSICS

## **ВВЕДЕНИЕ**

Несмотря на долгое изучение турбулентности в сверхтекучем Не-II [1-4], до сих пор не было получено чёткого представления о влиянии квантовых вихрей на процессы передачи момента силы в сверхтекучем гелии.

В настоящей работе приводится описание установки, которая была создана для наблюдения движения, которое может передаваться от вращаемого диска на неподвижный диск при строго заданном расстоянии между дисками. По полученным данным измерений угла отклонения верхнего диска при постоянной скорости можно оценить перенормировку вязкости Не-II между дисками.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема установки представлена на рисунке 1.

Вставка располагается внутри гелиевой полости криостата, у которого имеются оптические окна. Откачка паров жидкого гелия позволяет достигать температуры до 1,8 К.

Скорость вращения мотора постоянного тока 1, а также жёстко закреплённого на нём возбуждающего нижнего диска 2 радиусом 3,25 см, контролировали источником питания постоянного тока.

Момент силы, возникающий при вращении диска 2, по жидкому гелию в зазоре между дисками передаёт движение на верхний диск 3 того же радиуса, который подвешен на упругой нити 4 диаметром 230 мкм и длиной 80 см. При вращении диска 2 верхний диск 3 начинает закручиваться в сторону вращения нижнего диска 2. На верхнем диске 3 установлены зеркало 5 шириной 8 и высотой 10 мм, а также противовес 6 тех же размеров. Для детектирования угла отклонения диска от положения равновесия зеркало освещают лучом лазера 7. Отражённый луч попадает на установленный снаружи позиционный датчик 8, сигнал с которого через АЦП записывается в памяти компьютера.

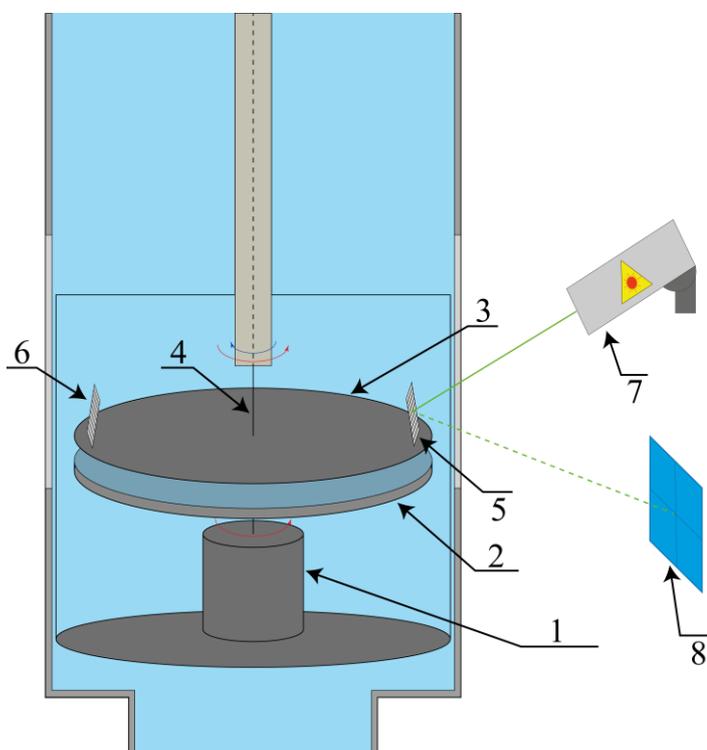


Рис. 1. Схема прибора: 1 – мотор, установленный на неподвижной платформе; 2 – нижний диск, жестко закрепленный на оси мотора; 3 – верхний диск; 4 – нить подвеса; 5 – зеркало; 6 – противовес; 7 – лазер; 8 – позиционный датчик.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной серии экспериментов температура He-II была постоянной и поддерживалась на уровне 1,8 К. Пределы измерения позиционного датчика 8 составляли  $\pm 1,5^\circ$  при расстоянии от зеркала до датчика 60 см.

Результаты измерений показаны на рис 2. Красные линии на рис. 2 соответствуют горизонтальной составляющей смещения сигнала с позиционного датчика, синими линиями показано смещение отраженного луча по вертикали.

Как показали наблюдения, при понижении скорости вращения мотора, т. е. скорости вращения возбуждающего диска, положение центра колебаний верхнего диска смещается в положительном направлении вдоль оси X, т.е. при постоянной скорости вращения мотора положение равновесия, подвешенного на упругой нити верхнего диска со временем, смещается на определённый угол.

Итак, установлено, что при вращении возбуждающего нижнего диска с заданной постоянной скоростью положение равновесия верхнего диска в системе координат  $\varphi$  - X смещается на определённый угол в положительном направлении вдоль оси X. Это указывает, что увлекаемая вращающимся диском 2 сверхтекучая жидкость, в которой возбуждаются квантовые вихри, увлекает за собой верхний диск, т.е. по жидкости, локализованной в зазоре между дисками, от нижнего диска к верхнему передается вращающий момент сил.

При скорости вращения 2,6 оборота/сек и зазоре между дисками в 6 мм среднее значения угла отклонения от первоначального положения равновесия составляет  $\langle \varphi \rangle = 0,35^\circ$  (рис. 2). И при этом в положении устойчивого равновесия верхний диск совершает небольшие осцилляции, как показано на рис. 2.

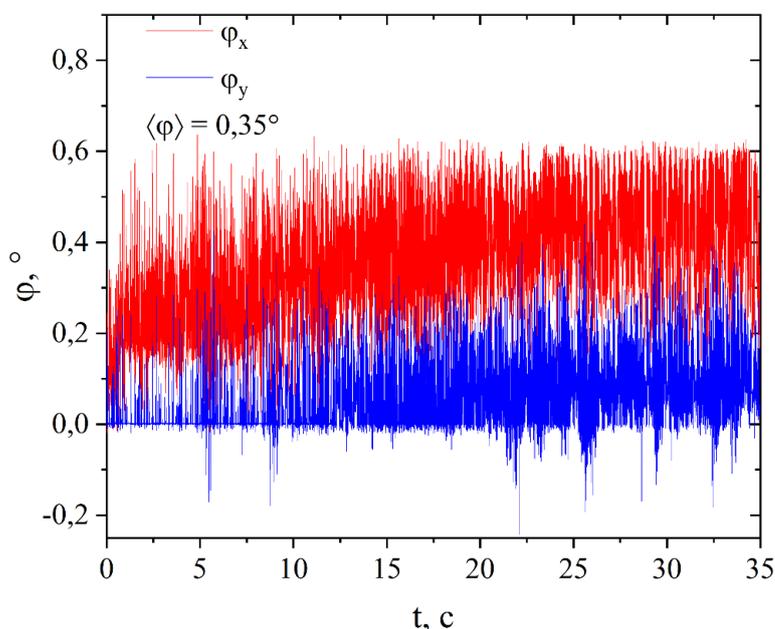


Рис. 2. Зависимость угла отклонения, подвешенного на упругой нити верхнего диска от времени при скорости вращения возбуждающего диска 2,6 оборота/сек и зазоре между дисками в 6 мм. Мотор включали в момент времени  $t = 0$  сек.

Выражение для расчёта перенормированной вязкости можно записать следующим образом:

$$\eta = \frac{2d^4 G \varphi h}{32L \omega r^4}, \quad (1)$$

$d$  – диаметр бронзовой нити,

$G$  – модуль сдвига бронзы,

$\varphi$  – угол отклонения верхнего диска,

$h$  – расстояние между дисками,

$L$  – длина бронзовой нити,

$\omega$  – частота вращения нижнего диска,

$r$  – радиус верхнего и нижнего дисков ( $r = 32,5$  мм).

Значение перенормировки вязкости  $\Delta\eta$  можно оценить, подставляя в выражение (1) известные значения исходных параметров. Как показал расчет, при учете вклада вихрей разница между значениями вязкости He-II при  $T=1.8$  К, указанными Доннели [5], и найденными в наших измерениях составляет  $\sim 19\%$ . Возбуждение вихрей в He-II при вращении нижнего диска приводит к заметному возрастанию эффективного значения вязкости жидкости в зазоре между дисками.

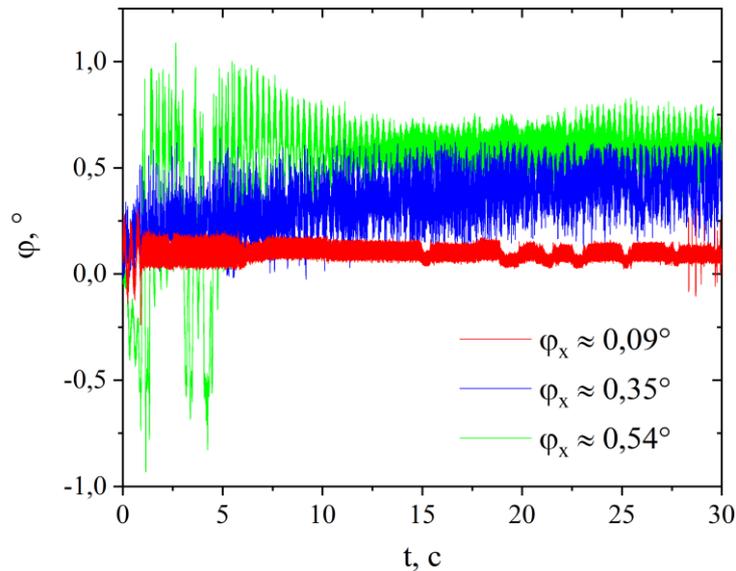


Рис. 3. Сравнение углов отклонения по горизонтали (по оси X) верхнего диска от времени при скорости вращения 1,25 (красная кривая), 2,61 (синяя кривая) и 4,99 (зеленая кривая) оборотов/сек и зазоре между дисками в 6 мм.

Воспользовавшись выражением (1) можно оценить разницу в значениях вязкости до и после перенормировки:

$$\langle\varphi\rangle \approx 0.09^\circ \rightarrow \Delta\eta \approx 5.15\% ,$$

$$\langle\varphi\rangle \approx 0.35^\circ \rightarrow \Delta\eta \approx 18.75\% ,$$

$$\langle\varphi\rangle \approx 0.54^\circ \rightarrow \Delta\eta \approx 24.95\% .$$

Наблюдаемое в наших измерениях увлечение свободно подвешенного на упругой нити верхнего диска сверхтекучим He-II, который заполняет зазор между верхним и вращающимся с постоянной скоростью нижним дисками, указывает, что при расчете вязкости He-II в зазоре необходимо учитывать возможность возникновения квантовых вихрей в сверхтекучей компоненте жидкости, т.е. квантовой турбулентности на момент силы, которая передается через узкий слой He-II от вращающегося диска неподвижному.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изготовлена компьютеризированная установка, предназначенная для изучения влияния процессов вихревого движения в He-II в узких зазорах на эффективную вязкость жидкости методом регистрации крутильных колебаний маятника, подвешенного в He-II на упругой нити.

Проведена серия тестовых экспериментов, которые подтвердили возможность регистрации угла отклонения, свободно подвешенного диска от положения равновесия вследствие передачи углового момента силы. Угловой момент передается через слой жидкости между дисками к подвешенному над ним свободному диску.

Также обнаружено, что при температуре в 1.8 К возникновению вихрей в He-II при скорости вращения выше 1 об/сек приводит к возрастанию эффективной вязкости сверхтекучей жидкости по сравнению с табличными значениями вязкости неподвижного He-II [5]. Наблюдено, что угол отклонения от равновесия верхнего диска, пропорциональный эффективной вязкости жидкости, возрастает с ростом скорости вращения управляемого снаружи нижнего диска.

Авторы благодарны А.В. Лохову за помощь в создании низкотемпературной вставки, а также И.А. Ремизову и Л.П. Межову-Деглину за плодотворные дискуссии.

Исследования выполнены в рамках гранта РФФИ №23-72-30006.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андроникашвили, Э.Л. // ЖЭТФ. 1946. т. 16. вып. 9. С. 780-785.
2. Eltsov, V.B., de Graaf R., Hanninen R., Krusius M., Solntsev R.E., L'vov V.S., Golov A.I., Walmsley P.M. // Progress in Low Temperature Physics. 2009. V. 16. PP. 45-146.  
DOI:10.1016/s0079-6417(08)00002-4
3. Kinzel, M., Nobach, H., Tropea, C., Bodenschatz, E. // 13th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. – Lisbon, Portugal, 26-29 June. 2006.
4. Tabeling P. Zocchi, G., Belin, F., J. Maurer, J., Willaime, H. // Physical Review E. 1996. V.53. №2. PP. 1613-1621. PACS number(s): 47.27.—i, 47.55.Bx, 47.80.+v.
5. Donnelly, R.J., Barenghi, C.F. // Journal of Physical and Chemical Reference Data. 1998. V. 27. №1217. PP. 1220-1274. <https://doi.org/10.1063/1.556028>

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Селин Петр Геннадьевич – м.н.с., аспирант (ORCID: 0000-0001-9466-3080). Институт физики твёрдого тела им. Ю.А. Осипяна РАН, Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН г. Черногоровка Московской обл. e-mail: [selin@issp.ac.ru](mailto:selin@issp.ac.ru)

Левченко Александр Алексеевич – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, доцент (ORCID: 0000-0002-4161-9083). Институт физики твёрдого тела им. Ю.А. Осипяна РАН, Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН г. Черногоровка Московской обл. e-mail: [levch@issp.ac.ru](mailto:levch@issp.ac.ru)