

## РЕГИСТРАЦИЯ ВИХРЕВОГО ДВИЖЕНИЯ В ОБЪЕМЕ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ ПО ИНЖЕКТИРОВАННЫМ ЗАРЯДАМ

## REGISTRATION OF VORTEX MOTION IN THE BULK OF SUPERFLUID HELIUM BY INJECTED CHARGES

М.Р.Султанова<sup>1,2</sup> / mabinkaiftt@issp.ac.ru, А.А.Левченко<sup>2</sup>, И.А.Ремизов<sup>2</sup>

**M.R.Sultanova, A.A. Levchenko, I. A. Remizov**

<sup>1</sup>Институт теоретической физики им.Л.Д.Ландау РАН, г.Москва

<sup>2</sup>Институт физики твердого тела РАН, г.Москва

*Нами разработана методика изучения вихревого движения, создаваемого волнами на поверхности сверхтекучего гелия-4 с помощью зарядов, инжектированных в объем жидкости. Заряды перемещаются от источника к пятисекционному коллектору, установленному на противоположной стороне. Взаимодействие зарядов с вихрями, образованными волнами на поверхности, приводит к изменению распределения токов, регистрируемых сегментами коллектора.*

*We developed a technique for studying the vortex motion created by waves on the surface of superfluid helium-4 using charges injected into the bulk of the liquid. The charges move from the source to the five sectional collector mounted on the opposite side. The interaction of charges with vortices formed by the waves on the surface leads to a change in the distribution of currents recorded by the collector segments.*

Ключевые слова: *сверхтекучий гелий-4, вихревое движение, волны на поверхности.*

Key words *superfluid helium-4, vortex motion, waves on the surface.*

### ВВЕДЕНИЕ

Вихревое движение может быть создано волнами, распространяющимися по поверхности жидкости. Две неколлинеарные волны образуют вихревую решетку с периодом, равным длине волны [1]. Первоначально эксперименты по генерации вихрей волнами проводились на воде. Однако в природе, помимо классических жидкостей, есть еще квантовые жидкости, в которых вихревое движение квантовано. К таким жидкостям относится гелий-4 при температурах ниже 2,17. В области температур около 2,17 вихревые движения как в нормальной, так и в сверхтекучей фазах сосуществуют в объеме жидкого гелия-4. При температурах около 1,3 К преобладает движение сверхтекучей компоненты. Инжектированные заряды являются хорошими пробными частицами для изучения вихревых течений в сверхтекучей жидкости, так как они взаимодействуют с квантовыми и нормальными вихрями [2].

Основная цель данной работы - исследование формирования квантовых вихревых течений поверхностными волнами в широком диапазоне температур и изучение эволюции вихревых структур при изменении условий волновой накачки.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования взаимодействия инжектированных положительных зарядов с вихревым движением в сверхтекучем гелии проводились в экспериментальной ячейке, помещенной в контейнер. Контейнер располагался в вакуумной полости гелиевого криостата и соединялся с сосудом с жидким гелием с помощью медного хладопровода.

Экспериментальный контейнер представлял собой цилиндр со встроенной в него экспериментальной ячейкой. Шесть металлических граней экспериментальной ячейки, не соприкасающиеся друг с другом, образуют куб. Источник заряда ( $U_{\text{sours}}$ ) был установлен в одной из вертикальных граней. Гелий конденсировался в ячейку из резервуара высокого давления с газообразным гелием через капилляр. Источник заряда находился под поверхностью жидкости. На противоположной стороне расположен 5-сегментный коллектор, (-2,-1,0,1,2) - на рис. 1. Каждый сегмент был подключен к усилителю. Напряжение прикладывается к граням куба, так что введенные заряды перемещаются от источника к коллектору.

Выходные линии усилителя были подключены к АЦП. Сигнал, выходящий из АЦП, был оцифрован и записан. Верхний сегмент представлял собой полупрозрачное стекло.

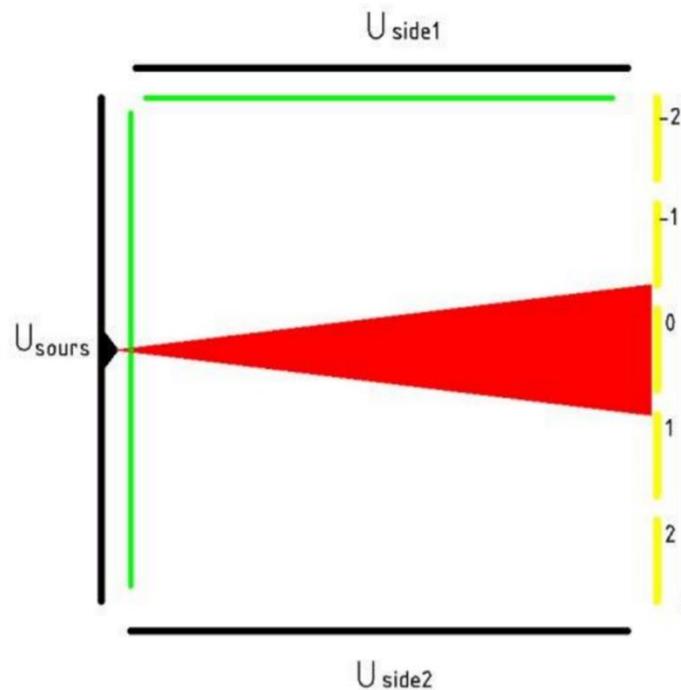


Рис. 1. Вид сверху экспериментальной ячейки. Плунжеры показаны зелеными линиями. Сегменты принимающего коллектора отмечены желтыми линиями.

Генерация волн на поверхности жидкого гелия осуществлялась двумя плунжерами, установленными перпендикулярно друг другу [3] (рис.1). Плунжеры приводились в движение независимо друг от друга с помощью электромагнитного привода. В экспериментах накачка проводилась с частотой 1-30 Гц, амплитудой волны до 0,1 мм и разностью фаз от  $-90^\circ$  до  $90^\circ$ . В наших исследованиях использовались положительные заряды (ион He +). Эксперименты проводились при следующих рабочих напряжениях:  $U_{\text{sours}} = 300-400$  В,  $U_{\text{side1,2}} = 6-100$  В,  $U_{\text{up}} = 5$  В,  $U_{\text{down}} = 25-100$  В. Во время измерения было получено около 100 экспериментальных точек (~ 5 мин). Токи, приходящие на сегменты коллектора были оцифрованы, а затем подвергнуты усреднению. Фурье-фильтрация выполнялась на низких частотах для измерения постоянной составляющей тока. Также было найдено среднее значение за весь временной интервал.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В экспериментах измерялся ток на принимающих коллекторах перед накачкой и при возбуждении волн на поверхности сверхтекучего гелия плунжерами. Электрическая схема эксперимента выглядела следующим образом: на источник подавалось напряжение

$U_{\text{sours}} = 400$  В, на боковых гранях  $U_{\text{side1,2}} = 6$  В, на верхнюю  $U_{\text{up}} = 5$  В, на нижнюю  $U_{\text{down}} = 25$  В. До включения накачки ток центрального коллектора находился на уровне 88 фА. Токи на коллекторах -1 и 1 составили 21,8 фА и 24 фА соответственно (синие гистограммы на рис. 2). Затем включалась накачка с частотой 13 Гц при разности фаз электрических сигналов, подаваемых на плунжеры  $\Delta\varphi = 90$ . После нескольких минут нахождения в стационарном состоянии токи были перераспределены: на центральном сегменте ток снизился до 4,5 фА, в левом сегменте (1) ток увеличился до 96 фА, в правом сегменте -1 ток, слева на уровне 17 фА. (оранжевые гистограммы на рис.2)

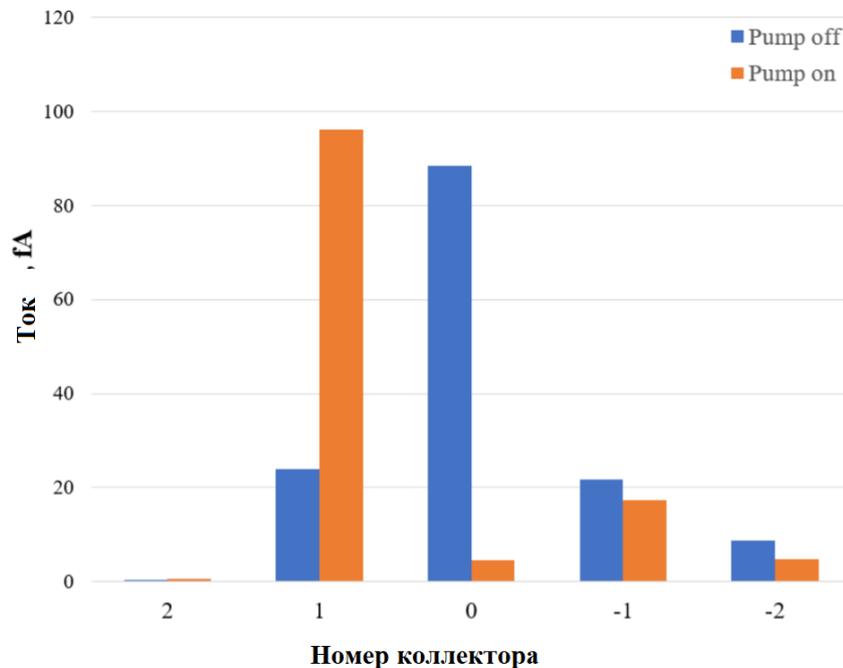


Рис.2. Ток на приемном коллекторе до накачки (синие гистограммы) и во время накачки (оранжевые гистограммы).  $U_{\text{sours}} = 400$  В,  $U_{\text{side1,2}} = 6$  В,  $U_{\text{up}} = 5$  В,  $U_{\text{down}} = 25$  В,  $f_{\text{re}} = 13$  Гц,  $\Delta\varphi = 90^\circ$ .

Для оценки поведения вихревой системы после выключения накачки измерялась временная зависимость величины полного тока, поступающего на все 5 коллекторов. Через 5 минут после включения возбуждения волн на поверхности полный ток на коллекторах составил 99 фА. Точками на рис. 3 показаны результаты измерений, проведенных через 0, 5, 10, 15, 35, 45 минут после выключения накачки. Видно, что полный ток увеличивается со временем примерно на 30%. Можно предположить, что примерно такая же доля зарядов не достигла коллекторов из-за взаимодействия с вихрями. По-видимому, в результате взаимодействия заряды могли отклоняться от прямой траектории и переходить к боковым граням.

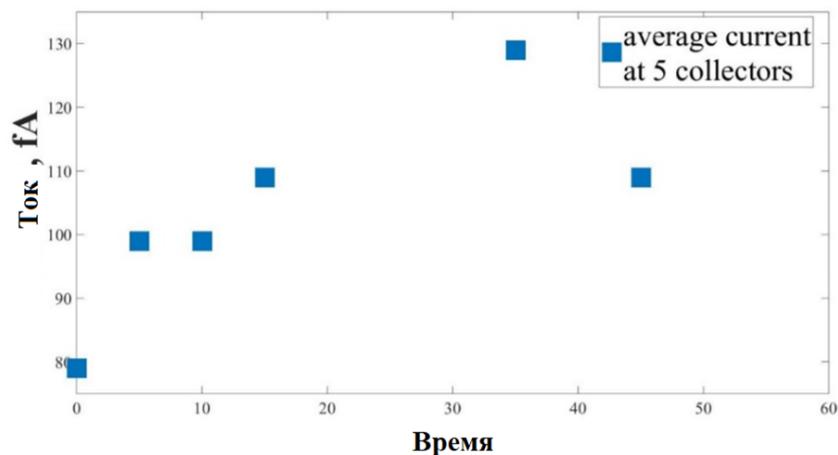


Рис. 3. Зависимость полного тока от времени.  $U_{\text{sours}} = 350$  В,  $U_{\text{side1}} = 6$  В,  $U_{\text{side2}} = 6$  В,  $U_{\text{up}} = 5$  В,  $U_{\text{down}} = 25$  В,  $F_{\text{req}} = 13$  Гц,  $A = 10$  В,  $\Delta\varphi = 90^\circ$

Предполагается, что при накачке волны образуют вихревую решетку, которая со временем превращается в сложную структуру с вихрями разных размеров. После выключения накачки вихревая структура затухает в результате вязких потерь. Эта зависимость отличается от предсказаний Винена для полной длины квантового вихря  $L \propto t - 3/2$ . Взаимодействие зарядов с системой вихрей ослабевает, что приводит к увеличению полного тока.

## ВЫВОДЫ

Разработана методика исследования поведения вихревой системы в сверхтекучем гелии-4 с помощью инжектируемых зарядов. Первые эксперименты показывают, что волны на поверхности сверхтекучего гелия порождают вихри, проникающие в объем. В будущих экспериментах мы планируем более подробно изучить взаимодействие зарядов с квантовыми вихрями.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ #075-15-2019-1893

## ЛИТЕРАТУРА

1. S V Filatov, V M Parfenyev, S S Vergeles, M Y Brazhnikov, A A Levchenko, V V Lebedev 2016 Phys. Rev. Lett. 116 (5) 054501.
2. P M Walmsley, A I Golov, H E Hall, A A Levchenko, and W F Vinen 2007 PRL 99 265302
3. M Yu Brazhnikov, A A Levchenko, L P Mezhev-Deglin 2002 Instrum. Exp. Tech. 45 758