

ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ ВИХРЕВОЙ СИСТЕМЫ В СВЕРХТЕКУЧЕМ ГЕЛИИ

В.Б. Ефимов

АННОТАЦИЯ

Сверхтекучий гелий является модельной средой, имеющей свойства физического вакуума. В таком физическом вакууме возможно контролируемым образом за счет колебаний различных тел вводить такие возбуждения, как квантовые вихри, изучать процессы формирования вихревой системы, условия ее существования и характеристики распада. В данном докладе предлагается модель и приводятся расчеты перехода колебаний сетки от ламинарного движения к рождению одиночных вихрей и при дальнейшем увеличении возбуждений к квантовой турбулентности. Проводится сравнение вычислений с ранее полученными экспериментально зависимостями свободного затухания сетчатой мембраны.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

СВЕРХТЕКУЧИЙ ГЕЛИЙ, МОДЕЛЬ, ВИХРЕВАЯ СИСТЕМА, ВАКУУМ

DYNAMICS OF THE FORMATION OF A VORTEX SYSTEM IN SUPERFLUID HELIUM

V.B. Efimov

ABSTRACT

Superfluid helium is a model medium having the properties of a physical vacuum. In such physical vacuum, it is possible to introduce by any bodies vibration excitations such as quantum vortices in a controlled manner, and to study the process of formation of the vortex system, the conditions of its existence, and the characteristics of decay of a vortex tangle. In this report it offers a model and calculation for transition of grid vibration from laminar motion to creation single vortexes and farther to quantum turbulence. It was done comparison results of calculation with earlier obtained data of free decay grid oscillation.

KEYWORDS

SUPERFLUID HELIUM, MODEL, VORTEX SYSTEM, VACUUM

Под вакуумом традиционно понимается пространство свободное от вещества. В технике и прикладной физике под вакуумом понимают среду, состоящую из газа при давлении значительно ниже атмосферного. Важным свойством абсолютного вакуума является отсутствие сопротивления движению тел из-за отсутствия частиц, увеличивающих свой импульс и энергию при взаимодействии с движущимся телом.

Под физическим вакуумом (вакуумное состояние) в квантовой физике понимают низшее (основное) энергетическое состояние квантованного поля, обладающее нулевым импульсом, моментом импульса и других квантовых чисел. При этом такое состояние не обязательно соответствует пустоте: поле в низшем состоянии может быть, например, полем квазичастиц в твердом теле. В этом смысле сверхтекучий гелий-4 является физическим вакуумом, в котором переход к сверхтекучести связан с образованием конденсата Бозе-Эйнштейна. Одно из наиболее ярких проявлений квантового поведения макроскопической

системы является существование сверхтекучего гелия в жидком состоянии при нулевых температурах при давлении меньше 25 атм. При фазовом λ -переходе концентрация нормальной компоненты и количество возбуждений в сверхтекучем гелии начинает уменьшаться и падает до нуля при нулевой температуре. Таким образом сверхтекучий гелий при температуре близкой к 0 К представляет из себя среду со свойствами физического вакуума с бесконечно малым количеством возбуждений. Сверхтекучий гелий при низких температурах (ниже 0,1 К), так же, как и вакуум, не создает реального сопротивления движению тел с малыми скоростями.

Ранее нами были проведены эксперименты по затуханию колебаний сетки, натянутой на круговую оправку диаметром в 100 мм и являющейся мембранным осциллятором. Для создания движения такого осциллятора к сетке прикладывалось высокое постоянное напряжение (500 В). С двух сторон от сетки на расстоянии по 1 мм находились два рабочих электрода. На один из двух электродов подавалось малое переменное напряжение (\sim мВ), что меняло электростатическую силу взаимодействия между сеткой и этим электродом и вызвало колебания сетки с частотой переменного напряжения. Амплитуда и скорость колебаний сетки измерялась по величине индуцированного тока на второй электрод, находящийся с противоположной стороны от высоковольтного электрода. Измерения проводились при резонансных колебаниях сетки ($fR \sim 1000$ Hz) при нулевой температуре ($T=10$ мК). В исследовании изучалось затухание колебаний после выключения резонансных возбуждений.

Колебания такой сетки в сверхтекучем гелии, как в физическом вакууме, при малых возмущениях определяются ламинарным обтеканием жидкостью движущегося объекта. Увеличение амплитуды и скорости колебаний выше критической v_{C1} приводит к рождению квантовых вихрей – возбуждений в физическом вакууме. Дальнейшее увеличение амплитуды и, соответственно, скорости выше второй критической скорости $v > v_{C2}$ движения сетки формирует турбулентное состояние сверхтекучей жидкости, аналогичное турбулентности обычной жидкости. При этом сила сопротивления движению тела (в нашем случае сетки) пропорциональна скорости в квадрате. Генерируемое при этом возбуждение – квантовые вихри – диссипирует на стенках сосуда, друг на друге или исчезают, испуская фононы.

Энергия единицы длины вихревой нити определяется кинетической энергией движения сверхтекучей компоненты

$$E_v = \int_{r_0}^r \pi \rho_s V_s^2 r dr = \frac{n^2 \rho_s \kappa^2}{4\pi} \ln\left(\frac{r}{r_c}\right),$$

где $r_c \approx 1,28 \pm 0,13$ Å при $T=0,28$ К, ρ_s – плотность сверхтекучей компоненты. При этом поток сверхтекучей компоненты вокруг кора вихря квантуется:

$$\Gamma = \oint_C V_s \cdot dl = n\kappa$$

Квант циркуляции определяется как $\kappa = h/m_{4He} = 9.998 \cdot 10^{-8}$ м²/с, h – постоянная Планка, m_{4He} – масса атома гелия. Оценивая $n=1$ (вихрям энергетически выгодно принимать минимально возможное n , в ⁴He устойчивым является вихрь с одним квантом циркуляции $n=\pm 1$), $\ln(1/r_c) \sim 10$ (что вполне разумно при достаточно плотной упаковке вихрей), $\rho_s = 0.147$ г/см³, получаем энергию на единицу длины вихревой нити:

$$\frac{E}{L} = (\rho k^2 / 4\pi) \ln(l/r_0) \approx 1.2 \times 10^{-1} \frac{\text{Дж}}{\text{м}} = 1.2 \times 10^{-1} \frac{\text{Дж}}{\text{МКМ}}.$$

Таким образом для рождения вихря определенной длины требуется дополнительная энергия, которая забирается от энергии колеблющейся системы, уменьшая амплитуду колебаний последней.

В экспериментах регистрировалось временное уменьшение амплитуды колебания сетки при выключении накачки (Рис. 1). Приведенные графики были получены при последовательном увеличении напряжения внешней накачки, стабилизации начальной амплитуды и последующем выключении возбуждающего сигнала. При малых амплитудах накачки затухание колебаний сетки определялось добротностью механической системы и описывалось экспоненциальной зависимостью с временной константой близкой к затуханию колебаний сетки в вакууме $\tau \approx 50-100$ с. Увеличение накачки приводит к появлению затухания резко отличное от ламинарного движения, которое резко меняется во времени – область «convex decay» («выпуклый режим» затухания колебаний). Уменьшение амплитуды (и передача энергии в вихревую систему) продолжается вплоть до достижения величины скорости значений $v < v_{c1}$, затем происходит переход к экспоненциальному затуханию. Такое поведение затухания продолжается до начальных скоростей и амплитуд колебаний этой резонансной системы вплоть до v_{c2} . Увеличение накачки до начальных колебаний (и скоростей) с более высокой интенсивностью начинает генерировать турбулентное состояние сверхтекучего гелия. При этом затухание системы происходит по зависимости близкой к экспоненциальной с временной константой $\tau \approx 10-20$ с.

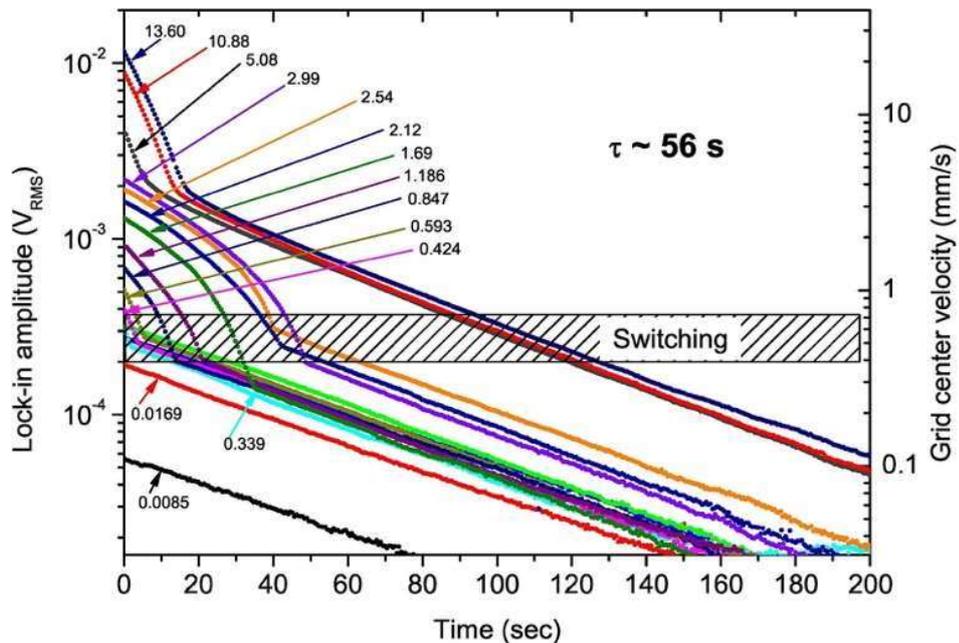


Рис. 1. Свободное затухание колебаний осциллятора в виде сетчатой мембраны в сверхтекучем гелии при различных амплитудах начальных осцилляций, $T=10$ мК, $P=5$ атм., $V_{DC}=500$ В. Регистрировался сигнал на измерительном электроде после выключения гармонического сигнала на рабочем электроде (указано на графике в V_{rms}).

После перехода системы в турбулентное состояние режим «convex decay» исчезает и для его появления снова необходимо было проделать «восстановительную» процедуру,

состоящую в том, чтобы перевести гелий в нормальное состояние и медленно его охладить до рабочей точки в $T=10$ мК.

Для объяснения такого поведения возбуждений в гелии в режиме «convex decay» при сверхнизких температурах нами была предложена следующая модель (рис. 2). В сверхтекучем гелии рождение вихрей возможно только при наличии остаточных вихрей (так называемое «remnant vorticity»), рождение вихрей «от стенки» (нуклиация вихрей) возможна лишь при больших скоростях сверхтекучей компоненты для преодоления «зеркального» потенциального барьера. Наличие таких вихрей, закрепленных на осцилляторе, при малых скоростях движения сетки приводит лишь к изменению силовых констант колеблющейся системы – вихри растягиваясь и сжимаясь меняют только собственную энергию и, естественно, имеют собственное натяжение. Аналогия с колебаниями массы на пружинном подвесе. Однако увеличение скорости движения точек закрепления вихрей приводит к образованию перегибов на вихрях, когда вихрь не успевает сократить свою длину, следуя за движением точки закрепления, что приводит к самопересечению вихря, отрыву от начального вихря вторичных вихревых колец. Увеличение длины вихревой системы связано с дополнительной потерей энергии колеблющейся системы на «рождение одиночных вихрей». При этом чем больше амплитуда колебаний, тем большую энергию накачивает осциллятор в вихревую систему и тем быстрее он теряет собственную кинетическую энергию.

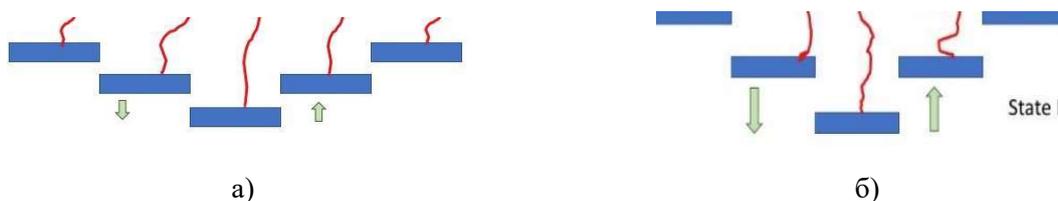


Рис. 2. Поведение вихря в двух возможных режимах: при малых амплитудах колебания, когда вихрь только растягивается и сжимается при движении точки закрепления (а) и в случае образования перегибов, самопересечения и пересечения с соседними вихрями, формирование вихревых петель (б)

Оценим скорость уменьшения энергии $E(t)$ при первоначальной энергии колеблющейся системы E_0 . Для осцилляции сетки мы предполагаем, что амплитуда существенно не меняется в течении каждого колебания. Длина рождающихся при каждом колебании вихрей в этом случае будет пропорциональна разности $A-A_0$, где A_0 – амплитуда больше которой вихри начинают рождать одиночные петли. В этом случае временная зависимость энергии колеблющейся системы определятся как $E(t) = E_0 - f(A-A_0) \times t$, при этом энергия колеблющейся системы зависит от амплитуды как $E \sim A^2$ или $\sim v^2$. Для расчета предлагается, что уменьшение энергии происходит в результате суммы двух процессов: свободного затухания колебаний сетки с постоянной времени, как для ламинарного режима, и уменьшение энергии за счет передачи ее в одиночные вихревые петли. Результаты модельного расчета вы можете видеть на рис. 3.

При увеличении скорости движения осциллятора вихри начинают рождаться без наличия остаточных вихрей за счет преодоления потенциального барьера – нуклиационное зарождение вихрей от стенки [1]. Переход системы в турбулентное состояние, рождение большого количества вихрей приводит к очистке поверхности осциллятора от остаточных вихрей, что делает механизм рождения одиночных вихрей, как описано выше, невозможным, что и наблюдается в эксперименте.

Для турбулентного рождения вихрей зависимость силы сопротивления (что отвечает интенсивной перекачки энергии в вихревую систему) пропорциональна скорости в квадрате:

$$F \propto v^2.$$

Потери энергии при такой генерации вихрей можно описать следующим соотношением:

$$\Delta E \sim (v^2 - v_0^2) * t,$$

где v_0 – критическая скорость, выше которой происходит переход в турбулентное состояние. Кроме этого, так же, как и при генерации одиночных вихрей, учитывается собственное экспоненциальное затухание сетки.

Проведенные расчеты в рамках предложенных моделей представлены на рис. 3.

Из графиков видно, что предложенные модели достаточно хорошо описывают экспериментальные данные.

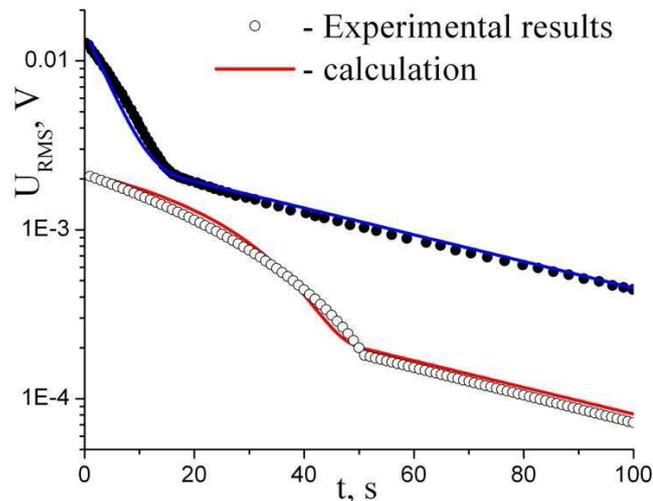


Рис. 3. Результаты вычислений процессов формирования вихрей в двух состояниях: открытые кружки – экспериментальные данные для «convex decay» типа затухания колебаний, соответствующие малым амплитудам и скоростям начальных колебаний, красная линия – расчетная кривая; черные точки – эксперимент при больших начальных амплитудах колебаний – синяя линия соответствуют рассчитанным величинам турбулентного затухания колебаний.

Таким образом эксперименты с мембранным сеточным осциллятором в сверхтекучем гелии при нулевой температуре ($T \approx 10$ мК) продемонстрировали два различных состояния гелиевой вихревой системы. State I («исходное состояние») существует при начальном увеличении осцилляции сетки от самой малой амплитуды колебаний (скорости) до более высоких без создания состояния развитой турбулентности. При совсем малых скоростях движения осциллятора затухание колебаний после выключения внешней накачки определяется добротностью системы с учетом присоединенной массы обтекающей жидкости и имеет экспоненциальный характер. Характерное время $\tau \sim 50-100$ сек определяется качеством системы, зависящее от предыстории и, как мы предполагаем, от количества

остаточных, закрепленных на сетке вихрей. Увеличение амплитуды и скорости движения сетки выше $v_{c1} \lesssim 0,4$ мм/с (скорость центра сетки) приводит к «выпуклому» («convex decau») типу затухания свободных колебаний сетки. Этот эффект, воспроизводимый до достижения скоростей перехода колебаний сетки в состояние развитой турбулентности $v \approx v_{c2}$. Превышение этой скорости $v > v_{c2}$ и переход в состояние турбулентности приводит к исчезновению режима затухания «convex decau». Состояние сверхтекучего гелия после перехода в состояние квантовой турбулентности мы назвали State II («обычное состояние»). Критическая скорость экспоненциального свободного колебания сетки после перехода в квантово-турбулентное состояние (состояние II) начинается с $v_{c2} \lesssim 4$ мм/с. Переход обратно в состояние I возможен только после некоторых ухищрений.

Это разделение на два разных поведения вихревой системы «исходное состояние» и «обычное состояние» соответствует более ранним наблюдениям в экспериментах с измерениями перепада давления и градиента температуры при постоянном тепловом потоке [2]. Изменение поведения вихрей при их распространении в пространстве наблюдалось также в опытах с детектированием вихрей, когда расстояние от кварцевого камертона, как генератора вихрей, до аналогичного в качестве детектора (но с несколько отличной частотой) составляло 1 см, что существенно больше размеров камертонов [3].

Оценка скорости передачи энергии в вихревую систему при «выпуклом» распаде показывает, что увеличение общей длины вихрей на несколько порядков превышает амплитуду колебаний [4]. Небольшое увеличение амплитуды колебаний сетки над ламинарным движением в этом режиме можно интерпретировать как появление изгибов на закрепленных вихрях, самопересечение вихрей и пересечение с соседними вихрями, процессы формирования вихревых свободных петель. Скорость уменьшения энергии колебания осциллятора (в нашем случае – сетчатая мембрана) определяется превышением амплитуды колебаний над максимальной ламинарной амплитудой $\sim A - A_0$.

Увеличение скорости сетки свыше v_{c2} формирует квантово-турбулентное состояние сверхтекучего гелия. Потери энергии в этом случае пропорциональны скорости (или амплитуде) в квадрате до перехода к ламинарному движению. Переход в состояние квантовой турбулентности изменяет распределение положения закрепленных вихрей на сетке и их концентрацию. В более ранних экспериментах по колебаниям сетки наблюдалась очистка сетки и возврат вихревой системы сверхтекучего гелия в «исходное состояние» [5] после очень энергичной встряски осциллятора.

Компьютерные расчеты процессов потери энергии в рамках предложенных моделей рождения вихрей достаточно хорошо коррелирует с экспериментальным поведением затухания свободных колебаний сетки из состояния I и из состояния II.

Работа была выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vinen W.F., Skrbek L., Proc. of the National Acad. of Scie., 111 Suppl 1 4699 (2014)
2. Ефимов В.Б. Квантовая турбулентность в сверхтекучем гелии, УФН, в печати (2022)
3. Deepak Garg, V. B. Efimov, M. Giltrow, et al, Mutual interactions between objects oscillating in isotopically pure superfluid ^4He in the $T \rightarrow 0$ limit, ФНТ, 38, 11, 1300-1305 (2012),
4. Victor Efimov, Quantum turbulence in superfluid helium – number of vortexes created by vibration of oscillators, J.of Phys.: Conf. Ser., in press (2022)

5. Nichol H. A., Skrbek L., Hendry P.C, McClintock P.E.V, Experimental investigation of the macroscopic flow of He II due to an oscillating grid in the zero-temperature limit, Phys. Rev. E 70 056307 (2004)

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