

Наблюдение механоэлектрического эффекта в He II

А.С. Рыбалко, С.П. Рубец

*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина
E-mail: rybalko@ilt.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 11 апреля 2005 г., после переработки 26 апреля 2005 г.

С помощью методики торсионного генератора проведено экспериментальное исследование электрического отклика в ^4He в интервале температур $1,5-T_\lambda$. Показано, что движение нормальной компоненты He II, увлекаемой стенкой торсионного осциллятора, вызывает динамическую поляризацию жидкости. Установлено, что потенциал индукции пропорционален квадрату линейной скорости стенки осциллятора.

За допомогою методики торсіонного генератора проведено експериментальне дослідження електричного відгуку в ^4He в інтервалі температур $1,5-T_\lambda$. Показано, що рух нормальної компоненти He II, яка захоплена стінкою торсіонного осцилятора, викликає динамічну поляризацію рідини. Установлено, що потенціал індукції пропорційний квадрату лінійної швидкості стінки осцилятора.

PACS: 67.40.Pm

Введение

Возможная связь макроскопического сверхтекучего движения и электрических свойств жидкости — одна из малоизученных проблем физики сверхтекучего гелия.

Недавно впервые установлено экспериментально, что относительное движение сверхтекучей и нормальной компонент He II в волне второго звука сопровождается появлением электрической индукции [1]. По существу наблюдался зарядовый волновой процесс, протекавший наряду с хорошо изученным волновым процессом второго звука. Это позволило предположить, что, если в гелии присутствует тепловой поток, то каким-то образом перераспределяются заряды, входящие в состав атомов гелия. Стало ясно, что в волновом процессе второго звука в периодическом встречном движении не только находятся сверхтекучая и нормальная компоненты (их центры инерции), но и смещаются центры зарядов. В работе [1] также показано, что при распространении первого звука подобный эффект не наблюдается.

Характерной особенностью второго звука является то, что волновой процесс сопровождается колебаниями температуры, что затрудняло интерпретацию экспериментальных данных [1].

Данная работа, являющаяся продолжением и развитием работы [1], использует метод торсионного осциллятора [2], основанный на том, что при движении твердого тела в He II с докритической скоростью в движение увлекается лишь нормальная компонента. Таким образом, можно создать относительное движение сверхтекучей и нормальной компонент, не меняя ни температуры, ни нормальной ρ_n и сверхтекучей ρ_s плотностей, и избежать проблем, присущих тепловому методу возбуждения движения.

Экспериментальная аппаратура и методика измерений

Измерительным устройством служил торсионный осциллятор, разработанный группой Репши [2] применительно к сверхтекучему гелию. Эта методика хорошо себя зарекомендовала при исследованиях фазовых переходов в адсорбированных гелиевых пленках.

Схема измерительного устройства приведена на рис. 1. Камера 1 представляла собой цилиндр из латуни высотой и диаметром 10 мм. Внутренние стенки камеры были отполированы до зеркального блеска для уменьшения поверхностных потерь. Камера подвешивалась с помощью капилляра 2 длиной 12 мм

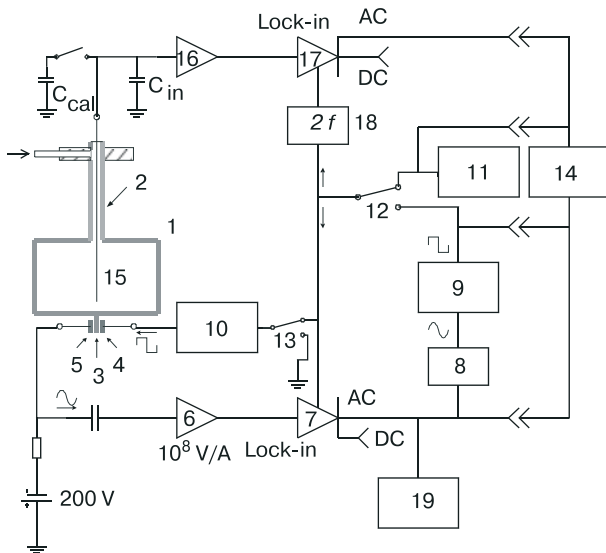


Рис. 1. Принципиальная схема установки для измерения динамической поляризации He II: 1 – камера торсионного осциллятора, 2 – жесткая подвеска осциллятора и капилляр заполнения, 3 – приводной электрод-рычаг. Кантур А: 4 – электрод питания, 5 – электрод измерения амплитуды смещения камеры, 6 – предусилитель, 7 – lock-in, 8 – фазовращатель, 9 – zero-cross детектор, 10 – аттенюатор, 11 – генератор, 12, 13 – переключатели, 14 – осциллограф. Кантур Б: 15 – электрод для регистрации электрической индукции, 16 – предусилитель, 17 – lock-in, 18 – удвоитель частоты, 19 – частотомер, C_{cal} – калиброванная емкость, предназначенная для определения входной емкости C_{in} .

с внешним и внутренним диаметрами 0,8 и 0,5 мм соответственно, изготовленного из медицинской иглы. По дну камеры 1 проходил электрод 3, который выполнял роль рычага для возбуждения торсионных сил, а также служил для измерения амплитуды торсионных смещений.

Суть методики сводится к следующему. Подвешенная на упругом капилляре камера 1 приводилась в торсионное движение с помощью переменной силы, возникающей между пластинами конденсатора (электроды 3 и 4) в результате подачи серии последовательных импульсов известной амплитуды. Резонансная частота ω_{res} определялась модулем жесткости капилляра G и моментом инерции камеры I ($\omega_{res} = (G/I)^{0,5}$) и при гелиевых температурах составляла 136 Гц. Электрод 4 был жестко зафиксирован, торсионный резонатор можно было «раскачать» до смещений, малых по сравнению с расстоянием между электродами 3 и 4. Амплитуду малых смещений (колебаний осциллятора) определяли с помощью емкостного датчика, образованного электродами 3, 5 и батарей с напряжением 200 В. При движении электрода 3 изменяется емкость датчика и

на электроде 5 возникает потенциал, пропорциональный смещению. При заполнении камеры гелием, например осаждением пленки на ее внутреннюю поверхность, изменяется момент инерции камеры. Ниже λ -перехода сверхтекучая компонента не увлекается колеблющейся стенкой камеры, что приводит к дополнительному изменению момента инерции. Все это можно наблюдать по измерению частоты резонанса.

Важной характеристикой торсионного осциллятора является его добротность, которая в незаполненной камере определяется внутренним трением в упругой подвеске (капилляре). В заполненной камере в добротность вносят вклад также процессы, происходящие в конденсированном гелии.

Электрическая схема состоит из измерительных каналов «А» и «Б».

Канал «А» предназначен для создания и регистрации механических торсионных колебаний и представляет собой замкнутый контур, состоящий из последовательно соединенных предусилителя 6, «lock-in» усилителя 7, фазовращателя 8, «zero-cross» детектора 9 и аттенюатора 10. В цепь обратной связи включен механический торсионный резонатор Реппи. В образовавшейся замкнутой электронно-механической цепи возникает автоколебательный процесс. Основное преимущество этой кольцевой схемы состоит в том, что она позволяет измерять как частоты, так и амплитуды колебаний автоматически, поскольку не требует дополнительных регулировок при влиянии процессов, происходящих в гелии, на параметры системы.

В такой схеме возможна реализация нескольких режимов работы торсионного резонатора: 1) режим вынужденных колебаний от внешнего генератора 11 (переключатель 12 в верхнем положении); 2) режим автогенератора (переключатель 12 в нижнем положении); 3) режим свободного затухания (переключатель 13 в нижнем положении); 4) режим торможения колеблющегося осциллятора. Для режима 4 достаточно было поменять фазу питающего напряжения на 180 градусов и в определенный момент времени выключить питание (переключатель 13 поставить в нижнее положение в момент, когда амплитуда смещений снизится до уровня шумов). Форма сигналов, их фаза и время торможения до полной остановки осциллятора контролировались осциллографом 14.

В канале «Б» резонатор Реппи был нами модернизирован: по центру камеры через капилляр заполнения был введен дополнительный электрод 15 для измерения электрической индукции, который образовывал вместе с внутренними стенками камеры 1 емкость для измерения индукции. Электрод диаметром 0,2 мм крепился выше основания подвески, не касаясь стенок капилляра, поэтому не вовлекался в

движение при работе осциллятора. Канал «Б» предназначен для измерения электрического отклика на относительное движение компонент He II, задаваемое колеблющейся стенкой камеры. Канал «Б» состоял из предусилителя 16, «lock-in» усилителя 17. Использование «lock-in» усилителя, двойная экранировка входных цепей и автономное питание предусилителя позволили довести чувствительность по напряжению до $3 \cdot 10^{-9}$ В в полосе 1 Гц или чувствительность по электрическому заряду до 10^{-19} Кл. При этом можно было измерять не только постоянные и переменные составляющие сигналов обоих контуров, но и наблюдать за их фазами, разностью фаз.

Таким образом, в экспериментах задавалась периодическая сила возбуждения колебаний осциллятора (электрод 4), а регистрировалась амплитуда A механических торсионных колебаний камеры (электрод 5) и электрическая индукция (электрод 15). Зная амплитуду колебаний стенки камеры и резонансную частоту, можно было вычислить скорость движения стенки камеры $V = L\omega_{\text{res}}$ и ускорение $a = M\omega_{\text{res}}^2$. (L и M — константы, определяемые в эксперименте).

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Эксперименты проводились следующим образом: после охлаждения камеры до температуры ниже 4,2 К снимались температурные зависимости частоты резонанса и амплитуды колебаний камеры (сначала для пустой камеры, а затем заполненной гелием). Типичные значения линейной скорости V боковой стенки камеры 1 составляли 10–700 мкм/с. Добротность осциллятора определяли двумя способами: по амплитуде его колебаний в условиях постоянной раскачивающей силы (режим 1 и 2); по времени затухания колебаний торсионного резонатора после выключения обратной связи (режим 3). Ниже 2,6 К для камеры, не заполненной гелием, добротность составляла более 10^7 .

Работу торсионного генератора проверяли в опытах с ненасыщенной и насыщенной пленками гелия, а также с массивным жидким гелием. В эксперименте задавалась периодическая сила, вызывающая колебания торсионного генератора и фиксировались значения частоты его резонанса и амплитуды колебаний. Температуру изменяли ступенчато с термостабилизацией и в течение некоторого времени ожидали установления равновесия. Поскольку в металлической камере 1 отсутствовало какое-либо пористое вещество, в отличие, например, от [2], а площадь поверхности была малой, тепловое равновесие устанавливалось быстро. При этом оказалось, что сдвиг частоты торсионного генератора при наличии насыщенной пленки в интервале температур 1,4–1,8 К

практически не зависит от температуры. При приближении к T_λ сдвиг частоты плавно снижался, а в области He II он снова не зависел от температуры. Это непосредственно свидетельствовало об уменьшении вклада гелия в момент инерции осциллятора ниже температуры сверхтекучего перехода. В λ -точке наблюдался излом частотной зависимости. Для насыщенной пленки значение T_λ оказалось равным 2,18 К, как и для массивного гелия. Для ненасыщенных пленок можно было наблюдать некоторое смещение T_λ в сторону более низких температур. Реальная чувствительность аппаратуры позволяла уверенно наблюдать изменение момента инерции пленки гелия толщиной 25 Å и общей площадью ~ 5 см².

Типичные зависимости катодного луча осциллографа, описывающего колебания цилиндрической стенки камеры 1 и электрической индукции на электроде 15, от времени приведены на рис. 2 для двух температурных областей выше и ниже T_λ . На рис. 3 представлены аналогичные данные от температуры: на рис. 3,а — температурные зависимости амплитуды колебаний торсионного генератора при трех постоянных, но различных значениях вынуждающей силы (канал «А»), а на рис. 3,б — температурные зависимости возникающей ниже T_λ электрической индукции (канал «Б»).

Видно, что амплитуда колебаний торсионного резонатора ведет себя несколько иначе, чем частота. Амплитуда колебаний осциллятора или угол поворота, а следовательно и его скорость, сильно изменяются ниже T_λ . В λ -точке сигнал терпит излом, уменьшается, а затем, пройдя через минимум при 1,9–2 К, снова возрастает до уровня, который по величине ниже, чем при 2,2 К. Это свидетельствует о появлении дополнительного канала диссипации механической энергии ниже T_λ . Специальными опытами было установлено, что дополнительный канал диссипации не связан с повышением или колебаниями температуры с точностью до $1,7 \cdot 10^{-6}$ К.

Таким образом, по излому частотных и амплитудных зависимостей был зафиксирован λ -переход, а полученные кривые $\omega_{\text{res}}(T)$ и $A(T)$ качественно такие же, как и работе [2], где измерения проводились в торсионном осцилляторе, заполненном пористым веществом, поверхность которого была покрыта пленкой гелия.

Наиболее важный результат эксперимента состоял в том, что ниже T_λ на электроде 15 при наличии гелиевой пленки или массивной жидкости в сосуде возникает индуцируемый потенциал удвоенной частоты с односторонней модуляцией (см. рис. 2,а). Причем для насыщенной и ненасыщенной пленок сигнал наблюдался во всем интервале скоростей боковой стенки цилиндра вплоть до 700 мкм/с. Ана-

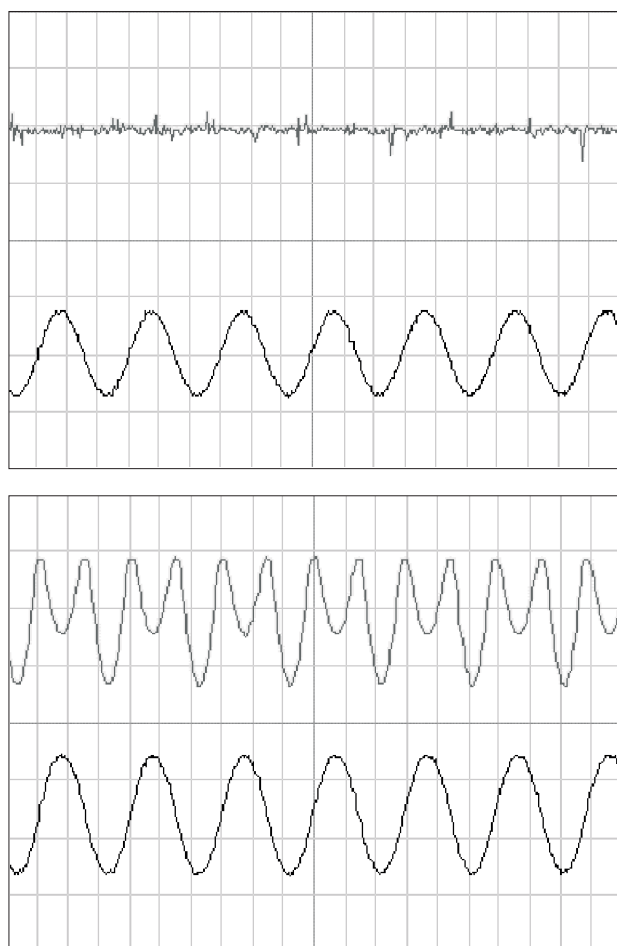


Рис. 2. Записи формы сигналов с экрана осциллографа при температурах 2,3 и 2,0 К от времени: верхние кривые — амплитуды индукции на электроде 15; нижние кривые — амплитуды колебаний осциллятора (электрод 5).

логичное поведение наблюдалось в массивном гелии, однако только при скоростях цилиндрической стенки камеры 1 менее 30 мкм/с. При более высоких амплитудах колебаний (скоростях) сигнал индукции отсутствовал, что связано с низкими значениями критических скоростей вихреобразования в массивном гелии. Пленка сверхтекучего гелия выгодно отличается от массивного гелия тем, что критическая скорость движения в ней гораздо выше реализуемых в настоящих экспериментах. Выше T_λ сигнал индукции не наблюдался с точностью до $3 \cdot 10^{-9}$ В (см. рис. 2, а, $T = 2,3$ К). На рис. 3, а, б видно, что поведение индукции в He II и амплитуды колебаний осциллятора, а значит и диссипации, в торсионном генераторе коррелируют между собой. Кроме того, эксперименты с ненасыщенными пленками показали, что амплитуда индуцируемого на электроде сигнала пропорциональна толщине пленки. Это указывает на объемный характер электрических явлений.

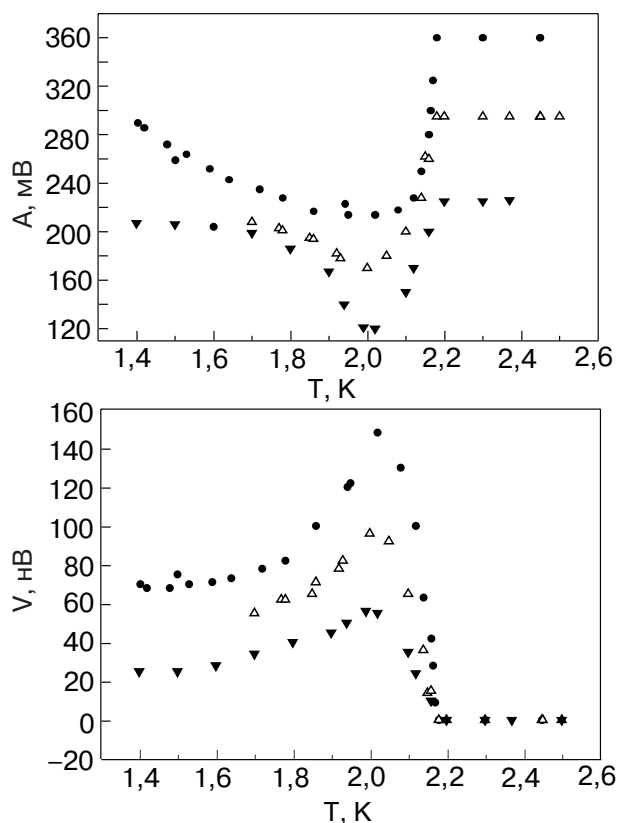


Рис. 3. Температурные зависимости: амплитуды колебаний торсионного осциллятора (а); электрической индукции при трех значениях серии импульсов на электроде 4 (б).

Таким образом, при возбуждении колебаний нормальной компоненты относительно сверхтекучей, как и в случае волны второго звука [1], в He II возникает электрическая индукция, или, другими словами, динамическая поляризация. Динамическая поляризация He II приводит к появлению на пластинах конденсатора заряда, который регистрируется в экспериментах. Подчеркнем, что амплитуда индукции максимальна в точках максимума угловой части ускорения торсионного резонатора. Это следует из наблюдаемого на осциллографе сдвига фазы между сигналами обоих каналов. В резонаторе второго звука сигнал индукции также максимален в моменты максимального относительного ускорения компонент [1].

Укажем несколько важных отличий настоящих опытов от экспериментов, проведенных в работе [1]:

1. В данных экспериментах температура и плотности компонент ρ_s , ρ_n оставались постоянными величинами, в то время как в случае второго звука они изменялись.

2. В торсионных экспериментах векторы относительной скорости $\mathbf{V} = (\mathbf{V}_n - \mathbf{V}_s)$ и электрической поляризации перпендикулярны, а в резонаторе второго звука параллельны друг другу.

3. В резонаторе второго звука нормальная и сверхтекучая компоненты гелия периодически меняют направление движения, и в соответствии с этими изменениями меняется знак поляризации. В торсионных экспериментах угловая и радиальная части ускорения за один период движения по часовой и против часовой стрелки дважды оказываются направленными в одну сторону. При этом индуцируемый электрический сигнал, являясь переменным во времени, не меняет полярность. Этим объясняется удвоенная частота сигнала индукции.

Односторонняя модуляция сигнала индукции увеличивается по мере понижения температуры от λ -точки до $\sim 1,9$ К, при которой сигнал максимален (см. рис. 2,а). Мы связываем это со спонтанным появлением в устройстве циркулирующих круговых сверхтекучих потоков. В этом случае значение относительной скорости $\mathbf{V} = \mathbf{V}_n - \mathbf{V}_s$ меняется по величине при движении резонатора по и против часовой стрелки. По-видимому, вынужденные колебания камеры вызывают прецессию z -компоненты момента импульса циркулирующего сверхтекучего потока, а с ним и вектора динамической поляризации (ось z совпадает с осью капилляра).

На рис. 4 изображена зависимость величины электрической индукции от скорости колебаний осциллятора. Как видно, индуцируемый потенциал пропорционален квадрату линейной скорости стенки камеры 1, т.е. ее центростремительному ускорению. Это свидетельствует о непосредственной связи ускорения (инерционных сил) и электрического отклика He II, другими словами, можно сказать, что в системе наблюдается механоэлектрический эффект.

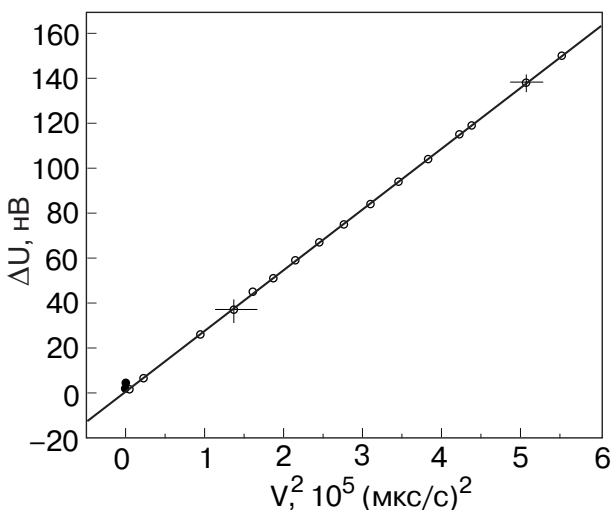


Рис. 4. Зависимость индуцируемого потенциала на электроде 15 от квадрата скорости боковой цилиндрической стенки камеры. Открытые символы — для пленки гелия, закрытые — для массивного гелия.

Неожиданным результатом оказалось различие значений добротности осциллятора в He II, измеренной разными способами. При измерении ее методом вынужденных колебаний (режимы 1, 2) она оказывается ниже, чем при $T > T_\lambda$, свидетельствуя о появлении дополнительных потерь в области $T < T_\lambda$. Если же выключить обратную связь генератора и измерять добротность по времени свободного затухания, то она оказывается выше (режим 3, затухание длилось на несколько минут больше). Это может означать, что прецессия с удвоенной частотой момента импульса сверхтекучего потока затухает, поскольку часть энергии и импульса расходуется на поддержание колебаний осциллятора, т.е. происходит параметрическое усиление колебаний осциллятора. Выше λ -точки оба способа дают одинаковые значения добротности. Контрольные эксперименты с пустой камерой 1 при температуре 1,4 К также дали одинаковые значения добротности.

В пользу данного утверждения свидетельствуют следующие опыты. Как известно, одним из необходимых условий нормальной работы торсионного генератора является соблюдение не только частотных, но и фазовых соотношений между движением электрода 3 осциллятора и периодической силой, пропорциональной квадрату напряжения «раскачки». В ходе экспериментов после установления стационарных значений измеряемых величин производилось искусственное торможение осциллятора до полной его остановки (режим 4). Оказалось, что после остановки камеры сигнал электрической индукции затухал до уровня шумов несколько минут, т.е. нормальная компонента вместе со стенкой была остановлена, температура с точностью 10^{-5} К была постоянной, а колебания электрической индукции продолжались еще некоторое время. Это говорит о существовании прецессии циркулирующего тока и непричастности тепловых эффектов.

Таким образом, в работе впервые наблюдалась динамическая поляризация жидкого гелия в отсутствие внешнего электрического поля. Как известно, поляризация диэлектрика при отсутствии внешнего электрического поля свидетельствует о зарядовом упорядочении в нем, которое характеризуется возникновением спонтанного электрического момента, образованием домена. Мерой упорядочения является величина упорядоченных дипольных моментов частиц в единице объема. На сегодня об упорядочении в жидком гелии известно было только то, что оно характеризуется возникновением спонтанного углового момента ниже T_λ . По результатам настоящей работы можно с большой долей вероятности утверждать, что ниже T_λ He II характеризуется двумя взаимосвязанными явлениями: динамической поля-

ризация и циркулирующим потоком. По аналогии с диэлектриками, в которых наблюдается спонтанный момент, в He II признаком упорядочения может являться динамическая поляризация. А силами, приводящими к упорядочению в He II, могут быть электрические и компенсирующие их инерционные. При наличии этих двух сил, природа которых различна, He II становится похожим на центрально-симметричный домен. В экспериментах с помощью механических колебаний осциллятора этот домен вынуждали к прецессии и наблюдали за ним. В поддержку этой точки зрения говорят эксперименты с массивным гелием. Как показано для массивной жидкости, если скорость боковой стенки осциллятора выше критической ($V > V_c = \hbar/mR$), сигнал индукции отсутствует, свидетельствуя об исчезновении упорядочения, описанного выше. Здесь m — масса атома гелия, R — радиус камеры, \hbar — постоянная Планка.

Подчеркнем, полученный результат нельзя рассматривать как окончательное доказательство, но, во всяком случае, как указание, что связь углового и электрического моментов вполне естественна, хотя и неожиданна.

Заключение

В настоящей работе показано, что периодическое движение нормальной компоненты, увлекаемой колеблющейся стенкой, также сопровождается возникновением электрического заряда на обкладках конденсатора, как и в случае второго звука [1]. Влияние толщины сверхтекучей пленки на величину индукции указывает на прямую зависимость электрического эффекта от объема жидкости. Установленная закономерность $\Delta U = (V_s - V_n)^2$ свидетельствует о связи сил электрического происхождения и инерционных в жидком гелии ниже T_λ , т.е.

речь идет о первом наблюдении механоэлектрических эффектов в жидком гелии.

Наблюдение данного явления позволяет использовать его как новый эффективный способ регистрации второго звука и как бесконтактный метод измерения скорости сверхтекучей компоненты.

Выражаем благодарность В.Н. Григорьеву, А.М. Косевичу, Э.Я. Рудаевскому, С.С. Соколову и С.И. Шевченко за обсуждение и полезные советы. Пользуемся также случаем выразить благодарность за плодотворную дискуссию А.Ф. Андрееву и участникам семинара ИФП РАН (Москва).

Замечание при корректуре

После подачи рукописи в редакцию вышла теоретическая работа [3], посвященная поляризационным эффектам He II.

1. А.С. Рыбалко, *ФНТ* **30**, 1321 (2004).
2. J.E. Berthold, D.J. Bisho, and J.D. Reppy, *Phys. Rev. Lett.* **39**, 348 (1977).
3. L.A. Melnikovsky, <http://www.arXiv:cond-mat/0505102> v1 4 May (2005).

Observation of the mechanoelectric effect in He II

A.S. Rybalko and S.P. Rubets

The experimental study of electric response in ^4He is carried out with using the torsion generator method in the temperature range $1.5-T_\lambda$. It is shown that the movement of a normal component of HeII which is captured near the torsion oscillator wall leads to a dynamic polarization of the liquid. It is found that the induction potential is proportional to the squared linear velocity of the oscillator wall.