

СТАЦИОНАРНЫЙ СОЛИТОН НА ЗАРЯЖЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКИХ ПЛЕНОК ГЕЛИЯ И ВОДОРОДА

*A.A.Левченко¹⁾, E.Teske^{*2)}, Г.В.Колмаков, П.Лейдерер^{*2)},
Л.П.Межов-Деглин, В.Б.Шикин*

*Институт физики твердого тела РАН
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия*

** Universität Konstanz
D78434 Konstanz, Germany*

Поступила в редакцию 6 марта 1997 г.

Сообщается о наблюдении изменения формы заряженной поверхности жидкого водорода и гелия в электрическом поле выше некоторого критического – образовании уединенной волны (положительно заряженного холма для водорода и отрицательно заряженной ямы для гелия) в условиях полной компенсации приложенного поля поверхностным зарядом.

PACS: 68.10.-m

Известно, что заряженная плоская поверхность жидкости во внешнем перпендикулярном электрическом поле E теряет устойчивость в поле выше некоторого критического [1]. К настоящему времени подробно исследовано изменение формы отрицательно заряженной поверхности толстого слоя жидкого гелия (электроны локализованы над гелием), когда глубина жидкости d (расстояние от свободной поверхности до металлической подложки) заметно превышает капиллярную длину $\lambda = \sqrt{\alpha/\rho g}$. Здесь α и ρ – коэффициент поверхностного натяжения и плотность жидкого гелия, g – ускорение свободного падения. Теоретические расчеты проводились в условиях, когда электроны, локализованные над поверхностью, не компенсируют полностью приложенное электрическое поле. Было обнаружено, что при $d \gg \lambda$ и фиксированном числе зарядов над поверхностью, в поле выше некоторого критического, на поверхности жидкости возникает периодическая деформация, сопровождаемая модуляцией плотности поверхностного заряда, с периодом порядка λ и конечное амплитудой, зависящей от степени надkritичности [2–4], то есть наблюдается реконструкция – переход поверхности жидкости из плоского в новое устойчивое состояние. Экспериментально это явление изучали в работах [5–7].

В противоположной ситуации, при $d \ll \lambda$, интервал волновых чисел, на которых развивается неустойчивость, начинается от $k = 0$ [8], и в одномерном приближении, как следует из работы [9], на поверхности может возникать локализованная стационарная волна (солитон), размер которой зависит от приложенного поля.

До последнего времени не было ясно, может ли наблюдаться реконструкция поверхности в условиях, когда расстояние между управляющим электродом и заряженной поверхностью жидкости $d \sim \lambda$ и электрическое поле полностью компенсируется слоем зарядов на поверхности жидкости.

¹⁾e-mail: levch@issp.ac.ru

²⁾E.Teske, P.Leiderer.

Поверхность жидкого гелия и водорода можно зарядить, например, локализовав электроны над поверхностью либо положительные ионы под поверхностью. Задачи об устойчивости и реконструкции отрицательно или положительно заряженных поверхностей жидкостей являются эквивалентными. Поэтому в данной статье объединены эксперименты с отрицательно заряженной поверхностью гелия и положительно заряженной поверхностью водорода.

В статье сообщается об экспериментальном наблюдении стационарной реконструированной поверхности заряженных пленок гелия и водорода в условиях полной компенсации зарядами приложенного электрического поля и приводятся данные о форме реконструированной поверхности. Переход из плоского состояния в новое реконструированное носит "мягкий" характер. Устойчивой формой реконструированной поверхности жидкости оказывается уединенная стационарная аксиально симметричная волна (солитон), которая соответствует лунке на отрицательно заряженной поверхности жидкого гелия (электроны над гелием) и холму на положительно заряженной поверхности жидкого водорода (положительные заряды локализованы под поверхностью).

Методика эксперимента. В экспериментах изучались свойства отрицательно заряженной поверхности жидкого гелия в нормальном состоянии и положительно заряженной поверхности жидкого водорода.

Экспериментальные ячейки были выполнены в форме плоских конденсаторов (диодов), расположенных горизонтально в цилиндрических оптических контейнерах. Расстояние между пластинами конденсатора составляло 8 мм в экспериментах с жидким гелием и 6 мм – с жидким водородом. Диаметр пластин ($D \geq 20$ мм) в несколько раз превосходил расстояние между пластинами. Жидкость конденсировали на нижнюю пластину конденсатора. Высота столба жидкости составляла 0.1 и 0.15 мм для гелия и 3 ± 0.1 мм для водорода. Напомним, что капиллярная длина в гелии $\lambda = 0.4$ мм при $T = 4.2$ К и $\lambda = 1.8$ мм при 17 К для водорода, то есть расстояние d между управляемым электродом (верхняя пластина в водороде, нижняя пластина в гелии) и свободной поверхностью жидкости было сравнимо с капиллярной длиной λ .

Поверхность жидкого гелия заряжалась электронами с помощью расположенного в паре острия в присутствии перпендикулярного прижимающего поля. За изменением формы поверхности следили по изменению интерференционной картины, создаваемой двумя лазерными лучами, отраженными от нижней полупрозрачной (металлизированной) обкладки диода и верхней, зеркальной. Методика наблюдений описана, например, в [10].

В экспериментах с жидким водородом источником зарядов служила нижняя обкладка диода, покрытая слоем радиоактивного вещества. Под действием приложенного электрического поля положительные заряды (ионы H_2^+ , окруженные слоем отвердевшего водорода) поджимались к поверхности, находящейся на расстоянии d от верхнего металлического электрода, при этом ток через поверхность практически отсутствовал. Схема экспериментов описана в [11]. Форма заряженной поверхности контролировалась с помощью телекамеры, дающей изображение профиля жидкости в зазоре между обкладками диода. Об изменении формы поверхности с ростом электрического поля судили также по отклонению лазерного луча, отражающегося от поверхности жидкости.

Подчеркнем, что измерения проводились в условиях ограниченной геометрии (цилиндрическая ампула, диаметр которой в несколько раз больше расстоя-

ния между электродами), и полное количество жидкости в пленках гелия и водорода в экспериментальной ячейке оставалось неизменным.

Результаты эксперимента. При малых напряжениях между обкладками диода эквипотенциально заряженная поверхность жидкости плавно изгибаются. При достижении некоторого критического напряжения U_{c1} на поверхности появляется макроскопический участок (лунка на поверхности гелия, холм на поверхности водорода) характерным диаметром в несколько миллиметров. Следует отметить, что как в гелии, так и в водороде реконструированный участок мог возникать на поверхности в случайных точках. В экспериментах с водородом одиничный холм можно было смешать в центр диода, слегка изменяя наклон ячейки.

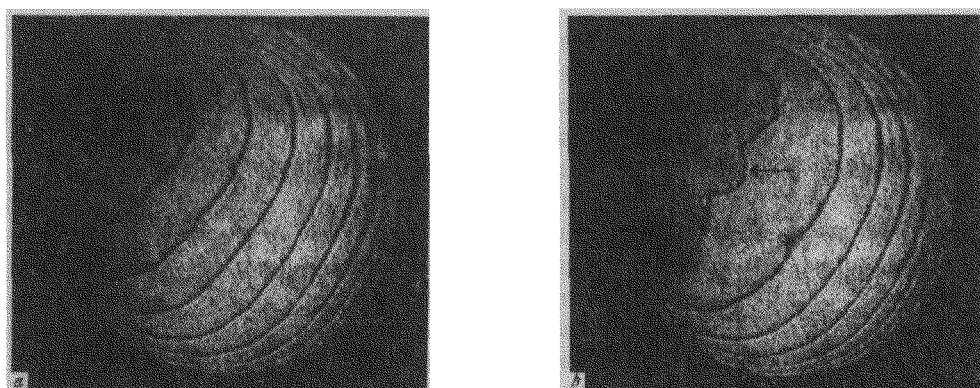


Рис.1. Интерферограмма эквипотенциально заряженной поверхности жидкого гелия до (а) и после (б) образования одиночной лунки (отмечена стрелками). Температура жидкости – 4.2 К. Диаметр видимого участка жидкости – 20 мм

На рис.1 показаны две интерференционные картины заряженной поверхности пленки жидкого гелия и после появления деформированного участка (отмечен стрелками на рис.1б). Диаметр темного пятна в центре деформированного участка равен 1.5 мм. Разность потенциалов между обкладками диода составляет $U = 170$ В, температура измерений $T = 4.2$ К, толщина слоя жидкости – 0.15 мм. Концентрация зарядов вдали от деформированного участка оставалась практически неизменной, что следует из равенства расстояний между интерференционными полосами на краях заряженной поверхности. Этот факт отмечается специально, чтобы подчеркнуть сохранение эквипотенциальности жидкой поверхности при ее деформации.

Деформированный участок был стабилен в течение 1.2 с, а затем разряжался на нижнюю обкладку диода. При толщине слоя жидкости 0.1 мм и $U = 400$ В время жизни деформированного участка уменьшалось до 0.4 с, но по-прежнему было многое большее характерного времени релаксации возмущений в слое электронов над поверхностью гелия.

На рис.2а показана фотография равновесного профиля реконструированной поверхности слоя жидкого водорода при разности потенциалов между обкладками диода $U = 1620$ В и температуре $T = 17$ К. На рис.2б точки – результат

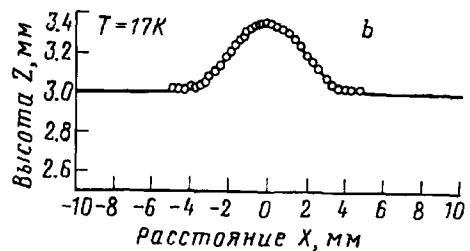
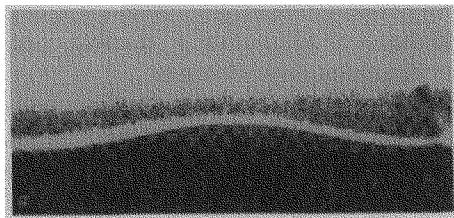


Рис.2. а) Фотография профиля реконструированной эквипотенциальной заряженной поверхности жидкого водорода. Линейный размер по горизонтали 10мм. Температура жидкости – 17К. б) Профиль реконструированного участка (холма), полученный сканированием фотографии (кружки). Сплошная линия – зависимость (1) с параметрами $A = 0.38$ мм и $R = 2.5$ мм

сканирования этого профиля. В постоянном поле форма профиля сохранялась неизменной за время наблюдений более 10^3 с.

Высоту деформированного участка поверхности (холма) в центре диода можно было регулировать, изменяя напряжение между обкладками диода в диапазоне $U = 1300 - 1700$ В. При напряжениях U ниже порогового ($U_{c1} \approx 1300$ В при данной температуре) реконструкция поверхности не наблюдалась. При повышении напряжения до 1750 В реконструированная поверхность теряет устойчивость, и наблюдается разряд (второе критическое напряжение U_{c2}). В момент разряда на коллектор приходит порядка 10^8 зарядов. После разряда поверхность релаксирует в исходное плоское состояние. Затем процесс повторяется. Об обнаружении квазипериодических осцилляций заряженной поверхности жидкого водорода в сильных полях мы сообщали ранее в статье [11]. Аналогичное явление – возникновение ионных струй (гейзеров) на поверхности сверхтекущего гелия в сильных полях – наблюдали в работе [12].

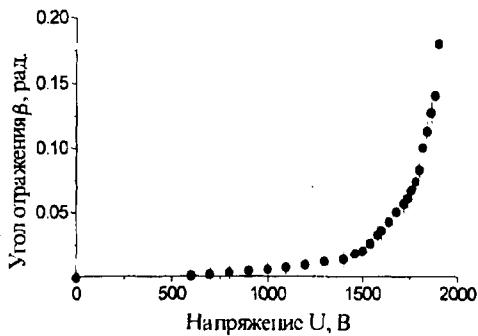


Рис.3. Зависимость от напряжения U максимального угла отражения лазерного луча от заряженной поверхности жидкого водорода. Температура жидкости равна 14.6 К

На рис.3 приведена зависимость от напряжения U максимального угла отражения β лазерного луча от поверхности жидкости, измеренная при температуре 14.6 К. Видно, что зависимость угла отражения от управляемого напряжения $\beta(U)$ сильно изменяется при напряжениях выше первого критического (в данных измерениях $U_{c1} \approx 1500$ В).

Обсуждение результатов. В начале обсуждения следует ответить на следующий важный вопрос. Не повторяют ли наблюдения эксперименты [10], в которых было обнаружено возникновение лунок на поверхности толстой

$(d \gg \lambda)$ гелиевой пленки на металлической подложке? Ответ однозначно отрицателен.

Экспериментальная ситуация в нашей работе качественно отличается от той, что наблюдалась в [10] и обсуждалась в [3,4]. В наших экспериментах плотность зарядов определяется приложенным напряжением (заряды полностью компенсируют внешнее электрическое поле) и равна максимально возможной, $n = n_c = E^2/4\pi$, на всей поверхности, в то время как в [10] вдали от реконструированного участка (лунки) плотность зарядов на плоской поверхности была близка к нулю, $n \ll n_c$. Кроме того, в экспериментах с водородом число зарядов под поверхностью переменно и возрастает с увеличением приложенного напряжения.

Как показали наблюдения, время жизни реконструированной поверхности гелия и водорода достаточно велико, что позволяет говорить об обнаружении стационарной заряженной уединенной волны (ямки в гелии или холма в водороде).

Результаты экспериментов (рис.1 и 2) позволяют сделать ряд качественных заключений.

1) Реконструкция поверхности в стационарном электрическом поле в ячейке конечного диаметра при $d \sim \lambda$ возможна как при фиксированном числе зарядов у поверхности (гелий), так и при переменном числе зарядов (водорода).

2) В условиях, когда плотность зарядов на эквипотенциальной поверхности задается внешним полем, в полях выше критического U_{c1} на поверхности возникает уединенная стационарная волна – лунка в экспериментах с электронами над поверхностью гелия или холм в экспериментах с положительными зарядами под поверхностью водорода. Возможность возникновения подобной волны в одномерном приближении предсказывается в работе [9].

3) При дальнейшем увеличении поля наблюдается импульсный разряд, то есть существует второе критическое поле (соответственно, напряжение U_{c2}), выше которого реконструированная поверхность жидкости неустойчива.

В работе [9] рассматривается одномерный случай, соответствующий образованию периодической системы "валов" на бесконечной поверхности тонкой пленки гелия ($d \ll \lambda$) в поле выше некоторого критического. Форма уединенного вала (1D солитона), соответствующего бесконечно большому периоду (применительно к эксперименту, много больше диаметра экспериментальной ячейки), описывается выражением

$$z(x) = A \cosh^{-2}(x/R), \quad (1)$$

где A – амплитуда, R – характерный размер солитона.

К сожалению, результаты расчетов [9] не применимы к описанию реальной, существенно неодномерной ситуации. Тем не менее, оказалось, что форма холма, наблюдавшаяся в экспериментах с жидким водородом, удовлетворительно описывается выражением (1), если полагать, что холм аксиально симметричен и x заменить на расстояние r от центра солитона. Тогда R – характерный радиус солитона. Численная подгонка профиля холма (точки на рис.2б) дала значения $A = 0.38$ мм, $R = 2.5$ мм (сплошная кривая на рис.2б).

Об эволюции формы холма с повышением приложенного напряжения можно судить также по зависимости $\beta(U)$ в эксперименте с водородом. Из графика, показанного на рис.3, видно, что существует два различных режима изменения формы свободной поверхности жидкости – до достижения первого критического

напряжения U_{c1} и при напряжениях выше U_{c1} . Начальный участок ($U < U_{c1}$) соответствует обычному втягиванию заряженной жидкости в поле конденсатора, при этом угол отражения пропорционален квадрату приложенного напряжения, $\beta \propto U^2$. В полях выше первого критического, то есть в области $U_{c1} < U < U_{c2}$, экспериментальная зависимость может быть описана соотношением $\beta \approx (U - U_{c1})^m$, где показатель степени $2 < m < 3$. Этот участок кривой $\beta(U)$ описывает изменение наклона боковой поверхности солитона при повышении напряжения U .

Таким образом, в экспериментах наблюдена реконструкция эквипотенциальной заряженной поверхности жидкости в стационарном электрическом поле выше некоторого критического в условиях $d \sim \lambda$, где d – расстояние между заряженной поверхностью и управляющим электродом и λ – капиллярная длина. Для дальнейшего рассмотрения обнаруженного явления может оказаться существенным, что измерения проводились в плоском конденсаторе конечных размеров, диаметр которого заметно превосходил характерные длины d и λ .

Работа была частично поддержана грантами НАСА-РКА (проект TM-17) и INTAS-93 (проект 93-933).

-
1. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц, *Электродинамика сплошных сред*, М.: Наука, 1982.
 2. Л.П.Горьков, Д.М.Черникова, Письма в ЖЭТФ **18**, 119 (1973); ДАН СССР **228**, 829 (1976).
 3. В.И.Мельников, С.В.Мешков, ЖЭТФ **82**, 191 (1982).
 4. В.Б.Шикин, Ю.П.Монарха, *Двумерные заряженные системы в гелии*, М.: Наука, 1989.
 5. P.Leiderer, Phys. Rev. **B20**, 4511 (1979).
 6. M.Wanner and P.Leiderer, Phys. Rev. Lett. **42**, 315 (1979).
 7. P.Leiderer, M.Wanner, Phys. Rev. Lett. **A73**, 185 (1979).
 8. Д.М.Черникова, ФНТ **2**, 1374 (1976).
 9. В.Б.Шикин, P.Leiderer, ФНТ, в печати.
 10. P.Leiderer, W.Ebner, and V.B.Shikin, Surface Sci. **113**, 405 (1982).
 11. А.А.Левченко, Л.П.Межов-Деглин, ФНТ **22**, 46 (1996).
 12. В.П.Володин, М.С.Хайкин, Письма в ЖЭТФ **30**, 608 (1979).