

РАЗВИТИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И РОЖДЕНИЕ БАБЛОНОВ НА ЗАРЯЖЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОГО ГЕЛИЯ

А.П.Володин, М.С.Хайкин, В.С.Эдельман

Исследованы возникновение и развитие неустойчивости поверхности жидкого гелия, заряженной локализованными над ней электронами. Установлено, что электроны уходят с поверхности путем образования ныряющих в сверхтекучий гелий "баблонов"¹⁾ – пузырьков, содержащих 10^7 – 10^8 электронов и имеющих размер $0,05$ – $0,3$ мкм. Баблоны малого диаметра устойчивы и в поле 1 CGSE движутся в гелии с установившейся скоростью $\sim 10^4$ см/сек.

Поверхность жидкого гелия может быть заряжена отрицательным электрическим зарядом вследствие локализации электронов над ней [1]. Равновесная заряженная гелиевая поверхность в электрическом поле формируется под действием гравитационных, капиллярных и электростатических сил. Существуют, однако, такие критические значения электрического поля (или плотности заряда), выше которых плоская поверхность неустойчива. Горьковым и Черниковой решена задача об условиях возникновения неустойчивости заряженной поверхности гелия [2, 3]. Из-за неустойчивости достижимая плотность поверхностного заряда ограничена сверху величиной $\sim 2 \cdot 10^9$ электронов/см², что наблюдалось ранее экспериментально [4, 5].

В нашей статье описаны опыты по изучению условий возникновения неустойчивости, а также механизма ухода электронов с поверхности гелия. Эксперименты проводились при $T \sim 1,3$ К в приборе, схематически показанном на рис. 1. Источник электронов – вольфрамовая нить накала 1. Напряжение, создававшее поле, которое удерживало на поверхности 2 гелия электроны, прикладывалось к пластинам конденсатора. Нижняя положительно заряженная пластина 3 окружена экраном кольцом 4. Верхняя заземленная пластина 5 подвешена на пружинах и под действием поля E_1 , в зазоре между нею и заряженной поверхностью гелия может перемещаться в вертикальном направлении. Ее положение измеряется емкостным датчиком 6 и служит мерой поля E_1 . Уровень сверхтекучего гелия в конденсаторе регулировался посредством термомеханического эффекта [6]. Пластины конденсатора $\phi 40$ мм устанавливались параллельно поверхности гелия с точностью $30''$ по максимуму критического параметра (см. ниже). Расстояние d между ними задавалось в пределах $1 + 5$ мм. Прибор помещен в оптический криостат, который укреплен на платформе, подвешенной на мягких амортизаторах. Для исследования динамики явления применялась скоростная (до 4000 кадров/сек) киносъемка камерой СКС-1М-16.

При некотором начальном положении уровня гелия h_0 и приложенном к конденсатору напряжении U_0 , из включаемого на время $\sim 0,1$ сек катода 1 эмитировались электроны. Появление поверхностного заряда вырождалось в полной экранировке поля над поверхностью гелия, т. е. $E_1 =$

¹⁾Bobblons – bobbles filled with electrons.

$= 0$. Затем критические условия для заряженной гелиевой поверхности достигались либо медленным понижением уровня гелия h в приборе, либо повышением напряжения U . Величина поля E_1 регистрировалась как функция изменяемого параметра.

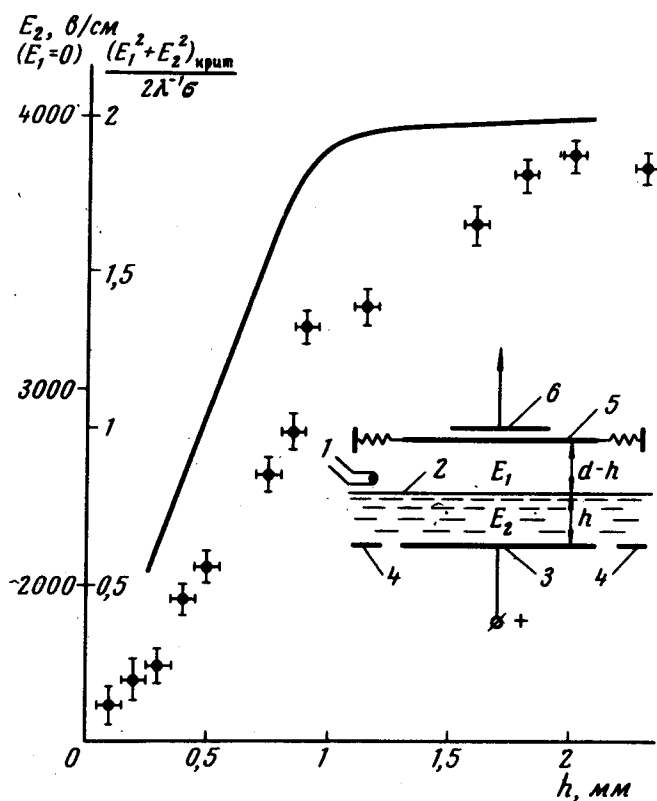


Рис. 1. Зависимость критического параметра $(E_1^2 + E_2^2)_{\text{крит}}$, при достижении которого плоская однородная поверхность жидкого гелия теряет устойчивость, от глубины h гелия в конденсаторе. Точки — эксперимент. Кривая — расчет [3]

Одновременно производилась скоростная микрокиносъемка поверхности и объема жидкого гелия.

Эксперименты показали, что при достижении критических условий определяемых в общем случае параметрами U_0, h_0, h , либо U_0, h_0, U на поверхности гелия за времена $0,03 - 0,1$ сек возбуждаются капиллярно-гравитационные волны с амплитудой $\sim 0,5$ мм и в течение $0,1 - 0,3$ сек поверхностный заряд исчезает. Это свидетельствует о "жестком" режиме развития неустойчивости [7].

Измеренная зависимость критической величины $(E_1^2 + E_2^2)_{\text{крит}}$ от высоты уровня гелия h приведена на рис. 1. На графике собраны точки, полученные для геометрии опытов, близкой к такой, при которой величина $(E_1^2 + E_2^2)$ является однозначным критическим параметром, т. е. при $h = d/2$ или $h \ll d - h$ [3]. Экспериментальная зависимость (точки) удовлетворительно согласуется с расчетом Черниковой [3] (кривая).

Изменение характера зависимости при $h \approx 1 \div 1,5$ мм отвечает переходу от неустойчивости по отношению к длинноволновым возмущениям к неустойчивости с характерными длинами волн колебаний порядка капиллярной длины волны $\lambda = 3,2$ мм. Это подтверждает анализ отснятых кадров: при $h \lesssim 0,6 - 0,7$ мм на поверхности гелия возбуждаются волны длиной 2 - 3 см, т. е. порядка размеров пластин конденсатора, тогда как при $h \gtrsim 1,5$ мм - волны длиной 2 - 5 мм.

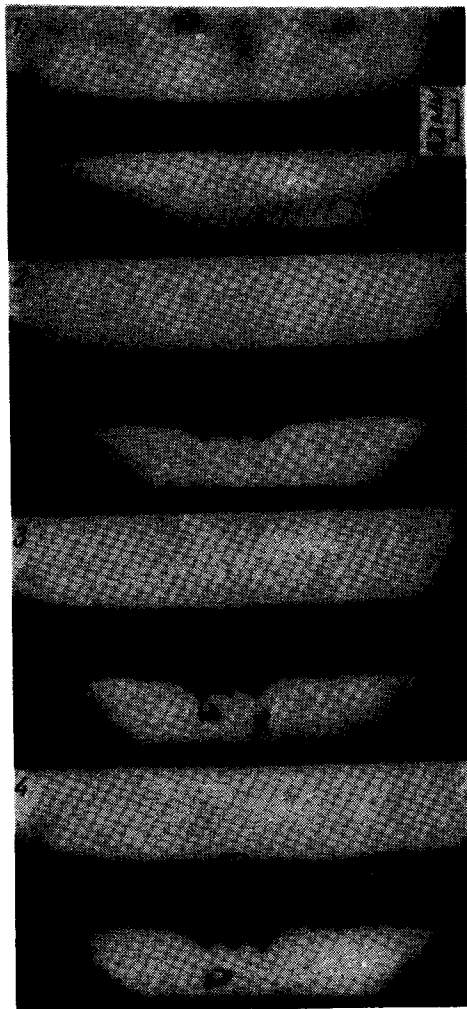


Рис. 2. Кадры кинофильма, показывающие возникновение капиллярных волн и баблоннов, уносящих электроны с заряженной поверхности гелия при потере ее устойчивости

Киносъемка позволила проследить процесс ухода электронов с поверхности гелия. На рис. 2 показаны 4 кадра кинофильма. На 1-м сверху кадре видна однородная устойчивая поверхность. Плоская равновесная заряженная поверхность гелия в конденсаторе действием электростатических сил опущена на 0,2 мм ниже уровня гелия в криостате; на кадре видны оба уровня. При неустойчивости в процессе раскочки поверхностных волн во впадинах появляются острые углубления (рис. 2, 2-й кадр). На остриях рождаются пузырьки (3-й кадр) размером от 0,05 до

0,3 мм, которые затем ныряют в гелий (4-й кадр). Достигнув дна — анода конденсатора — пузырек исчезает или всплывает, в зависимости от его размера: пузырьки ϕ 0,05 мм схлопываются у дна за время $\tau \lesssim 10^{-4}$ сек, а большие живут 10^{-3} сек, успевая всплыть.

Наблюдаемое явление объясняется тем, что каждый пузырек представляет собой многозарядный ($10^7 - 10^8$ электронов) отрицательный ион — баблон в сверхтекучем гелии. Баблон движется к аноду и, коснувшись его, разряжается, а оставшийся пузырек с газом — схлопывается. Из условия равенства электростатического давления изнутри баблону капиллярному давлению получаем оценку для радиуса баблона: $r \sim \sqrt[3]{n^2 e^2 / 16 \pi \sigma} \sim 8 \cdot 10^{-3}$ см, где e — заряд электрона, σ — поверхностное натяжение жидкого гелия, n — число электронов в баблоне, определяемое по полному заряду поверхности и количеству разряжающих поверхность баблонов (20 — 100).

По-видимому, весь заряд уносится с поверхности гелия баблонами, поскольку такой процесс энергетически гораздо выгоднее, чем уход отдельных электронов в жидкий гелий. Электроны, в принципе, могли бы уходить благодаря туннельному эффекту, однако теоретические оценки показывают, что его вероятность ничтожно мала [1], и на опыте при $(E_1^2 + E_2^2) < (E_1^2 + E_2^2)_{\text{крит}}$ электроны сохраняются над поверхностью гелия часами.

Баблоны малого диаметра 0,05 мм движутся в жидком гелии в поле $E = 1$ CGSE со скоростью 10^4 см/сек, соответствующей стоксовому вязкому движению. Длительность движения до дна $\sim 10^{-3}$ сек, что много больше времен релаксации электрических и упругих неоднородностей на их размерах. Вместе с тем, низшие моды собственных колебаний баблона должны иметь длины волн порядка его размеров, т. е. в 10^2 раз меньше капиллярной длины λ , что обеспечивает относительную его устойчивость. Таким образом, баблоны малого диаметра следует считать стационарными образованиями.

Вследствие электростатического взаимодействия электроны в баблоне образуют двумерный слой вблизи поверхности жидкости. Плотность электронов составляет $10^{11} - 10^{12}/\text{см}^2$ — столь высока, что слой можно рассматривать как плоский и его вигнеровская кристаллизация представляется весьма вероятной [1]. В заключение следует подчеркнуть интерес изучения баблонов, как совершенно новых физических объектов.

Авторы благодарны П.Л.Капице за внимание к работе, Л.П.Горькову, В.В.Шикину — за обсуждение результатов, Г.С.Чернышеву — за техническую помощь.

Институт физических проблем
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
17 октября 1977 г.

Литература

- [1] В.Б.Шикин, Ю.П.Монарха. ФНТ, 1, 957, 1975.
- [2] Л.П.Горьков, Д.М.Черникова. Письма в ЖЭТФ, 18, 119, 1973.
- [3] Д.М.Черникова. ФНТ, 2, 1374, 1976.
- [4] T.R. Brown, C.C. Grimes. Phys. Rev. Lett., 29, 1235, 1972.

[5] А.С.Рыбалко, Ю.З.Ковдря. ФНТ, 1, 1037, 1975.

[6] А.П.Володин, М.С.Хайкин, В.С.Эдельман. Письма в ЖЭТФ, 23, 524, 1976.

[7] Л.П.Горьков, Д.М.Черникова. ДАН СССР, 228, 829, 1976.
