

ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В He II ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВАТЕЛЯ

А.И.Гуляев

Посредством ширен-фотографирования оптических неоднородностей, возбуждаемых в жидком гелии при однократном импульсном выделении джоуле-ва тепла в тонком плоском нагревателе, вблизи нагретой поверхности в He II обнаружены подвижные "очаги" излучения (первого) звука, которые в He I не возникают; распространение этих очагов вдоль нагревателя сопровождается возбуждением также и второго звука.

Исследуемый плоский слой жидкого гелия толщиной 57 мм наливается в камеру между двумя плоскопараллельными стеклянными дисками. На рис. 1 показана часть этого слоя в виде параллелепипеда с размерами 51 × 57 × 150 мм, ограниченного дисками (на рисунке не показаны), а также вертикальными 2, 3

и горизонтальными 4,5 плоскими стенками (гетинакс). Плоский нагреватель 1, параллельный стенке 3 и удаленный от нее на 50 мм, составлен из вертикальных участков константановой ленты толщиной 0,02 мм и шириной 0,47 мм, которые натянуты с шагом ~ 1 мм (масса константана ~ 9 мг/см²). Площадь поверхности металла, омываемой жидкостью, равна площади занятого нагревателем сечения, на единицу которой и рассчитан тепловой поток. На левой стенке размещен нагреватель 2, сделанный из горизонтальных участков ленты.

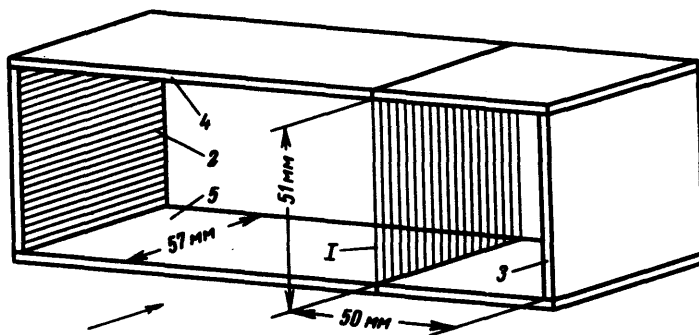


Рис. 1

Температура жидкости регулируется и измеряется по давлению насыщенного пара над нею (шкала T_{5g}). Камера с жидким гелием устанавливается в пучке параллельных световых лучей теневого прибора таким образом, чтобы проекция нагревателя 1 изображалась тонкой линией (темная вертикальная прямая в середине фотографий на рис. 2 и 3). По ленте нагревателя пропускается одиночный прямоугольный электрический импульс с длительностью t_* и временем нарастания фронтов $\leq 0,5$ мксек. Амплитуда импульса измеряется цифровым вольтметром; мощность N (в импульсе) рассеивается в обе стороны от нагревателя 1. Спустя время t_* , отсчитываемое от переднего фронта импульса, инициируется световая вспышка (~ 1 мксек), которая и регистрирует мгновенную картину возмущений. Конструкция криостата и методика опытов описаны в [1]. Фото на рис. 2 и 3, полученные методом ножа и щели (вертикальная щель шириной 0,05 мм) дают горизонтальные проекции градиента плотности жидкости. Наименьшие различимые значения равны $d\rho/dx \geq 1,5 \cdot 10^{-6}$ г/см⁴; $d\rho/\rho dx \geq 10^{-5}$ см⁻¹. В звуковой волне такое изменение плотности связано с градиентом давления $dP/dx = v_1^2(d\rho/dx) \geq 10^3$ дин/см³ ($v_1 = 220 - 230$ м/сек).

Импульсное выделение тепла в нагревателе 1 возбуждает в окружающем его жидком гелии пакеты "плоских" звуковых волн, уходящих симметрично в обе стороны (см. рис. 2, а; фото при $N \leq 3,2$ вт/см² см. в [1]). Темное изображение нагревателя 1 на рис. 2, а становится толще, чем исходное, за счет образования слоя пара. При повышении температуры жидкости в камере T выше $T_\lambda = 2,172^\circ\text{K}$ эта картина остается неизменной. В He II ($T < T_\lambda$) импульсный нагрев возбуждает еще и пакеты "плоских" волн второго звука; передние фронты этих пакетов, освещенность которых соответствует росту плотности жидкости, видны на всех фотографиях рис. 2 и 3 (прямые линии, параллельные проекции нагревателя 1 и удаленные от нее на 1–13 мм). Кратковременное появление невидимого слоя пара в He II при $N \geq 1,5 - 2$ вт/см² обнаружено по изменению характера взаимодействия с нагревателем 1 звуковых пакетов, посылаемых к нему от нагревателя 2 до и после импульса. С образованием

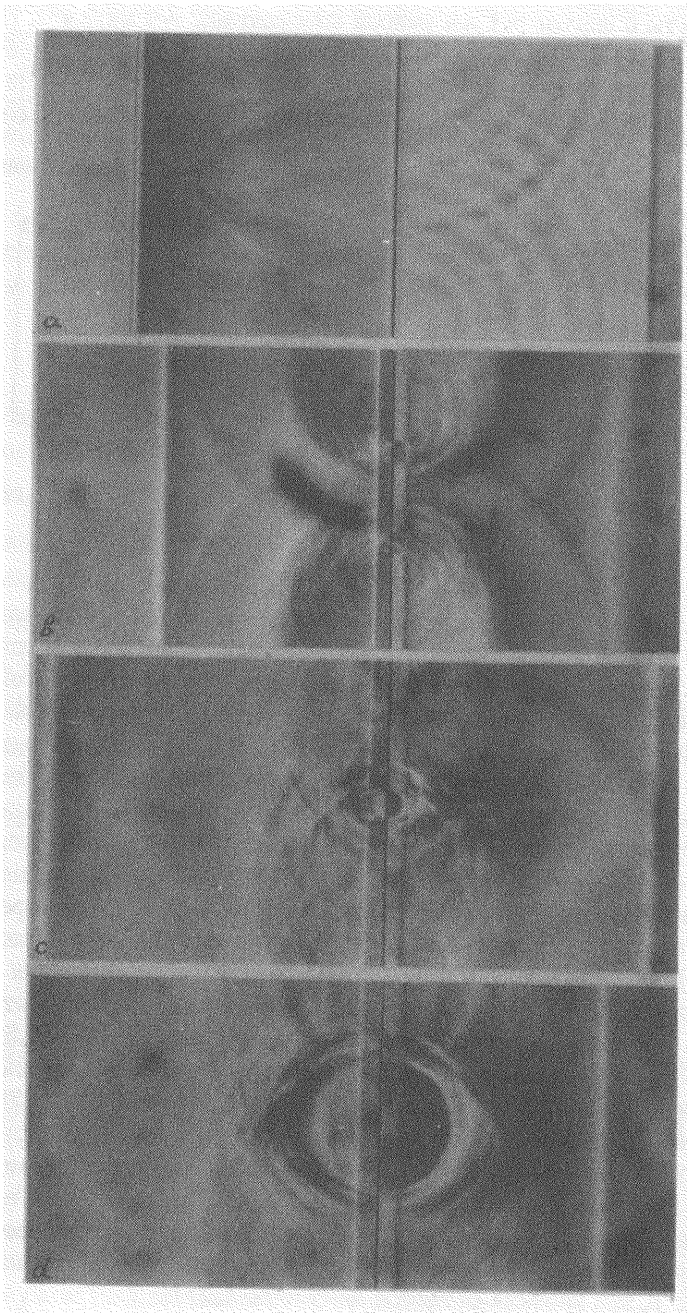


Рис. 2. *a* - $T = 2,165^{\circ}\text{K}$, $N = 14,2 \text{ ст/см}^2$, $t_{*} = 100 \text{ мксек}$,
 $t_{+} = 201 \text{ мксек}$; *b* - $T = 2,030^{\circ}\text{K}$, $N = 14,3 \text{ ст/см}^2$,
 $t_{*} = 100 \text{ мксек}$; $t_{+} = 173 \text{ мксек}$; *c* - $T = 2,086^{\circ}\text{K}$,
 $N = 8,8 \text{ ст/см}^2$, $t_{*} = 500 \text{ мксек}$, $t_{+} = 257 \text{ мксек}$; *d* - $T = 2,087^{\circ}\text{K}$,
 $N = 8,8 \text{ ст/см}^2$, $t_{*} = 500 \text{ мксек}$, $t_{+} = 288 \text{ мксек}$

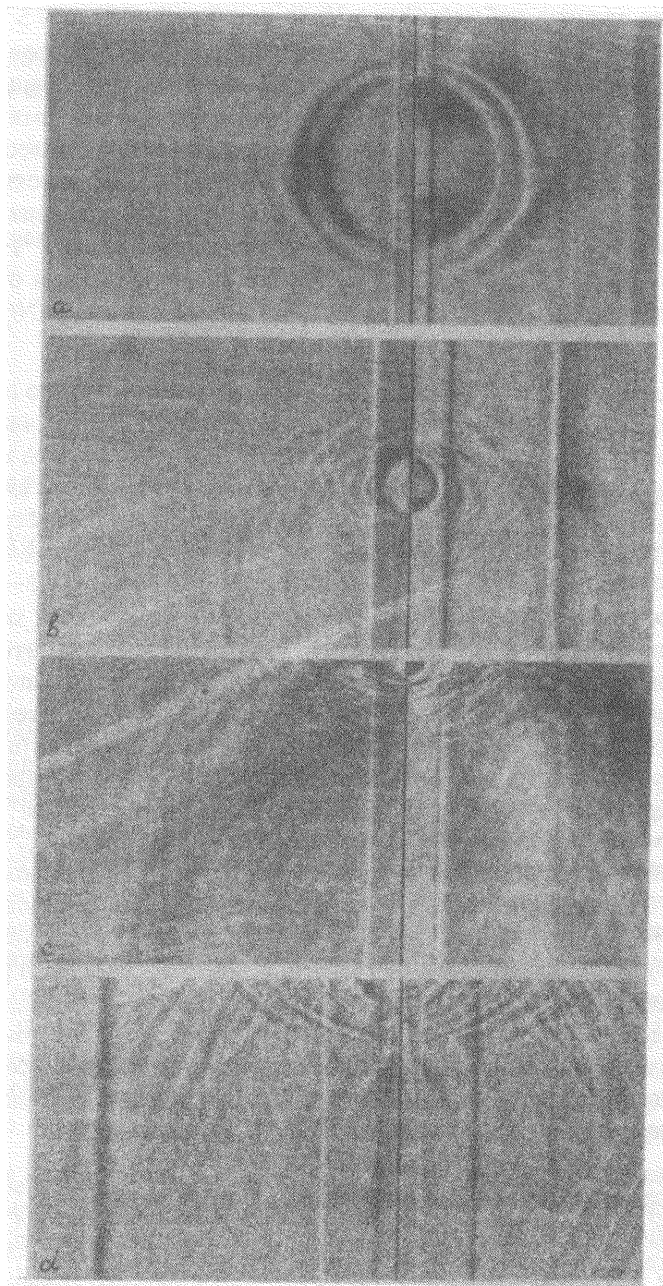


Рис. 3. *a* - $T = 2,121^\circ\text{K}$, $N = 7,7 \text{ вт/см}^2$, $t_* = 300 \text{ мксек}$,
 $t_+ = 300 \text{ мксек}$; *b* - $T = 1,89^\circ\text{K}$, $N = 17,2 \text{ вт/см}^2$, $t_* = 200 \text{ мксек}$,
 $t_+ = 337 \text{ мксек}$; *c* - $T = 2,078^\circ\text{K}$, $N = 8,0 \text{ вт/см}^2$, $t_* = 300 \text{ мксек}$,
 $t_+ = 425 \text{ мксек}$; *d* - $T = 1,87^\circ\text{K}$, $N = 11,0 \text{ вт/см}^2$, $t_* = 500 \text{ мксек}$,
 $t_+ = 665 \text{ мксек}$

слоя пара возникает отражение звука от плоскости 1 как от свободной поверхности жидкости.

Неожиданное явление наблюдается в He II при $T < 2,15^\circ\text{K}$ и $N > 5 \text{ вт/см}^2$. Спустя время t_0 от начала импульса (после ухода передних фронтов плоских пакетов) на поверхности нагревателя 1 появляются подвижные "очаги", возбуждающие вокруг себя звуковые волны с хорошо различимыми длинами 1–3 м. В момент $t_+ > t_0$ изображение этих волн имеет вид круговых полос со смещенными центрами, а вокруг очага виден участок уплотненной жидкости диаметром 1–3 м. (рис. 2, b). Количество очагов, время и место их появления в плоскости 1 зависят от T , N , t_0 и интервала времени между снимками t . С понижением T от 2,14 до 1,7°K значения N , требуемые для возбуждения очагов, возрастают от 6 до 19 вт/см^2 , а наименьшее необходимое значение $(Nt_+)_0$ увеличивается от 700 до 4000 мдж/см^2 ($t_+ \geq 60 \text{ сек}$).

В интервале $1,7 < T < 2,15^\circ\text{K}$ для каждой температуры можно подобрать такую мощность N_2 , при которой в момент t_0 в верхней и нижней части плоскости 1 одновременно возникают по одному очагу (или тесные группы мелких очагов); с течением времени эти излучающие звук очаги смещаются вдоль нагревателя со скоростью 120 – 160 м/сек (рис. 2, b). В результате встречи очагов в средней части плоскости 1 образуется зона сжатия, окруженная с боков участками разрежения. Начальное изображение такой зоны (рис. 2, c) – два четких полукруга с противоположной по разные стороны от вертикальной оси освещенностью (признак растущей к оси плотности). Зона сжатия расширяется затем в радиальных направлениях со скоростью звука (рис. 2, d), причем звуковые волны, возбужденные при "столкновении" очагов, превосходят по интенсивности волны в плоских пакетах. "Встречные" очаги рождаются один раз (или дважды) во время пропускания тока по нагревателю, но последующее смещение и "столкновение" их происходят и после окончания импульса. На рис. 3, a внутри зоны сжатия видна вторая пара сближающихся очагов. Когда $N > N_2$, число одновременно возникающих очагов растет, и при больших N вскоре после начала импульса сразу вся плоскость 1 в He II покрывается мелкими пульсирующими очагами. При $6 < N < N_2$ возникает только один очаг вблизи нижней стенки; он смещается вдоль нагревателя до встречи с верхней стенкой, в результате чего там образуется "полукруглая" зона сжатия (рис. 3, c) с последующим ее расширением. Если T , N , t_0 и t_+ неизменны, то момент появления очагов и вся картина возмущений устойчиво воспроизводятся с разбросом во времени не более 2%. Полная воспроизводимость столкновения очагов в середине указывает на линейную протяженность очагов по толщине слоя He II.

Ограничивая выделяемую в нагревателе энергию наименьшими значениями $(Nt_+)_0$, можно заметить, что после прохождения очага (вдоль нагревателя в жидкости видны (особенно хорошо при $T < 2^\circ\text{K}$) новые прямолинейные фронты второго звука, расположенные под острым углом α к плоскости 1 и сходящиеся в направлении смещения очагов (рис. 3, b, c, d). Величина $u_2/\sin \alpha$ дает скорость распространения очага и совпадает со значениями скорости, вычисленными по смещению центра изображений звуковых волн. На рис. 3, d, кроме плоских пакетов первого и второго звука, параллельных нагревателю 1, отчетливо видны возмущения, вызванные распространением снизу вверх одного очага при $(Nt_+)_0$ и более низкой T . Наклонные ("очаговые") фронты второго звука на рис. 3, d пересекают задние границы пакетов второго звука. Очаги звуковых волн наблюдаются в He II также и на плоском нагревателе 2, имеющем

иную конструкцию. Видимые пузыри пара в He II достигают наибольших размеров (1–4 мм) через 2–10 мсек, а исчезновение их к моменту $t_+ = 20$ мсек не сопровождается заметным излучением звука.

Институт физических проблем
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
19 февраля 1970 г.

Литература

[1] А.И.Гуляев. ЖЭТФ, 57, 59, 1969.
