

ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКОЕ ЯВЛЕНИЕ В ГЕЛИИ-II

*Г.А.Гамцемлидзе, А.П.Григин, Б.И.Ильин, М.И.Мирзоева, Н.В.Петькин,
З.Г.Хоргуашвили, Д.Н.Цаава, Г.К.Шония*

Наблюдено электрокинетическое явление специфичное для гелия-II, поскольку обусловлено переносом введенных в жидкость зарядов нормальной компонентой и осуществляется при отсутствии суммарного переноса массы. Явление это аналогично термоэлектрическому в металлах. Исследована зависимость термоэдс от мощности тепловыделения, оценен электрокинетический потенциал.

Как известно, электрокинетические явления, наблюдаемые в дисперсных средах, связаны с существованием на границе твердое тело – жидкость свободных зарядов, образующих двойной электрический слой. Если жидкость протекает через дисперсную среду, то происходит смещение зарядов диффузной части двойного слоя и вынос избытка зарядов одного знака по направлению потока жидкости. Движение зарядов вдоль стенки представляет собой поверхностный ток и создает разность потенциалов на концах капилляров, которая, в свою очередь, дает начало "объемному" току проводимости в обратном направлении. Разность потенциалов возрастает до тех пор, пока поверхностный ток не станет равным объемному. Полученная разность потенциалов и называется потенциалом протекания $U_{\text{пр}}^1$:

$$U_{\text{пр}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon \zeta \Delta P}{\kappa \eta}, \quad (1)$$

где ΔP – перепад давлений на концах капилляров, η , ϵ , κ – соответственно вязкость, диэлектрическая проницаемость жидкости и ее электропроводность, ζ – электрокинетический потенциал, ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума. Для наблюдения указанного явления в гелии-II в него необходимо ввести заряды извне.

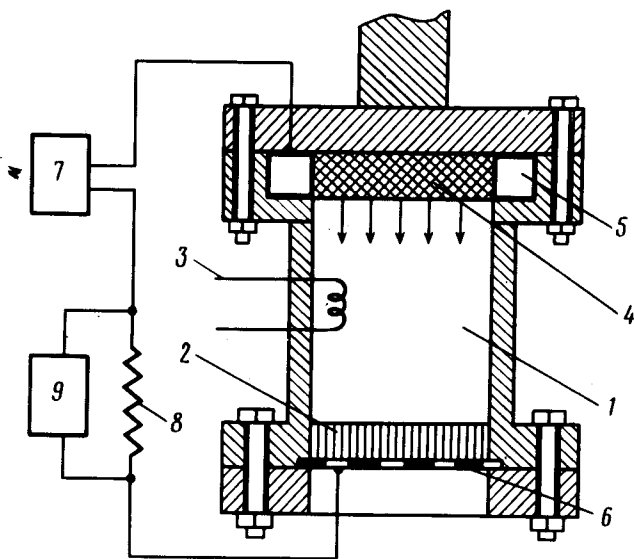


Рис. 1. Схема экспериментальной ячейки

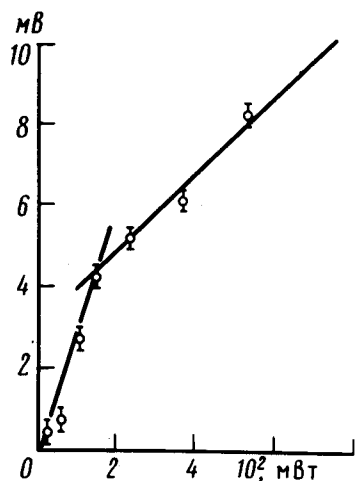


Рис. 2. Зависимость термоэдс ϵ_T от мощности тепловыделения Q

Пусть в ванну с гелием-II помещен замкнутый объем, сообщающийся с ванной с помощью капилляров. Если на концах капилляров поддерживается постоянная разность температур, то в них устанавливается противоток s - и n -компонент, удовлетворяющий при стационарном течении условию отсутствия переноса массы:

$$\rho_s v_s + \rho_n v_n = 0, \quad (2)$$

причем скорость n -компоненты v_n и разность температур ΔT на концах капилляров определяются мощностью тепловыделения \dot{Q} в замкнутом объеме:

$$v_n = \frac{\dot{Q}}{\rho \sigma T \Sigma S}, \quad (3)$$

$$\Delta T = \frac{8\pi \eta_n l}{(\rho \sigma)^2 T S \Sigma S},$$

где ρ , ρ_s , ρ_n — плотности жидкого гелия, его s - и n -частей, v_s — скорость s -компоненты, σ — энтропия единицы массы гелия, T — температура, η_n — вязкость нормальной компоненты, l — длина капилляра, S — его сечение, ΣS — сумма сечений всех каналов. Если при этом в гелий-II введены заряды, то, как и всякие посторонние частицы, они будут вовлекаться в движение n -компонентой (если s -компонента движется с докритическими скоростями), создавая на концах капилляров разность потенциалов. Таким образом, в гелии-II возникновение потенциала протекания, в отличие от классических жидкостей, можно наблюдать при отсутствии результирующего переноса массы, а величину возникающей при этом разности потенциалов можно регулировать разностью температур (мощностью тепловыделения). Описанное явление является аналогом термоэлектрических явлений, наблюдаемых в металлах. Учитывая (3) и то, что течение n -компоненты происходит в соответствии с законом Пуазейля, из (1) для термоэдс ϵ_T получаем:

$$\epsilon_T = \frac{8\pi \epsilon_0 \epsilon \zeta l}{\kappa \rho \sigma T S \Sigma S} \dot{Q}. \quad (4)$$

Для экспериментального обнаружения описанного явления, была сконструирована экспериментальная ячейка, изготовленная из плекса, помещенная в ванну с гелием-II (температуру ванны регулировали с точностью $\pm 10^{-3}$ К). Замкнутый объем 1 (рис. 1) сообщался с ванной гелия-II с помощью диска 2, в котором имелись строго параллельные цилиндрические каналы диаметром 10 мкм, толщина диска $l = 1$ см, диаметр 5 мм, коэффициент заполнения диска каналами 0,5. В объеме 1 помещался нагреватель 3 из константановой проволоки сопротивлением 160 Ом и радиоактивный источник 4, помещенный в свинцовую обойму 5, открытую в сторону диска. Расстояние от источника 4 до диска 2 составляло $l_1 = 4$ см. Поверхность действующей части источника ^{137}Cs имела диаметр 5 мм, его активность на расстоянии 4 см равна 0,5 мкюри. К диску 2 прижималась металлическая сетка 6. Все части ячейки шлифовались друг к другу и скреплялись так, чтобы при выделении тепла в нагревателе теплопередача из объема 1 осуществлялась в основном за счет потока n -компоненты через капилляры. Металлическая обойма источника 5 и сетка 6 подключались к источнику напряжения 7, создающему между ними разность потенциалов $U_0 = 300$ В, при этом на сопротивлении $8 R_0 = 9,1 \cdot 10^5$ Ом регистрировалось падение напряжения U_1 с помощью цифрового вольтметра 9 типа ФЗО. Это измерение позволяет определить удельную электропроводность жидкости κ . Рассматривая объем 1 как два последовательно включенных сопротивления $R_1 = l_1 / 2 \kappa \Sigma S$ — сопротивления жидкости до капилляров и $R = l / \kappa \Sigma S$ — сопротивления жидкости в капиллярах и учитывая, что $U_1 \ll U_0$, можем писать

$$U_0 / (R + R_1) = U_1 / R_0,$$

откуда

$$\kappa = \frac{U_1 (l + (l_1/2))}{R U_0 \Sigma S} = (4,4 \pm 0,4) \cdot 10^{-7} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}. \quad (5)$$

Далее, в нагревателе выделяли некоторую тепловую мощность \dot{Q} . При этом измерялось падение напряжения на сопротивлении R_0 до величины U , что указывает на появление в цепи термоэдс (потенциала протекания): $\epsilon_T = U - U_1$. На рис. 2 показана полученная в результате таких измерений зависимость термоэдс от мощности тепловыделения \dot{Q} при температуре ванны 1,5 К. Первый участок кривой (до излома) мы относим к докритическому режиму течения компонент, участок же после излома — к закритическому режиму. Уменьшение скорости возрастания ϵ_T в закритическом режиме обусловлено взаимодействием зарядов с квантованными вихрями. Таким образом, измерения термоэдс позволяют определить критическую скорость вихребразования. Электрокинетический потенциал ζ можно оценить из (4), если принять во внимание оценку κ (5) и $\epsilon_T / \dot{Q} = 0,03$ В/Вт из рис. 2:

$$\zeta = (20 \pm 4) \text{ мкВ}.$$

Авторы благодарны Ю.Г.Мамаладзе и В.Б.Шикину за полезные обсуждения.

Литература

1. Григоров О.Н., Козьмина З.П., Маркович А.В., Фридрихсберг Д.А. Электрокинетические свойства капиллярных систем, М.-Л., 1956 г.