

Б. Н. САМОЙЛОВ

**ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ МЕТАЛЛОВ ПРИ СВЕРХНИЗКИХ
ТЕМПЕРАТУРАХ (КАДМИЙ ОТ 0,3 ДО 0,9° К)**

(Представлено академиком Л. Д. Ландау 16 VII 1952)

Получение надежных данных по электронным теплоемкостям металлов возможно лишь при проведении калориметрических измерений в области температур жидкого гелия. Однако и эта область оказывается все еще слишком высокой для ряда металлов с низкими дебаевскими температурами (висмут, таллий). Изучение электронной теплоемкости сверхпроводников требует, в свою очередь, проведения экспериментов в возможно более широком интервале температур, причем верхняя граница этого интервала определена критическими температурами перехода. Оба эти факта говорят о необходимости расширения области калориметрических исследований в сторону сверхнизких температур. В настоящей работе дано описание методики, с помощью которой было произведено определение теплоемкости кадмия в интервале температур от 0,3 до 0,9° К.

Охлаждение образца достигалось путем приведения его в тепловой контакт с блоком адиабатически размагниченных железо-аммониевых квасцов. На рис. 1 дана тепловая схема калориметров. Тепловой контакт обеспечивался теплопроводностью тонкой медной проволоочки (теплопровод T_1), присоединенной к образцу 3, и двум полоскам из листовой меди 2, которые были запрессованы в блок соли 1. Теплосопrotивление проволоочки подбиралось так, чтобы происходило сравнительно быстрое (~ 1 часа) охлаждение образца от исходной температуры до наинизшей; с другой стороны, это сопротивление было достаточно большим для того, чтобы время рассасывания энергии, подведенной к образцу в нагревательный период, было велико по сравнению с самим периодом. Выбор такого теплового режима позволял производить измерения теплоемкости без изменения сопротивления теплопровода, соединявшего образец с солью. В проведенных нами опытах медная проволоочка имела диаметр 0,1 мм при длине около 300 мм. При таком теплопроводе время рассасывания составляло 5—10 мин., в зависимости от теплоемкости образца, что существенно превышало длительность нагревательного периода (~ 10 сек.). Для уменьшения собственного температурного хода образца при повышенных температурах (0,5—0,9° К) использовался дополнительный нагреватель 4, смонтированный вне образца и соединенный с последним теплопроводом T_2 , аналогичным T_1 . Поток энергии, который выделялся этим нагрева-

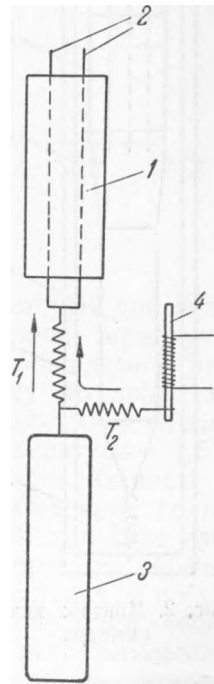


Рис. 1. Тепловая схема калориметра

телем, вызывал повышение равновесной температуры образца, пропорциональное этому потоку и теплосопrotивлению теплопровода T_1 .

Температура образца измерялась бронзовым термометром, находившимся с ним в тепловом контакте. Чувствительным элементом термометра являлась 30 μ проволочка, смонтированная в небольшой медной ампуле. Тепловой контакт между проволочкой и образцом обеспечивался жидким гелием II, находившимся в ампуле, и коротким медным «мостиком» между ампулой и образцом. Термометр, приведенный в

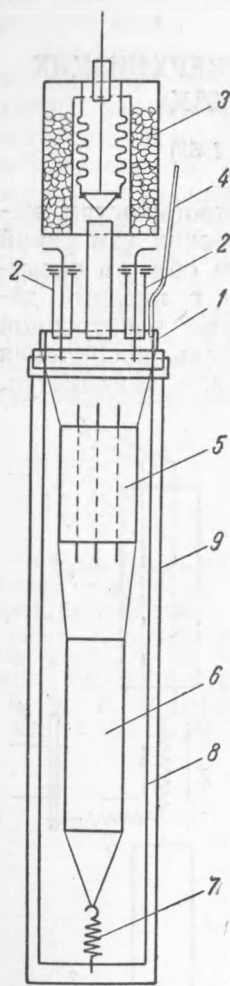


Рис. 2. Монтаж калориметра

тепловой контакт с солью, градуировался по восприимчивости железо-аммониевых квасцов (марки Ч.Д.А.). Определение магнитной температуры производилось путем измерения отбросов баллистического гальванометра при перемещении катушки, включенной в его цепь, относительно блока соли (1). Поправки на различие между магнитной и термодинамической шкалами температур вводились в соответствии с работами Кюрти и Симона (2) и Кука (3). Термометр оказался чувствительным к внешним электромагнитным помехам вследствие зависимости его сопротивления от величины протекающего тока. Этот факт сильно мешал точному измерению температуры образца и в особенности ее приращения и служил основным источником погрешностей. Борьба с неустойчивостью термометра велась путем экранирования отдельных участков измерительной схемы, а также включением емкостных шунтов в токовую и потенциальную линии схемы.

Образец приготавливался из переплавленного в вакууме, технически чистого кадмия марки КД-0, содержавшего, по техническим условиям, кадмия не меньше 99,95% и, в качестве примесей: свинца $< 0,02\%$, цинка $< 0,01\%$, меди $< 0,01\%$ и железа $< 0,003\%$. Он имел форму цилиндра диаметром около 17 мм при длине около 85 мм; вес образца составлял 161,8 г, или 1,44 г.-атома. На наружной поверхности образца протачивалась спиральная канавка, в которую вклеивался (с помощью клея БФ-2) нагреватель — константановая проволока диаметром 0,15 мм. Ампула бронзового термометра помещалась в цилиндрической полости, просверленной в нижнем торце образца.

В методе адиабатического размагничивания всегда вызывает некоторые трудности переход от стадии изотермического намагничивания к адиабатическому размагничиванию. Эти трудности обусловлены малой эффективностью откачки, а также неизбежным теплопроводом путем проникновения излучения от тепловых частей прибора по вакуумным коммуникациям. Мы избежали эти трудности, используя для удаления теплообменного гелия активированный уголь, находившийся при температуре жидкого гелия («адсорбционный насос»). Идея применения активированного угля для высоковакуумной откачки рубашки калориметра принадлежит П. Г. Стрелкову. «Адсорбционный насос» был соединен с рубашкой коротким патрубком и отделялся от нее сильфонным вентиляем, управление которым было вынесено на крышку гелиевого дьюара. Монтаж калориметра изображен на рис. 2.

Блок соли 5 и образец 6 подвешивались друг над другом на крышке 1 вакуумной рубашки калориметра. Там же помещались шесть изоли-

рованных электрических вводов 2 (4), «адсорбционный насос» 3 и тонкая мельхиоровая трубка 4, служившая для откачки вакуумной рубашки и для заполнения ее гелием. Блок соли подвешивался на проволочках из нержавеющей стали, образец — на капроновых нитях. Последний оттягивался спиральной пружинкой 7 к проволочной рамке 8 для уменьшения колебаний системы. Монтаж электрических цепей термометра и нагревателей производился константановыми проволочками

кал/моль·град.⁴

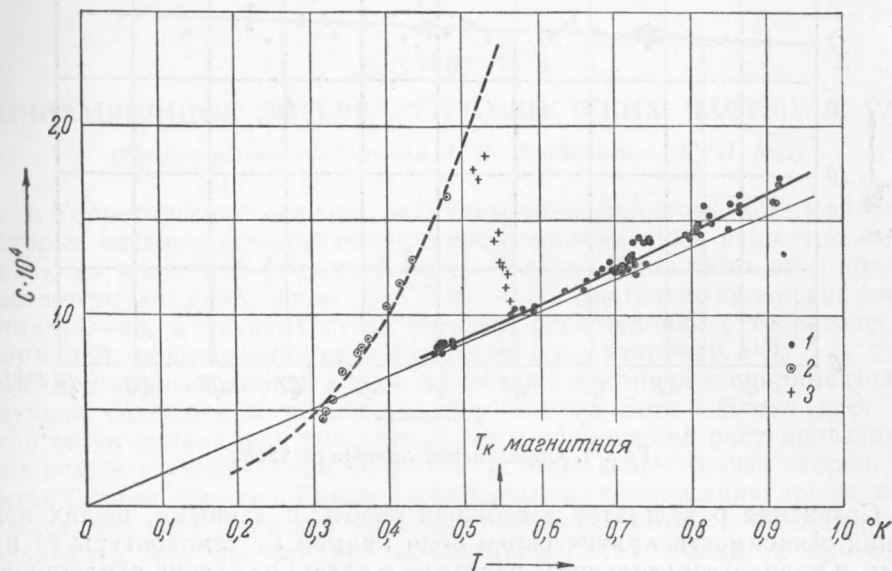


Рис. 3. Теплоемкость кадмия

диаметром 0,07 мм, залуженными мягким припоем, который при гелиевых температурах становится сверхпроводящим. В цепи термометра и нагревателей были включены медные полоски, запрессованные в блок соли, что сводило к минимуму теплоподвод к образцу по проводам. После сборки калориметра производилась запайка вакуумной рубашки 9. Размагничивание производилось при исходной температуре $\sim 1,5^\circ\text{K}$ и магнитном поле около 12000 эрст. Перед размагничиванием в течение 10—15 мин. производилась «откачка» теплообменного гелия. Сопротивление термометра измерялось потенциометром при силе тока через бронзовую проволочку, равной 50 μa . Ход температуры образца при снятии кривых нагрева снимался по положению зайчика на шкале гальванометра. Приращение температуры определялось графически как отрезок прямой, проведенной через середину нагревательного периода, между экстраполированными кривыми собственного температурного хода образца перед нагревом и кривой рассасывания. Дозировка подведенной энергии производилась силой тока, измерявшейся по миллиамперметру класса 0,5, и временем, отсчитываемым по секундомеру. Сопротивление нагревателя измерялось в дополнительных опытах. Результаты измерения теплоемкости представлены на рис. 3, где 1 — теплоемкость кадмия в нормальном состоянии, 2 — теплоемкость в сверхпроводящем состоянии и 3 — в переходной области. Для разделения теплоемкости кадмия в нормальном состоянии на электронную и дебаевскую, результаты измерений были нанесены в в координатах C/T и T^2 (рис. 4). В результате такого метода обработки для теплоемкости кадмия в нормальном состоянии было получено выражение: $C = \{1,70 \cdot 10^{-4} T + 464,5 (T/300)^3\}$ кал/моль·град.

Теплоемкость кадмия, находящегося в сверхпроводящем состоянии, изменяется с температурой приблизительно по кубическому закону. Вследствие узости интервала, в котором производились наши измерения, и нерегулярностям в ходе сопротивления термометра ниже $0,4^{\circ}\text{K}$ точнее установить закон изменения теплоемкости в сверхпроводящем состоянии не представляется возможным.

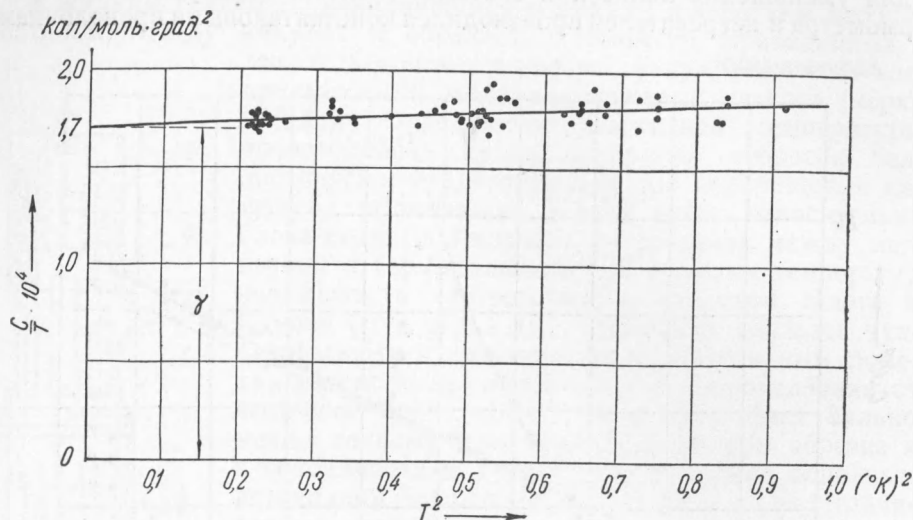


Рис. 4. Определение линейного члена

Сравнение результатов настоящей работы с данными наших измерений зависимости критического поля кадмия от температуры ⁽¹⁾ привело к удовлетворительному согласию в величине скачка теплоемкости при переходе в сверхпроводящее состояние. Для иллюстрации этого согласия на рис. 3 проведена пунктирная кривая, полученная прибавлением к теплоемкости нормального состояния скачка, вычисленного из магнитных измерений. Величина линейного члена теплоемкости нормального состояния γT , определенная из калориметрических измерений, превышает ее значение, найденное из магнитных измерений, приблизительно на 20%. Погрешности в определении γ из калориметрических экспериментов не превосходят 8%, что вместе с ошибками магнитных опытов может привести к 10% разногласию в величинах γ . Различие в 20%, повидимому, не может быть истолковано ошибками измерений, тем более, если принять во внимание удовлетворительное согласие в величине скачка теплоемкости. Допущение в теплоемкости сверхпроводника линейного члена, составляющего 20% от теплоемкости нормального состояния, приводит к удовлетворительному согласию обоих экспериментов. Окончательного вывода о наличии линейного члена в теплоемкости сверхпроводника мы не делаем; этот факт нуждается в прямой экспериментальной проверке.

Выражаю глубокую благодарность руководителю работы П. Г. Стрелкову и Н. Е. Алексеевскому. Автор благодарит С. А. Яковлева и В. И. Колокольникова за помощь в проведении экспериментов.

Институт физических проблем им. С. И. Вавилова
Академии Наук СССР

Поступило
11 VII 1952

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Б. Н. Самойлов, ДАН, 81, 791 (1951). ² N. Kurti, F. Simon, Phil., Mag., 26, 849 (1938). ³ А. Н. Cooke, Proc. Phys. Soc., A 62, 269 (1949). ⁴ Б. Н. Самойлов, ЖТФ, 22, 888 (1952).