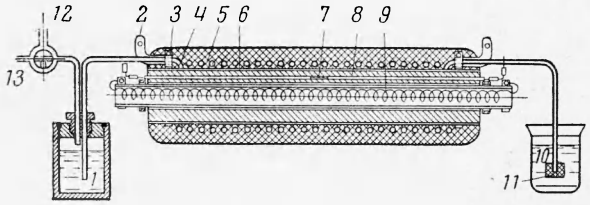
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЖИДКИХ НАТРИЯ, КАЛИЯ И ЛИТИЯ

А. Н. Соловьев (*Новосибирск*)

Электропроводность жидких щелочных металлов исследована еще недостаточно. Как показано в обзоре Томсона и Гарелиса, помещенного в книге Ситтига [1], большинство работ выполнено в относительно небольшом интервале температур. Между данными различных авторов существует расхождение, которое особенно велико для лития. Так, при 230° С Фридман [2] дает значение удельного сопротивления $\rho = 26$ *мком·см*, в [3] приведено значение $\rho = 45.25$ *мком·см*, а в [4] $\rho = 2.05$ *мком·см*. Величину электропроводности нужно знать для проведения некоторых технических расчетов. Кроме того, по-видимому, возможно, воспользовавшись тем, что отношение электропроводности к теплопроводности и абсолютной температуре остается практически постоянным, определять теплопроводность жидких металлов более надежно, чем при непосредственных измерениях, так как последние имеют значительно более низкую точность.

Электропроводность является величиной очень чувствительной к различным примесям и структуре. Поэтому экспериментальные данные могут дать сведения о структуре и межмолекулярных силах в жидкости. Ниже приводятся некоторые результаты измерений электропроводности расплавленных натрия, калия, лития.

Экспериментальная установка. После анализа существующих методов был принят компенсационный метод измерения электрического сопротивления на постоянном токе. При этом измеряется падение напряжения на определенной длине образца и ток через него. Так как жидкий металл должен при этом находиться в каком-либо контейнере, то приходится предварительно определять сопротивление этого контейнера.



Фиг. 1. Рабочий участок и схема заполнения: *1*—компенсационный объем, *2* — медный контакт, *3* — хомутик, *4* — капилляр, *5* — асбестовая изоляция, *6* — слюда, *7* — термопара, *8* — медная трубка, *9* — нагреватель. *10* — расплавленный натрий, *11* — пробка, *12*—к баллону с аргоном, *13* — к вакуумному насосу

На фиг. 1 приведена схема одного варианта экспериментальной установки. Жидкий металл находится в тонком капилляре из нержавеющей стали. Внутренний диаметр $d = 0.5$ *мм*, толщина стенки $\delta = 0.15$ *мм*, длина $L = 800$ *мм*. Капилляр поверх слюды давит на толстостенную медную трубку в ее средней части и закреплен хомутиками из нержавеющей стали. Длина навитой части медной трубки около 50 *мм*, т. е. составляет примерно $^1/_3$ от общей длины медной трубки. Это обеспечивает хорошую равномерность температурного поля. Сверху наложена изоляция из шнурового асбеста. Печь в виде спирали из сплава № 2 помещена внутри кварцевой трубки, вставленной в медную трубку. Мощность печи плавно регулируется при помощи двух соединенных последовательно автотрансформаторов РНО-1. В цепи печи имеется амперметр. Температура измеряется образцовой платина-платинородиевой термопарой, заделанной в стенку медной трубки. Холодные спаи термопары помещены в тающий лед. Электродвижущая сила термопары измеряется потенциометром постоянного тока типа Р-375.

В этом варианте установки электрические контакты изготовлены в виде зажимов из листовой меди. Капилляр обертывается несколькими слоями медной ленты и зажимается вместе с ней в специальном пазе хомутика. Возможная неопределенность места контакта может внести погрешность в определение длины трубки не более 0.2%. Один конец капилляра свободен, другой впаян в пробку компенсационного объема. В этой же пробке имеется второй капилляр, через который можно откачивать форвакуумным насосом компенсационный объем и капилляр или подавать инертный газ. Рабочая часть капилляра включена в обычную токовую цепочку, содержащую источник постоянного напряжения (аккумулятор), регулировочный реостат, миллиамперметр, ключ и образцовую катушку сопротивления типа Р-33 ($R = 1.0000$ *ом*).

Падение напряжения на рабочем участке и на образцовой катушке измеряется потенциометром Р-375. Для наблюдения за выходом на стационарный режим падение напряжения на рабочем участке и э. д. с. термопары могут быть при помощи переключателей поданы на электронный автоматический потенциометр.

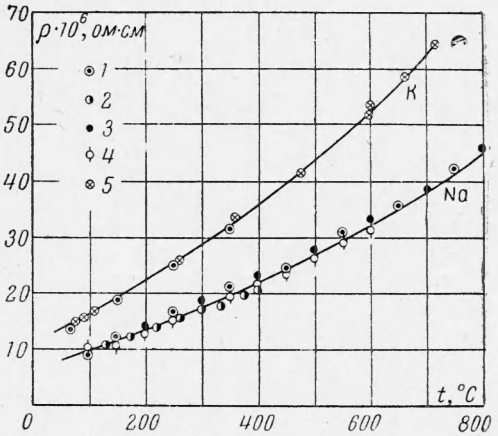
Для проверки надежности потенциальных контактов капилляр длиной около 1600 *мм* при измерениях на натрии навивался последовательно на два рабочих участка. Результаты измерений на обоих участках хорошо совпали.

При измерении электропроводности калия и лития было использовано по одному рабочему участку, но они были включены в одну токовую цепь, и измерения производились в одно время.

До начала опытов с жидким металлом производилось измерение электрического сопротивления пустых капилляров в зависимости от температуры. Оказалось, что эти данные совпали с табличными данными для стали ЭЯ1Т [3].

Заполнение металлом производилось следующим образом: свободный конец капилляра закрывался пробкой из тефлоновой резины, и вся система откачивалась в течение нескольких часов при температуре капилляра около 500° С.

Далее этот конец капилляра опускался в расплавленный под парафином металл и снималась пробка. Жидкий металл в количестве около 30 *мл* просасывался через капилляр в компенсационный объем. Для прекращения заполнения конец капилляра пережимался. После выдержки в течение 2÷3 *час.* в компенсационный объем подавался очищенный аргон, небольшое количество металла сбрасывалось назад в заполнительный стаканчик и свободный конец капилляра охлаждался до комнатной температуры. При этом застывший в нем металл создавал вакуумно-плотную пробку.



Фиг. 2. Электрические сопротивления натрия и калия; точка *1* — данные Рахизера, *2* — данные, усредненные Томсоном, *3* — по уравнению Эпштейна, *4* — данные Фридмана, *5* — данные автора, *6* — данные Рахизера

Во время опытов компенсационный объем и отрезок капилляра до рабочего участка поддерживались при температуре несколько выше температуры плавления и, таким образом, излишки жидкого металла при изменении температуры могли переходить из рабочего участка в компенсационный объем (и наоборот). В компенсационном объеме все время поддерживалось избыточное давление около 5 *ата*. Опыты производились следующим образом. Влючалась печь рабочего участка и устанавливалась заданная температура. Не менее трех раз измерялись падения напряжения на рабочем участке и на образцовой катушке при прямом и обратном направлении тока (впоследствии в связи с полным совпадением измерения производились только при одном направлении тока). Опыты велись как при повышении, так и при снижении температуры. Хотя измерения можно было производить уже спустя 15÷20 мин. после изменения мощности печи, они начинались тогда, когда скорость изменения температуры не превышала 1° С в час. Не было замечено изменение электропроводности при многократном затвердевании и последующем расплавлении.

Электрическое сопротивление натрия и лития определено до 1000°С, а калия до 730°С. Наибольшее количество точек получено для натрия (около 60 точек).

Результаты измерений. Результаты измерения электросопротивления приведены на фиг. 2 и 3. Там же нанесены для сравнения данные других авторов. Наши данные по электросопротивлению натрия хорошо согласуются с данными Рахизера, Томсона, Эпштейна (формула) [5] и лежат несколько выше данных Фридмана [2], который принимал специальные меры для очистки металла от примесей и считал, что его данные более достоверны. Им же проведены исследования сплавов натрия с калием, из которых следует, что для объяснения завышения у остальных авторов надо предположить, что в их образцах было около 1% калия, что не очень вероятно. Результаты измерений по калию, проведенные в настоящем исследовании, хорошо совпадают с данными [5]. Электросопротивление калия не удалось измерить выше 730° С, так как образовалось отверстие в капилляре и калий вытек.

Наибольший разброс экспериментальных точек получен для лития. Причем резко выпадающая точка при 680° С была получена дважды после затвердевания. Причину установить не удалось, так как при третьем разогреве капилляр разрушился.

Данные настоящей работы хорошо согласуются с данными Фридмана [2] в интервале 300 — 350° С, а на более низких температурах его данные лежат ниже, причем кривая имеет другой характер, т. е. вогнута к оси ординат. По-видимому, необходимы дополнительные опыты, которые позволят уточнить значения электросопротивления лития и характер зависимости его от температуры. Данные [3, 4] резко отличаются от данных настоящей работы и, вероятно, их не следует обсуждать, так как способ их получения неизвестен, кроме того, приведено всего по одной точке. Приво-

дим значения электросопротивления ρ в *мк ом см* для лития, натрия и калия, взятые с интерполирующих кривых, построенных по нашим данным.

$t°$ =	64	100	184	200	300	400
ρ_{Li} =	—	—	26.0	26.4	28.8	31.2
ρ_{Na} =	—	10.01	—	13.63	17.70	22.22
ρ_{K} =	13.6	16.3	—	22.3	28.8	36.2

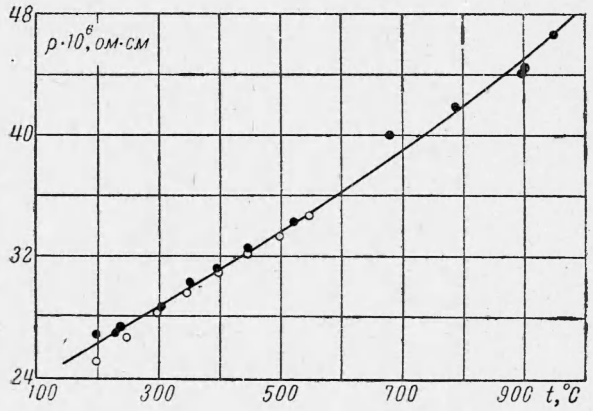
$t°$ =	500	600	700	800	900	1000
ρ_{Li} =	33.7	36.3	39.1	41.7	44.6	48.1
ρ_{Na} =	27.23	32.76	38.87	45.64	53.21	61.77
ρ_{K} =	44.0	52.5	62.2	—	—	—

Для натрия получена интерполяционная формула методом наименьших квадратов

$$\rho = 10.01\cdot10^{-6}\,[1 + 4.00\cdot10^{-3}\,(t-100) + 2.32\cdot10^{-6}\,(t-100)^2 - 0.553\cdot10^{-9}\,(t-100)^3 + 0.97\cdot10^{-12}\,(t-100)^4]\ \textit{ом}\cdot\textit{см}$$

Оцененная погрешность измерений составляет 2.5%. Средний разброс экспериментальных точек для натрия 0.3%, для калия 0.5% и для лития 0.8%.

Следует отметить, что наибольшую погрешность, носящую систематический характер, для одной серии опытов дает неточность в определении диаметра капилляра. Последний определялся тремя способами: 1) по весу куска капилляра, измеренному наружному диаметру и табличным значениям удельного веса нержавеющей стали; 2) по электрическому сопротивлению рабочей части капилляра; 3) по весу заполненного натрием и пустого капилляра.



Фиг. 3. Электрическое сопротивление лития: *1* — данные автора, *2* — данные Фридмана

Для всех металлов было принято в расчет одно среднее из измеренных значений. Отличие от этого среднего составляет ±1%.

Таким образом, подобные измерения удобно проводить для исследования температурной зависимости электросопротивления, где эта погрешность будет исключена. Заметим, что одним из главных достоинств метода является сравнительно большая величина сопротивления рабочего участка ($R \approx 1$ *ом*), что позволяет практически не считаться с переходными сопротивлениями и вредными э. д. с. и проводить измерения на постоянном токе.

Поступила 19 IX 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Ситтиг М. Натрий. Госатомиздат, 1961.
2. Freedman I. F., Robertson W. D. Electrical Resistivity of Liquid Sodium, Liquid Lithium and Dilute Liquid Sodium Solutions. J. Chem. Phys., 1961, 34, 769.
3. Теплофизические свойства веществ. Справочник под ред. Н. Б. Варгафтика. М., Госэнергоиздат, 1956.
4. Чиркин В. С. Теплопроводность промышленных материалов, Машгиз, 1960.
5. Жидкометаллические теплоносители. ИЛ, 1958.