

# Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Л. И. Аксенова, Д. К. Белащенко, А. И. Перцин,  
Электроперенос, электросопротивление и плотность  
электронных состояний в расплавах Cs – K и Na –  
Cs, *ТВТ*, 1971, том 9, выпуск 6, 1159–1167

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 34.239.153.44

6 ноября 2024 г., 08:35:54



УДК 541.67

## ЭЛЕКТРОПЕРЕНОС, ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ И ПЛОТНОСТЬ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ

В РАСПЛАВАХ Cs — K и Na — Cs

Л. И. Аксенова, Д. К. Белащенко, А. И. Перцин

Исследованы электроперенос и электросопротивление жидких растворов систем Cs — K и Na — Cs. В системе Cs — K электросопротивление измерено для сплавов восьми составов при 25, 110, 150° C, а в системе Na — Cs — для сплавов семи составов при 110, 150, 200° C. Для изотерм электросопротивления обеих систем характерна параболическая форма с максимумом при составе 30 ат. % K и 40 % Na. Электроперенос изучен при 110° C методом стационарного состояния. При ~55% Cs в системе Cs — K и при ~50% Na в системе Na — Cs наблюдается инверсия направления электропереноса. Примесь в разбавленном растворе мигрирует к положительному электроду. Методом, предложенным в [4], рассчитаны относительные характеристики плотности электронных состояний на уровне Ферми. Найдено, что системы Cs — K и Na — Cs характеризуются значительными отклонениями от модели свободных электронов.

Обычно считают, что жидкие щелочные металлы неплохо описываются в рамках модели свободных электронов. Однако полной ясности в этом вопросе не существует из-за отсутствия исчерпывающего описания электронного строения жидких щелочных металлов. Приближение почти свободных электронов довольно успешно используется для описания электрических свойств этих металлов в теории Займана [1]. Но, как было показано Моттом [2], хорошее согласие с экспериментом значений электросопротивления, рассчитанных по формуле Займана

$$\rho = (12\pi^3\hbar) / (e^2 S l_z) \quad (1)$$

(здесь  $e$  — заряд электрона,  $S$  — площадь поверхности Ферми в пространстве волновых векторов;  $l_z$  — длина свободного пробега ферми-электрона для случая выполнения модели свободных электронов), вовсе не исключает значительных отклонений от модели свободных электронов. В теории Мотта [2] электросопротивление считается функцией плотности электронных состояний

$$\rho = (12\pi^3\hbar) / (e^2 S l g^2). \quad (2)$$

Здесь  $l$  — длина свободного пробега ферми-электронов; параметр  $g$  определяется отношением фактической плотности состояний на уровне Ферми к этой величине в модели свободных электронов

$$g = N(\epsilon_F) / [N(\epsilon_F)]_{\text{МЭЭ}}. \quad (3)$$

В случае слабого взаимодействия  $l = l_z / g^2$ , так что уравнения (1) и (2) тождественны [2].

Жидкие растворы щелочных металлов изучены в еще меньшей мере, чем чистые металлы. По данным работы [3] приближение свободных электронов дает неплохое количественное согласие при расчете электросопротивления концентрированных сплавов Na — K, но разбавленные растворы плохо описываются этой моделью.

Как показано в [4], на основании данных по электросопротивлению и электропереносу может быть рассчитана относительная характеристика плотности электронных состояний на уровне Ферми — параметр  $g$ . В работе [5] этот метод применен для изучения расплавов Na — K. Отклонения от модели свободных электронов в расплавах этой системы и в чистом калии оказались довольно значительными.

Проверкой правомерности применения схемы расчета [4] для электронных свойств жидких щелочных металлов и их сплавов является взаимная согласованность результатов, полученных для тройной системы или для трех сопряженных двойных систем А — В, В — С и А — С.

**Экспериментальная часть.** Сплавы систем Cs — K и Na — Cs готовили перегонкой исходных компонентов в вакууме  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  мм рт. ст. аналогично тому, как это делали при работе со сплавами системы Na — K [5]. Температура перегонки  $350^\circ\text{C}$ . Перед приготовлением сплавов исходные металлы заливали под вакуумом  $10^{-2}$  мм рт. ст. в капилляры точно измеренного диаметра. Необходимое для приготовления данного сплава количество компонентов получали, отрезая определенные куски этих капилляров. В случае цезия металл предварительно замораживали в жидком азоте и под слоем жидкого азота отрезали часть капилляра пужной длины, которую помещали в систему для синтеза сплава, также охлажденную жидким азотом. Чистота исходных натрия и калия — 99,9%, цезия — 99,99%.

При измерении электропроводности металл перегоняли непосредственно в измерительную ячейку (рис. 1). При приготовлении сплавов для изучения электропереноса применяли методику, описанную в работе [5].

Рис. 1. Ячейка для измерения электросопротивления (а); ячейка для изучения электропереноса методом измерения электросопротивления (б)

**Измерение электросопротивления.** Электросопротивление в системе Cs — K измеряли в сплавах состава: 3,8; 18,6; 20,4; 53,5; 67,6; 72,6; 80,2; 89,0 ат. % Cs при  $25$ ,  $110$  и  $150^\circ\text{C}$ . В системе Na — Cs измеряли электросопротивление расплавов с 3,4; 12,3; 15,0; 27,0; 41,9; 58,4; 82,4 ат. % Na при  $110$ ,  $150$  и  $200^\circ\text{C}$ .

Таблица 1  
Электросопротивление в расплавах Cs — K

Cs, ат. %	$\rho$ , мком·см		
	$25^\circ\text{C}$	$110^\circ\text{C}$	$150^\circ\text{C}$
0	—	17,3	19,4 *
3,8	—	23,4	26,4
18,6	—	38,0	41,0
20,4	35,1	40,0	42,7
53,5	57,1	62,1	65,5
67,6	—	66,9	70,6
72,6	64,1	—	—
80,2	—	67,5	68,2
89,0	47,2	57,7	63,05
100,0	—	46,6	50,9 *

\* Данные из работы А. Н. Соловьева.

Таблица 2  
Электросопротивление в расплавах Na — Cs

Na, ат. %	$\rho$ , мком·см		
	$110^\circ\text{C}$	$150^\circ\text{C}$	$200^\circ\text{C}$
0	46,6	50,9	56,5 *
3,4	66,0	70,7	76,5
12,3	105,2	103,2	114,2
15,0	114,0	117,5	123,1
27,0	157,0	160,0	163,0
41,9	171,7	174,0	177,0
58,4	158,9	161,5	164,8
82,4	92,4	95,0	93,0
100,0	10,1	11,4	13,2 *

\* Данные из работы А. Н. Соловьева.

Измерительная ячейка, изготовленная из молибденового стекла, представлена на рис. 1, а. Изменение электросопротивления проводили в режиме компенсации на постоянном токе силой  $1\text{ а}$  четырехконтактным методом (см. рис. 1, а: токовые электроды — а, потенциальные — б). Ошибка определения электросопротивления 0,5%. После измерения состав сплава уточняли химическим анализом с помощью метода ишаменного фотометрирования. Результаты измерений удельного электросопротивления  $\rho$  представлены в табл. 1, 2. Данные для чистых Na, K и Cs заимствованы из работы А. Н. Соловьева \*. На рис. 2, 3 представлена концентрационная зависимость  $\rho$ . Для обеих изучаемых систем характерна параболическая форма изотерм электросопротивления. Максимум электросопротивления в системе Cs — K соответствует  $\sim 70\text{ ат.}\%$  Cs, а в системе Na — Cs  $\sim 40\%$  Na.

**Исследование электропереноса.** Электроперенос в расплавах Cs — K и Na — Cs изучали методом стационарного состояния в прямых вертикальных капиллярах при  $110 \pm 3^\circ\text{ С}$ . Обычная методика приготовления образцов для электродиффузионного отжига была несколько изменена — не вварить верхний электрод (из-за высокой упругости паров металлов), не вклетить (из-за бурного окисления цезия), как это делалось в работе [5], не представлялось возможным. Применялись два типа образцов, показанные на рис. 4, а, б (материал — молибденовое стекло). На рис. 4, а изображен капилляр с внутренним диаметром 0,9—1,2 и длиной 40 мм, соединенный с резервуаром. Верхний электрод погружен в устье капилляра на  $\sim 1$ —

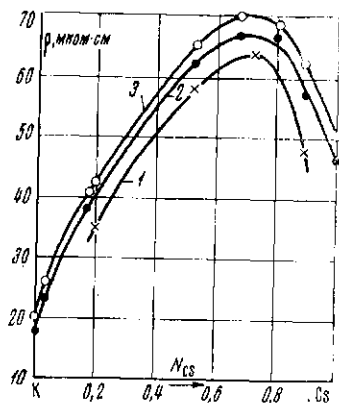


Рис. 2. Зависимость электросопротивления от состава сплавов системы Cs — K:

1 —  $25^\circ\text{ С}$ ; 2 —  $110$ ; 3 —  $150$

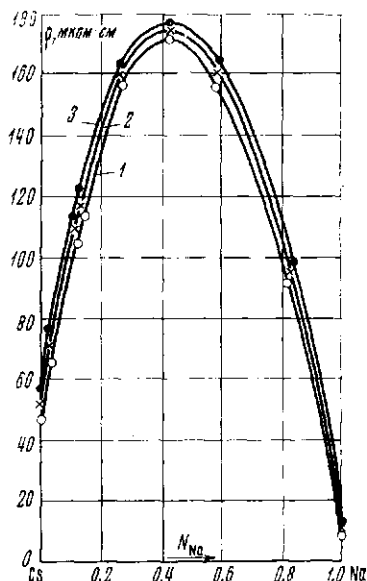


Рис. 3. Зависимость электросопротивления от состава сплавов системы Na — Cs:

1 —  $110^\circ\text{ С}$ ; 2 —  $150$ ; 3 —  $200$

2 мм. К резервуару приваривали систему для заполнения. Наличие резервуара увеличивает время установления стационарного состояния. Это неудобство устранено в образцах второго типа (рис. 4, б). В капилляр с внутренним диаметром 0,9—1,2 и длиной 40—50 мм вварены верхний и нижний электроды. Точно посередине к капилляру приварена система для заполнения. При сварке составных частей старались по мере возможности не искажать геометрию капилляра.

Заполнение капилляров сплавом проводили так же, как и в работе [5]. Небольшой избыток сплава в образцах типа а и б (рис. 4) обеспечивал

\* А. Н. Соловьев, Автореф. докт. дис., ИВТ АН СССР, М., 1969.

компактность столбика металла во время электродиффузионного отжига.

Через образцы, помещенные в печь, пропускали постоянный ток силой  $1,00 \pm 0,02$  а до установления стационарного состояния (около шести суток в образцах типа *б* и около двадцати суток в образцах типа *а*). После отжига образцы закаливали в жидком азоте, под слоем жидкого азота делили на кусочки длиной  $\sim 4$  мм и определяли содержание обоих компонентов методом пламенного фотометрирования.

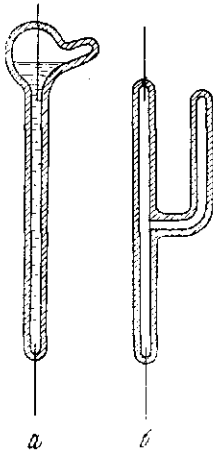


рис. 4. Ячейки для проведения опыта по электропереносу

Эффективные заряды находили по формуле

$$\frac{d \ln a_i}{d \ln N_i} \frac{d \ln N_i}{dx} = \frac{eEz_i^*}{kT}, \quad (1)$$

где  $x$  — координата длины образца;  $N_i$  — мольная доля  $i$ -го компонента;  $E$  — напряженность электрического поля;  $e$  — заряд электрона;  $z_i^*$  — эффективный заряд  $i$ -го компонента в единицах заряда электрона;  $T$  — абсолютная температура;  $k$  — постоянная Больцмана;  $d \ln a_i / d \ln N_i$  — термодинамический множитель. Величину  $d \ln N_i / dx$  определяли графическим дифференцированием кривой  $\ln N_i = f(x)$ . Ошибка нахождения  $d \ln N_i / dx$  определялась ошибкой химического анализа и составляла  $\sim 10\%$ .

В некоторых сплавах системы Na — Cs (15; 35; 40; 82 ат. % Na) электроперенос изучали методом измерения электросопротивления в процессе электродиффузионного отжига [6]. Ячейка, в которой проводили опыт (рис. 1, б, материал — молибденовое стекло) состоит из резервуара емкостью  $\sim 2$  см<sup>3</sup>, в который впаиваны два капилляра — короткий (длиной 10 мм) с внутренним диаметром 1 мм и длинный (длиной 60 мм) с внутренним диаметром 2 мм. В металлическую ванну резервуара погружены два электрода — потенциальный и токовый; в нижние закрытые концы обоих капилляров также вварены по два электрода. Опыт по электропереносу проводили в коротком капилляре, длинный служил для определения состава сплава по значению его удельного электросопротивления, что исключало необходимость дополнительного химического анализа после опыта. Сила постоянного тока в коротком капилляре 0,4—0,6 а.

Эффективный заряд в этом методе рассчитывали по формуле [7]

$$\frac{R_{\text{стац}} - R_0}{R_0} = \frac{mN_i^0}{B_0 \lambda (h - 1)} \ln \frac{(h - 1)e^{u_0 \lambda} + e^{u_0 \lambda (1 - h)}}{h}. \quad (5)$$

Здесь  $R_0$  и  $R_{\text{стац}}$  — сопротивление образца до пропускания тока и в стационарном состоянии;  $N_i^0$  — начальная концентрация;  $\lambda$  — длина образца; коэффициент  $m$  определяется зависимостью электросопротивления от состава  $\rho = \rho_0 [1 + m(N_i - N_i^0)]$ ;  $h = 1 - mN_i^0$ ; величина  $B_0$  связана с эффективным зарядом соотношением

$$\frac{eEz_i^*}{kT} \frac{d \ln N_i}{d \ln a_i} = B_0 [1 + m(N_i - N_i^0)]. \quad (6)$$

Поскольку теплоты смешения в расплавах Cs — K малы (14,5—29,6 кал/г·ат в интервале концентраций 18,6—59,4 ат. % K при 110°С [8]), величина термодинамического множителя  $d \ln a_i / d \ln N_i$  в этой системе рассчитана по данным [8] в предположении, что энтропия смешения под-

чиняется законам регулярных растворов. Тогда

$$\frac{d \ln a_i}{d \ln N_i} = \frac{d \Delta \bar{H}_i}{d \ln N_i} \cdot \frac{1}{RT} + 1, \quad (7)$$

где  $\Delta \bar{H}_i$  — парциальная теплота смешения  $i$ -го компонента. Полученные значения представлены в табл. 3.

Таблица 3

Термодинамический множитель для системы Cs—K при 110° C

K, ат. доля	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	1
$d \ln a_i / d \ln N_i$	1	1,001	0,999	0,988	0,970	0,950	0,931	0,917	0,913	0,923	0,951	0,973	1

Таблица 4

Термодинамический множитель для системы Na—Cs при 110° C

Na, ат. доля	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	1
$d \ln a_i / d \ln N_i$	1	0,84	0,75	0,77	0,89	0,85	0,70	0,50	0,32	0,18	0,25	0,48	1

В системе Na—Cs отклонения от идеальности, по данным [8], значительны; теплоты смешения в интервале составов 21—67 ат. % Na при 110° C составляют 106—243 кал/г-ат. Мы принимали, что энтропия смешения и здесь не зависит от температуры. В этом случае коэффициент активности  $\gamma$  может быть представлен следующим выражением:

$$T \lg \gamma_2 = b_1 N_1^2 + b_2 N_1^3 + b_3 N_1^4 + \dots \quad (8)$$

Значения  $T \lg \gamma_2$  рассчитаны из диаграммы состояния системы Na—Cs [9] с использованием теплот смешения, найденных в [8]. Зависимость  $T \lg \gamma_2$  от концентрации аппроксимируется уравнением

$$T \lg \gamma_2 = 1197,7 N_1^2 - 4300,3 N_1^3 + 8223,5 N_1^4 - 8210 N_1^5 + 3200 N_1^6,$$

$N_1$  — атомная доля цезия. Рассчитанные этим методом значения  $d \ln a / d \ln N_i$  для системы Na—Cs представлены в табл. 4.

Величины эффективных зарядов в системе Cs—K и Na—Cs, рассчитанные по уравнениям (4) и (5), представлены в табл. 5 и 6.

Таблица 5

Эффективные заряды в системе Cs—K при 110° C

N обр.	$N_{Cs}$	$z_K^*$	$z_{Cs}^*$	N обр.	$N_{Cs}$	$z_K^*$	$z_{Cs}^*$
1	0,03	0,09	-2,87	13	0,73	-0,595	0,22
2	0,03	0,07	-2,22	14	0,80	-0,775	0,195
3	0,035	0,09	-2,55	15	0,80	-0,920	0,23
4	0,17	0,27	-1,32	16	0,85	-1,2	0,21
5	0,18	0,29	-1,31	17	0,85	-1,7	0,30
6	0,20	0,21	-0,84	18	0,875	-1,93	0,28
7	0,23	0,31	-1,04	19	0,88	-1,63	0,22
8	0,29	0,31	-0,75	20	0,90	-1,56	0,17
9	0,43	0,295	-0,39	21	0,96	-2,16	0,09
10	0,64	-0,345	0,19	22	0,97	-2,56	0,08
11	0,66	-0,28	0,15	23	0,994	-2,71	0,02
12	0,73	-0,555	0,205				

## Эффективные заряды в системе Na — Cs при 110° С

№ обр.	$N_{Na}$	$z_{Cs}^*$	$z_{Na}^*$	№ обр.	$N_{Na}$	$z_{Cs}^*$	$z_K^*$
1	0,014	0,11	-7,86	14	0,62	-0,23	0,14
2	0,025	0,14	-5,50	15	0,62	-0,26	0,16
3	0,04	0,16	-3,89	16	0,74	-0,48	0,17
4	0,06	0,205	-3,05	17	0,77	-0,58	0,17
5	0,15	0,33	-1,89	18	0,77	-0,86	0,26
6	0,20	0,43	-1,78	19	0,82	-0,66	0,145
7	0,22	0,37	-1,32	20	0,90	-2,15	0,24
8	0,275	0,29	-0,77	21	0,90	-1,45	0,16
9	0,30	0,30	-0,71	22	0,97	-8,35	0,26
10	0,30	0,39	-0,91	23	0,97	-8,15	0,25
11	0,35	0,29	-0,53	24	0,985	-19,90	0,30
12	0,39	0,35	-0,55	25	0,997	-14,20	0,04
13	0,40	0,38	-0,57				

Как и в системе Na — K, в системах Cs — K и Na — Cs наблюдается инверсия электропереноса. В расплавах Cs — K точка инверсии соответствует ~55 ат. % Cs, а в расплавах Na — Cs ~ 50% Na. Примесь в обеих системах мигрирует к положительному электроду. Полученные значения эффективных зарядов довольно велики в разбавленных растворах, особенно в системе Na — Cs (эффективный заряд цезия в разбавленном растворе равен 20 единицам элементарного заряда). При переходе к более концентрированным растворам абсолютная величина эффективного заряда быстро падает. В системе Cs — K эффективные заряды не столь велики (около трех единиц элементарного заряда в разбавленных растворах калия в цезии). Здесь с увеличением концентрации абсолютная величина эффективного заряда уменьшается более плавно.

Положение точки инверсии в расплавах Na — K, Cs — K и Na — Cs не совпадает с составом максимума на кривых концентрационной зависимости электросопротивления. В работах [10, 11] положение точки инверсии определяется условием  $d\rho/dN_2 = 0$ . В работе [4] показано, что в общем случае это условие не должно выполняться. Наши данные подтверждают этот вывод.

**Обсуждение результатов.** Из полученных данных по электросопротивлению и электропереносу можно установить степень отклонения от модели свободных электронов для жидких калия, цезия и расплавов Cs — K, Na — Cs. Для расчета относительной плотности электронных состояний на уровне Ферми применяли метод, предложенный в работе [4]. Для монокристаллического раствора в том случае, когда импульс при рассеянии электронов проводимости передается отдельному атому, справедливо уравнение

$$\ln \frac{z_2 \rho V k_F^2 g^2}{\bar{z} \rho_2 V_2 (k_F^2 g^2)_2} = \int_0^{N_1} \frac{z_2^*}{\bar{z} N_1} dN_1, \quad (9)$$

где индекс 2 относится к свойствам второго компонента;  $g$  — параметр, определяемый уравнением (3);  $V$  — мольный объем;  $z_2$  — истинный заряд ионов в чистом втором компоненте;  $\bar{z}$  — средний заряд ионов раствора. Так же как и в работе [5], истинные заряды ионов компонентов (Na, Cs, K) принимаем равными единице. Тогда средний заряд  $\bar{z}$ , определяемый уравнением  $\bar{z} = z_1 N_1 + z_2 N_2$ , тоже равен единице. Мольные объемы сплавов рассчитывали по правилу аддитивности, мольные объемы чистых Na, Cs и K находили по данным работ А. Н. Соловьева и [12]. Из уравнения (9) может быть рассчитана величина  $\theta = k_F^2 g^2 / (k_F^2 g^2)_2$ , характеризую-

пная плотность электронных состояний на уровне Ферми для сплава любого состава относительно чистого второго компонента. Интеграл в правой части уравнения (9) вычисляли графически, определяя площадь под кривой  $z_2^*/zN_1 = f(N_1)$  (рис. 5, 6). Как и при расчете плотностей электронных состояний в расплавах Na — K, есть некоторая неясность в определении площади в области разбавленных растворов. Мы считали, что вклады от этих областей в интеграл, взятый в пределах от  $N_1 = 0$  до  $N_1 = 1$ , компенсируются.

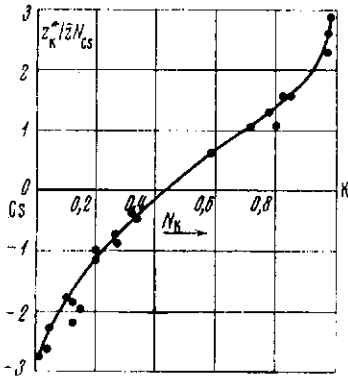


Рис. 5. Зависимость  $z_K^*/zN_{Cs}$  от состава в системе Cs — K при  $110^\circ\text{C}$

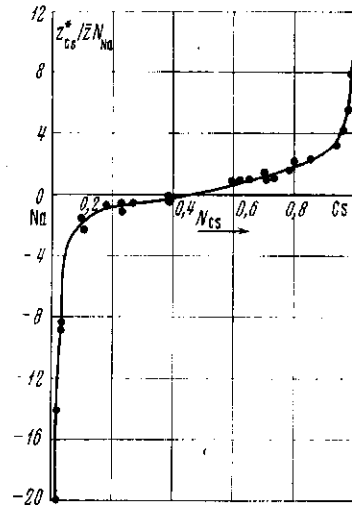


Рис. 6. Зависимость  $z_{Cs}^*/zN_{Na}$  от состава в системе Na — Cs при  $110^\circ\text{C}$

Расчитанные таким образом величины отношений  $\theta = k_F^2 g^2 / (k_F^2 g^2)_2$  для сплавов систем Cs — K и Na — Cs представлены в табл. 7.

Ошибка в вычислении интеграла, определяющая погрешность  $\theta$ , составляет в системе Cs — K  $\pm 0,04$ , в системе Na — Cs  $\pm 0,06$ .

Проверим взаимную согласованность результатов, полученных для систем Na — K, Cs — K и Na — Cs

$$\frac{(k_F g)_K^2 (k_F g)_{Na}^2 (k_F g)_{Cs}^2}{(k_F g)_{Na}^2 (k_F g)_{Cs}^2 (k_F g)_K^2} = 0,914 \pm 0,12$$

(величина  $(k_F g)_K / (k_F g)_{Na}$  взята из работы [5]). Мы видим, что отклонение этого произведения от единицы лежит в пределах ошибки эксперимента. Таким образом, схема расчета плотности электронных состояний на уровне Ферми по данным электропроводности и электропереноса [4] вполне пригодна для чистых натрия, калия, цезия и их расплавов.

Удовлетворительная спиваемость треугольника Na — K — Cs говорит о том, что эти металлы образуют моногенные растворы, по крайней мере, в большей части интервала составов, а истинные заряды ионов компонентов равны между собой. Кроме того, спиваемость означает, что при рассеянии электронов проводимости импульс передается, в основном, одиночным атомам, а не группам атомов. Если действительно в жидком натрии доминирует плазменное рассеяние [1], то, очевидно, и при плазменном рассеянии механизм передачи импульса такой же, как и при структурном рассеянии (по Займану).

На рис. 7, 8 представлены концентрационные зависимости  $\theta$  в системах Cs — K и Na — Cs, а также эти величины, вычисленные в модели свободных электронов по формуле

$$\theta_{мсэ} = \left[ \frac{k_F^2 g^2}{(k_F^2 g^2)^2} \right]_{мсэ} = \frac{k_F^2}{(k_F^2)^2} = \left( \frac{V_2}{V} \right)^{2/3} \quad (10)$$



(значения  $\theta_{\text{МСЭ}}$  приведены также в табл. 7). Поскольку в рамках статистики Ферми — Дирака величина  $k_F$  не зависит от формы кривой плотности электронных состояний, можно рассчитать отношение  $g/g_2$  [5]

$$g/g_2 = (\theta/\theta_{\text{МСЭ}})^{1/2}. \quad (11)$$

Полученные значения  $g/g_2$  приведены в табл. 7 и на рис. 7, 8.

Как видно из рассчитанных данных, отклонения от модели свободных электронов, в системах Cs — K и Na — Cs значительны. Чистые калий и цезий не подчиняются модели свободных электронов, если даже предположить, что натрий хорошо описывается этой моделью. Плотность электрон-

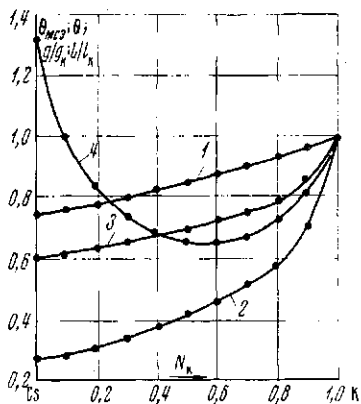


Рис. 7

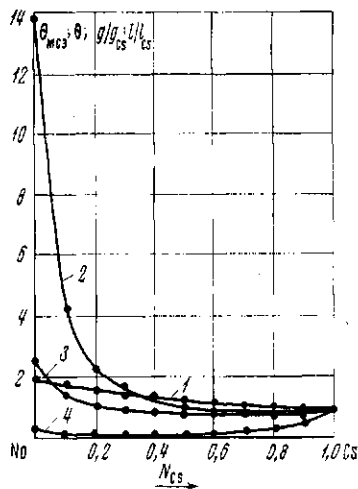


Рис. 8

Рис. 7. Плотность электронных состояний и длина свободного пробега ферми-электронов в расплавах Cs — K при 110° C:

$$1 - \theta_{\text{МСЭ}} = [k_F^2 g^2 / (k_F^2 g^2)_{\text{K}}]_{\text{МСЭ}}; 2 - \theta = k_F^2 g^2 / (k_F^2 g^2)_{\text{K}}; 3 - g/g_{\text{K}}; 4 - l/l_{\text{K}}$$

Рис. 8. Плотности электронных состояний и длина свободного пробега ферми-электронов в расплавах Na — Cs при 110° C:

$$1 - \theta_{\text{МСЭ}} = [k_F^2 g^2 / (k_F^2 g^2)_{\text{Cs}}]_{\text{МСЭ}}; 2 - \theta = k_F^2 g^2 / (k_F^2 g^2)_{\text{Cs}}; 3 - g/g_{\text{Cs}}; 4 - l/l_{\text{Cs}}$$

ных состояний, как и следовало ожидать, уменьшается от натрия к цезию:  $g_{\text{Na}}:g_{\text{K}}:g_{\text{Cs}} \cong 1:0,61:0,39$ .

Из уравнения (2) может быть рассчитана длина свободного пробега ферми-электрона по отношению ко второму компоненту

$$\frac{l}{l_2} = \frac{\rho_2}{\rho} \frac{1}{\theta}. \quad (12)$$

Результаты расчетов  $l/l_2$  представлены в табл. 7 и на рис. 7, 8. Интересно, что длина свободного пробега при переходе от натрия к калию и далее к цезию не уменьшается, а наоборот, возрастает  $l_{\text{Na}}:l_{\text{K}}:l_{\text{Cs}} = 1:2,5:3,3$ , хотя удельное электросопротивление жидкого натрия минимально. Это кажущееся несоответствие объясняется в рамках теории Мотта. Поскольку  $l = l_z / g^2$ , то с уменьшением плотности состояний фактическая длина свободного пробега электрона возрастает, несмотря на некоторое уменьшение займановской длины свободного пробега  $l_z$ .

Наши выводы находятся в качественном согласии с выводами теоретических работ [13, 14], в которых показано, что жидкие щелочные металлы отклоняются от модели свободных электронов. Это отклонение возра-

Таблица 7

Плотность электронных состояний и длина свободного пробега ферми-электронов в расплавах Cs — K и Na — Cs при 110°С

$N_1$	$\rho$ , $\mu\text{ком}\cdot\text{см}$	$V$ , $\text{см}^3/\text{г}\cdot\text{ат}$	$\theta = \frac{k_F^2 g^2}{(k_F^2 g^2)_2}$	$\theta_{\text{МСЭ}} = \frac{k_F^2}{(k_F^2)_2}$	$\lambda/\lambda_2$	$l/l_2$
Cs — K (1-й компонент — Cs)						
0	17,35	47,9	1	1	1	1
0,1	30,0	50,51	0,705	0,964	0,85	0,82
0,2	40,5	53,12	0,585	0,934	0,79	0,73
0,3	48,5	55,73	0,525	0,904	0,76	0,68
0,4	53,5	58,34	0,478	0,876	0,74	0,65
0,5	61,0	60,95	0,425	0,850	0,71	0,67
0,6	65,0	63,56	0,391	0,830	0,69	0,68
0,7	67,0	66,17	0,349	0,805	0,66	0,74
0,8	65,5	68,78	0,312	0,785	0,63	0,85
0,9	57,0	71,31	0,298	0,770	0,62	1,02
1,0	46,6	74,0	0,279	0,749	0,61	1,33
Na — Cs (1-й компонент — Na)						
0	46,6	74,0	1	1	1	1
0,1	96,0	70,1	0,835	1,04	0,89	0,58
0,2	135,0	64,2	0,825	1,10	0,87	0,42
0,3	167,0	59,2	0,840	1,16	0,85	0,33
0,4	177,5	54,3	0,935	1,23	0,87	0,28
0,5	169,5	49,4	1,100	1,31	0,92	0,25
0,5	151,0	43,7	1,370	1,42	0,98	0,22
0,7	127,0	39,6	1,720	1,52	1,06	0,21
0,8	99,0	34,6	2,340	1,66	1,12	0,20
0,9	55,0	29,7	4,350	1,84	1,54	0,19
1,0	10,1	21,8	13,800	2,08	2,58	0,33

стает от натрия к цезию. О количественном согласии наших данных и расчетов работ [13, 14] судить трудно, так как рассчитанные по данным [13, 14] плотности состояний на уровне Ферми жидких Na, K, Rb, Cs сильно зависят от того, какая выбирается форма зависимости энергии электрона от волнового вектора — квадратичная или биквадратная.

Московский институт  
стали и сплавов

Поступила в редакцию  
15 II 1971

#### ЛИТЕРАТУРА

1. J. M. Ziman. Phil. Mag., 6, 1013, 1961.
2. Н. Мотт. Электроны в неупорядоченных структурах. «Мир», 1969.
3. G. A. Thomas. Proc. Phys. Soc., 86, 277, 1965.
4. Д. К. Белащенко, Ю. И. Гущина. Физика металлов и металловедение, 30, 295, 1970.
5. Л. И. Аксенова, Д. К. Белащенко. Теплофизика высоких температур, 9, № 4, 1971.
6. J. D. Verhoeven, E. E. Huske. Trans. Met. Soc. AIME, 227, 1165, 1963.
7. Д. К. Белащенко. Заводск. лабор., 4, 435, 1970.
8. T. Yokokawa, O. Kierra. J. Chem. Phys., 40, 46, 1964.
9. М. Хансен, К. Андерко. Структуры двойных сплавов, 2. Металлургиздат, 1962.
10. Е. И. Харьков. Укр. физ. ж., 11, 677, 1966.
11. А. З. Жмудский и др. Физика металлов и металловедение, 23, 559, 1967.
12. R. N. Lyon. Liquid Metals Handbook, 1952.
13. J. R. Christman, H. B. Huntington. Phys. Rev., 139, A83, 1965.
14. J. R. Christman. Phys. Rev., 153, 217, 1967.