

ОБЩАЯ И ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

К. А. Костанян, К. С. Саакян и О. К. Геокчян

**Плотность и электропроводность натрий-кальций-
магний-алюмосиликатных стекол
в расплавленном состоянии**

Плотность и электропроводность, являясь важнейшими физико-химическими характеристиками расплавленных силикатов, имеют большое практическое значение в технологии стекла.

Как показывают исследования проводимости расплавленных щелочных стекол, их удельная электропроводность определяется прежде всего концентрацией щелочного иона в единице объема стекла [1]. С этой точки зрения исследование плотности и электропроводности расплавленных натрий-кальций-магний-алюмосиликатных стекол представляет большой практический и теоретический интерес.

Для исследования были сварены три группы стекол: натрий-кальций-силикатные, натрий-кальций-алюмосиликатные и натрий-кальций-магний-алюмосиликатные. Следует отметить, что для последних двух групп стекол число первоначально намеченных составов было значительно больше, чем это приведено в таблице 1; однако по ходу измерения проводимости стекол, исходя из полученных результатов, число исследуемых стекол было сокращено.

Натрий-кальций-силикатные стекла (стекла №№ 1—13, табл. 1) являются основой для натрий-кальций-алюмосиликатных и натрий-кальций-магний-алюмосиликатных стекол, поэтому для выявления основных закономерностей зависимости электропроводности и плотности этих стекол от состава в них была произведена полная взаимная замена всех окислов. В случае же натрий-кальций-алюмосиликатных и натрий-кальций-магний-алюмосиликатных стекол проверялись лишь основные закономерности, полученные в первой группе стекол.

Стекла варились из химически чистых и чистых материалов—углекислых солей магния, кальция и натрия, окиси алюминия. В качестве кремнезема применялся промытый люберецкий песок. Варка производилась в кварцевых и шамотных литровых тиглях в пламенной печи, отапливаемой керосином. Как показали анализы сваренных стекол, отклонения содержаний отдельных окислов от указанных в таблице 1 не превышали 0,5%, что незначительно влияло на результаты измерений.



Методика измерения удельной электропроводности расплавленного стекла приведена в работе [2]. В таблице 2 приведены значения коэффициентов А и В экспоненциального уравнения:

$$\lg \chi = A - \frac{B}{T} \quad (1)$$

и значения коэффициентов а, b и с уравнения:

$$\lg \chi = a + bT + cT^2 \quad (2)$$

для исследованных стекол. Оба эти уравнения дают хорошую сходимость ($\pm 4^0/0$) с экспериментальными данными.

Таблица 1
Составы стекол

№№ стекол	Компоненты стекла в %				
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O
1	57,0	—	14,0	—	29,0
2	62,0	—	14,0	—	24,0
3	67,0	—	14,0	—	19,0
4	71,0	—	14,0	—	15,0
5	61,0	—	10,0	—	29,0
6	66,0	—	10,0	—	24,0
7	71,0	—	10,0	—	19,0
8	75,0	—	10,0	—	15,0
9	66,0	—	5,0	—	29,0
10	71,0	—	5,0	—	24,0
11	76,0	—	5,0	—	19,0
12	80,0	—	5,0	—	15,0
13	75,0	—	14,0	—	11,0
14	76,0	—	9,0	—	15,0
15	71,0	5,0	9,0	—	15,0
16	68,0	8,0	9,0	—	15,0
17	65,0	11,0	9,0	—	15,0
18	71,0	5,0	11,0	—	13,0
19	62,0	11,0	9,0	—	18,0
20	68,0	11,0	6,0	—	15,0
21	68,0	5,0	9,0	—	18,0
22	75,0	5,0	6,0	3,0	11,0
23	68,0	5,0	5,0	2,0	20,0
24	70,0	4,0	9,0	2,0	15,0
25	68,0	5,0	4,0	3,0	18,0
26	68,0	5,0	6,0	5,0	18,0
27	64,0	11,0	3,0	7,0	15,0
28	71,0	—	9,0	5,0	15,0

Таблица 2
Значения постоянных А и В уравнения (1) и постоянных а, b и с уравнения (2) для исследованных стекол

№№ стекол	А	В	уравнения (2)		
			а	b × 10 ⁻⁴	c × 10 ⁻⁸
1	0,73	1426	-1,417	10,0	-138,0
2	1,13	2207	-5,609	60,0	-1702,0
3	1,40	2811	-5,415	54,0	-1370,0
4	1,285	3045	-8,144	84,0	-2293,0
5	0,73	1426	-1,417	10,0	-138,0
6	1,12	2078	-5,953	66,0	-1896,0
7	1,165	2458	-4,881	48,0	-1241,0
8	1,125	2813	-5,741	55,0	-1429,0
9	0,61	1312	-2,193	21,0	-517,0
10	1,045	1979	-3,072	28,0	-640,0
11	0,975	1196	-5,2655	54,0	-1464,0
12	1,385	3266	-7,059	69,0	-1814,0
13	1,45	3662	-16,6567	90,0	-5690,0
14	1,37	3186,0	-5,344	47,328	-1108,7
15	1,228	2966,1	-4,9325	42,279	-959,6
16	1,20	2898,5	-4,56996	37,62	-806,67
17	1,21	2901,6	-4,79477	41,23	-941,4
18	1,43	3487,8	-6,08637	54,109	-1299,8
19	1,35	2866,2	-4,7947	44,13	-1057,7
20	1,19	2793,4	-5,2324	48,69	-1216,1
21	1,34	2845,0	-5,897	58,73	-1536,9
22	1,23	3351,4	-5,764	49,21	-1162,7
23	1,12	2304,5	-3,391	29,73	-660,96
24	1,278	3086,9	-5,181	45,23	-1063,0
25	1,248	2608,9	-4,418	38,22	-859,88
26	1,34	2822,6	-4,580	41,933	-1006,1
27	1,015	2615,9	-3,562	24,92	-402,30
28	1,31	3333,3	-7,129	67,81	-1756,0

Измерение плотности расплавленных силикатных стекол сопряжено с большими трудностями. Метод погружающегося шарика не дает воспроизводимых данных из-за высокой вязкости расплавов этих стекол, а измерение плотности в расплавленной соли [3] затруднено из-за ее взаимодействия со стеклом. В последнем случае в качестве расплавленной соли наилучшими следует признать хлориды щелочных металлов, однако последние выше температуры их плавления подвергаются сильному испарению, что зачастую делает измерение невозможным. Несмотря на это, последний метод дает более надежные

данные, хотя и значительно снижается верхний температурный предел измерения из-за испарения соли. В наших измерениях в качестве соли был использован хлористый натрий (марки хч), плотность которого в расплавленном состоянии была взята из литературы [4]. Соль расплавлялась в корундовом тигле, а для расплавленного стекла брался платиновый тигель емкостью 10 мл. Измерения обычно велись до 1100°C, а для некоторых стекол до 1350°. Следует отметить, что стекла с высоким содержанием щелочей заметно взаимодействуют с расплавленными хлоридами, а поэтому измерение их плотности не производилось.

Имеющиеся в литературе немногочисленные данные по плотности расплавленных стекол разноречивы. Так, например, данные по плотности расплавленных натрий-силикатных стекол практически одного и того же состава у разных исследователей имеют небольшое расхождение, не превышающее 3,0%; вместе с тем изменение плотности этих стекол в исследованной области составов (Na_2O от 20 до 50%) также составляет 3,0%, а изменение плотности этих стекол в зависимости от температуры (от 1000° до 1400°) лишь немного выше 3,0% [5]. Необходимо отметить также, что закономерности по зависимости изменения плотности от состава для натрий-силикатных стекол, по данным различных исследователей, также отличаются: в одном случае окись натрия приводит к повышению плотности расплавленных натрий-силикатных стекол, а в другом — к понижению [5]. В литературе нет единого мнения также о температурном ходе изменения плотности стекол в широком интервале: от комнатной температуры до температуры расплавленного состояния стекла. На рисунке 1 показано изменение плотности в широком температурном интервале для двух стекол, очень близких по составу, по данным Марининой (рис. 1—1) и нашим данным (рис. 1—2). Состав стекла Марининой [6]: SiO_2 —73,25; CaO —10,24; Na_2O —15,21 и R_2O_3 —0,47% — близок к составу стекла 8 (табл. 1). Для стекла 8 данные по плотности до 400° нами рассчитывались по аддитивным формулам коэффициента расширения и плотности при 25° [7]. Как видно из рисунка, данные по плотности расплавленных стекол отличаются не только по величине, но и по температурному коэффициенту и, что самое главное, в широком температурном интервале ход изменения плотности по обоим данным совершенно различен. По данным Марининой, в широком температурном интервале плотность стекла представлена двумя прямыми — высокотемпературной и низкотемпературной; в температурной области 500—800° имеет место плавный переход от низкотемпературной прямой к высокотемпературной с довольно тупым изгибом. По нашим же данным, переход от низкотемпературной прямой к высокотемпературной (проведенный пунктиром) происходит сложным перегибом. Нетрудно заметить, что основным моментом, определяющим общий ход плотности в широком температурном интервале, является положение высокотемпературной прямой плотности и в особенности коэффициента расши-

рения расплавленного стекла. При больших значениях этой величины возможен такой температурный ход изменения плотности, какой имеет место у Марининой (рис. 1—1). Коэффициент удельного объемного расширения стекла Марининой составляет 200×10^{-6} , в то время как, по нашим данным, для стекла 8 коэффициент объемного расширения значительно ниже— 58×10^{-6} . Здесь и в дальнейшем коэффициент удельного объемного расширения β нами рассчитан по формуле:

$$\beta = \frac{d_0 - d_t}{d_t \Delta t} \quad (3)$$

где d_0 и d_t — плотности соответственно при низкой и высокой температурах, а Δt — разность этих температур. Рассчитанное по формуле

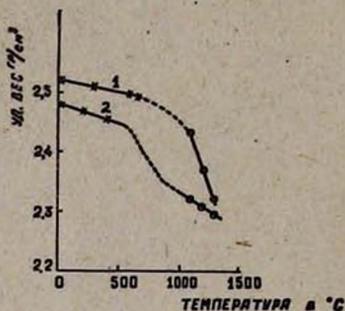


Рис. 1. Кривые изменения плотности натрий-известкового стекла в широком температурном интервале по данным Марининой (1) и по нашим данным (2).

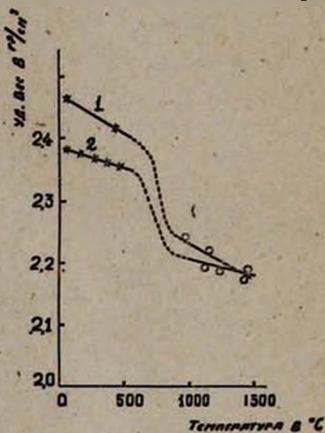
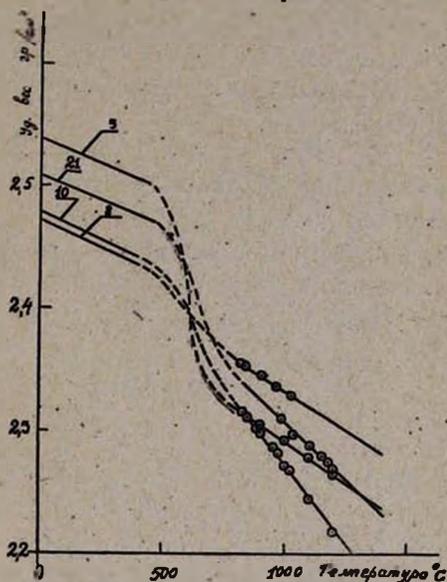


Рис. 2. Кривые изменения плотности натрий-силикатных стекол в широком температурном интервале: 1—50% Na_2O и 2—20% Na_2O .

(3) значение β для натрий-силикатного стекла с 20%-ным содержанием Na_2O равно $27,4 \times 10^{-6}$, по данным Шартсиса и других; $56,4 \times 10^{-6}$, по данным Американского бюро стандартов; $43,1 \times 10^{-6}$, по данным Гейдкамп и Энделя [5]. Сравнение приведенных данных показывает, что полученное нами значение коэффициента удельного объемного расширения не является заниженным. Наоборот, приведенное сравнение говорит о завышенных значениях коэффициента у Марининой, что, как указывалось выше, является причиной изменения общего температурного хода плотности в широком температурном интервале (рис. 1—1). На рисунке 2 приведены кривые температурной зависимости плотности в широком температурном интервале для двух натрий-силикатных стекол. Данные по плотности этих стекол в расплавленном состоянии взяты из работы Шартсиса и сотрудников [5], а низкотемпературные данные рассчитаны по аддитивной формуле плотности и коэффициента линейного расширения. Как видно из приведенных данных, соединение

высокотемпературной и низкотемпературной прямых в общую кривую (пунктирная линия) в обоих случаях дает кривую, сходную с полученной нами. Аналогичный ход кривой температурной зависимости стекол в широком температурном интервале получен рядом исследователей [36, 8]. На рисунке 3 показана температурная зависимость плотности некоторых из полученных нами стекол в широком температурном интервале. Данные по плотности этих стекол в твердом состоянии также рассчитаны по аддитивным формулам плотности и линейного расширения.

Для значения коэффициента объемного расширения исследованных стекол в расплавленном состоянии решающую роль играет содержание окиси натрия в них. Сопоставление значений коэффициентов удельного объемного расширения исследованных стекол в зависимости от содержания в них Na_2O показывает наличие корреляционной связи между содержанием Na_2O в стекле и его коэффициентом объемного расширения. С другой стороны, полученные данные говорят о весьма сложной зависимости



а для расплавленных натрий-кальций-силикатных стекол:

$$d_t = \frac{2,2 + 0,0343e^{0,094x}}{1 + \frac{(t - 1200)}{49,35 - 1,755y} \cdot 10^{-3}} \quad (5)$$

где x — содержание CaO в стекле в весовых процентах, а y — содержание Na_2O . С помощью формул (4) и (5) можно с удовлетворительной точностью ($\pm 3\%$ в среднем) рассчитать плотности натрий-кальций-магний-алюмосиликатных стекол в температурной области 1000 — 1400° .

Обсуждение результатов исследования электропроводности натрий-кальций-силикатных стекол приведено в работе [2]; здесь мы остановимся лишь на данных для четырех- и пятикомпонентных стекол. На рисунках 4—6 приведены изотермы логарифмов удельной электропроводности натрий-кальций-алюмосиликатных и натрий-кальций-магний-алюмосиликатных стекол в зависимости от содержания окислов

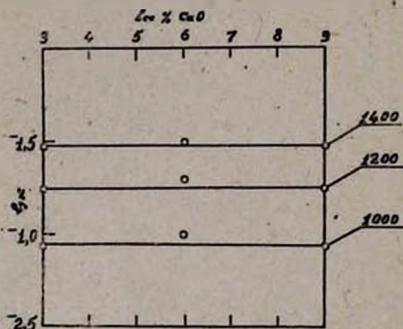


Рис. 4. Изотермы $\lg \chi$ при изменении содержания окиси кальция в исследованных стеклах при постоянном содержании окиси натрия.

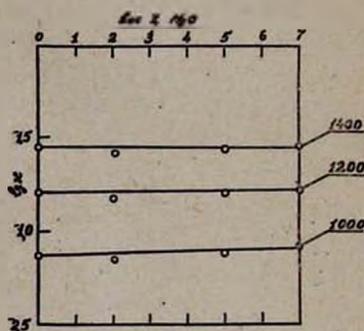


Рис. 5. Изотермы $\lg \chi$ при изменении содержания окиси магния в исследованных стеклах при постоянном содержании окиси натрия.

кальция (рис. 4), магния (рис. 5) и алюминия (рис. 6) при постоянном содержании окиси натрия. Как видно из этих рисунков, изотермы логарифмов удельных электропроводностей идут почти параллельно оси абсцисс. Это значит, что введение этих окислов в состав стекла, при постоянном содержании окиси натрия в последнем, практически не приводит к изменению их проводимости. В литературе имеется указание Бореля [9] о том, что введение свыше 1% глинозема в состав стекла вызывает изменение электропроводности вследствие изменения вязкости. Как видно из рисунка 6, введение даже до 11% глинозема в состав исследованных стекол при температурах выше 1000° не оказывает практического влияния на проводимость этих стекол, несмотря на то, что при этом происходит увеличение вязкости расплава.

На рисунке 7 приведены изотермы удельных сопротивлений исследованных стекол в зависимости от содержания в них окиси натрия; при этом разброс всех значений удельных сопротивлений для стекол,

содержащих 13, 15 и 18% окиси натрия, показан в виде линий. На рисунке 7 крестиками обозначены данные по удельному сопротивлению некоторых натрий-кальций-силикатных стекол, которые лежат на приведенных изотермах. Таким образом, как в трехкомпонентном натрий-

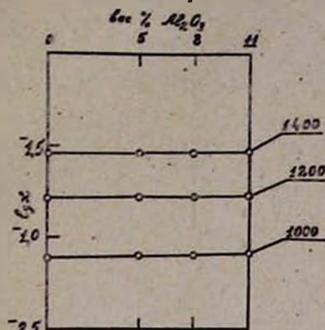


Рис. 6. Изотермы $\lg \chi$ при изменении содержания окиси алюминия в исследованных стеклах при постоянном содержании окиси натрия.

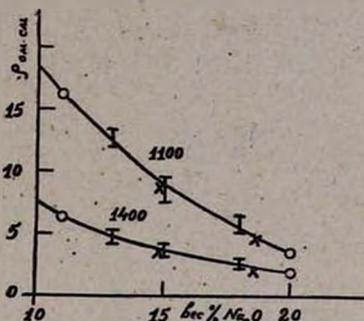


Рис. 7. Изотермы удельного сопротивления исследованных стекол в зависимости от содержания окиси натрия.

рий-кальций-силикатном, так и в натрий-кальций-магний-алюмосиликатном стеклах основным компонентом, определяющим их проводимость, является окись натрия. Это обстоятельство дает возможность при расчете удельной электропроводности расплавленных натрий-кальций-магний-алюмосиликатных стекол применить формулу, ранее предложенную для натрий-кальций-силикатных стекол [2]:

$$\lg \chi = 1,508 - 0,0204C - \frac{4836 - 128C}{T} \quad (6)$$

где C — содержание окиси натрия в стекле в весовых процентах, а T — абсолютная температура. Формулу (6) можно рекомендовать для натрий-кальций-магний-алюмосиликатных стекол следующих составов: 12—20% Na_2O ; 0—11% CaO ; 0—6% MgO ; 0—11% Al_2O_3 ; 68—78% SiO_2 в температурной области 1100—1450°.

Для более строгого подхода к выявлению связи между проводимостью расплавленных стекол и составом необходимо исходить не из процентного состава стекла, а из концентрации электропроводящего иона Na^+ . Однако т. к. в исследованной области составов относительное изменение плотности расплавленных стекол небольшое, то замена концентрации щелочных ионов на процентное содержание щелочного окисла приводит к ошибкам, не превышающим ошибок опыта.

Среди исследователей электропроводности расплавленных стекол Шелудяков первым при расчете удельной электропроводности исходил из концентрации щелочных ионов [10]. Формула Шелудякова имеет следующий вид:

$$\chi = 0,268 \cdot C \cdot N \quad (7)$$

где C — z /экв. в 1 см^3 стекла, а N рассчитывается из следующего соотношения:

$$\ln N = \frac{\ln T - T_g}{0,2} \quad (7)$$

где T — температура. Расчетные данные по формуле (7) (по данным Шелудякова, табл. 3) могут расходиться с экспериментальными до 30

Таблица 3

Результаты сравнения опытных и расчетных данных (Шелудяков)

Т. в °С	χ эксп. $\text{ом}^{-1} \text{см}^{-1}$ (Шелудяков)	χ выч. $\text{ом}^{-1} \text{см}^{-1}$ (7)	Погрешность в %	Т. в °С	χ эксп. $\text{ом}^{-1} \text{см}^{-1}$ (Шелудяков)	χ выч. $\text{ом}^{-1} \text{см}^{-1}$ (7)	Погрешность в %
1000	0,096	0,067	—30,2	1000	0,062	0,056	—9,6
1100	0,132	0,109	—17,4	1100	0,093	0,093	0,0
1200	0,171	0,163	—4,7	1200	0,133	0,143	+8,00
1300	0,213	0,246	+15,7	1300	0,161	0,214	+33,0

и более процентов, в особенности при высоких температурах (1400—1450°). В таблице 4 приведены наши опытные и вычисленные по формуле (6) данные. Как видно из таблицы, максимальное отклонение составляет лишь 12%.

Таблица 4

Результаты сравнения опытных и расчетных данных (наши данные)

Т. в °С	χ эксп. $\text{ом}^{-1} \text{см}^{-1}$	χ выч. $\text{ом}^{-1} \text{см}^{-1}$ (6)	Погрешность в %	Т. в °С	χ эксп. $\text{ом}^{-1} \text{см}^{-1}$	χ выч. $\text{ом}^{-1} \text{см}^{-1}$ (6)	Погрешность в %
1100	0,106	0,119	+12,2	1100	0,286	0,277	—3,15
1200	0,150	0,167	+11,3	1200	0,358	0,358	0,0
1300	0,205	0,223	+8,8	1300	0,450	0,450	0,0
1400	0,257	0,287	+11,7	1400	0,540	0,540	0,0

Таким образом, принятое в основу формулы (6) положение о преимущественной зависимости проводимости исследованных стекол от содержания в них окиси натрия дает возможность легко рассчитать электропроводность этих стекол в расплавленном состоянии.

Вышеуказанный характер зависимости между составом исследованных стекол и проводимостью можно легко объяснить, исходя из современных представлений о строении силикатных стекол и их расплавов. Можно полагать, что структура исследованных стекол представляет собой неправильный кремнекислородный каркас, построенный из тетраэдров SiO_4 и дюртогрупп Si_2O_7 . Последние, как известно из строения кристаллических силикатов, возникают благодаря наличию в силикатах катионов с крупными размерами, какими в нашем случае являются ионы Na^+ и Ca^{++} [11]. В построении каркаса исследованных

стекло принимают участие также и группы AlO_2 . Металлические катионы, окруженные кислородными ионами, находятся в отдельных участках этого каркаса. При переходе в расплавленное состояние замороженные ковалентные связи каркаса приобретают не только упругость, но и способность переключения, частота которого возрастает с ростом температуры. Среднестатистически во времени кремнекислородный каркас можно рассматривать как состоящий из сложных кремнекислородных малоподвижных анионов, в построении которых, как указывалось выше, вместе с тетраэдрами SiO_4 участвуют также и диортогруппы Si_2O_7 . В таком расплаве более подвижными являются металлические катионы, из которых самыми подвижными оказываются ионы натрия, наиболее слабо взаимодействующие с окружающими ионами кислорода. Двух- и трехвалентные ионы сравнительно сильнее взаимодействуют с кислородным окружением и поэтому менее подвижны. Механизм электропроводности исследованных стекол в расплавленном состоянии во многом похож на механизм электропроводности в твердом стекле, т. е. движение иона происходит перескоками из одной потенциальной ямы в другую. Однако повышенная подвижность щелочных ионов в расплавленных стеклах перекрывает поляризационные силы, действующие через кислородные ионы [12], чем и объясняется отсутствие влияния двух- и трехвалентных ионов на проводимость этих стекол в расплавленном состоянии. С другой стороны, следует полагать, что в расплавленных стеклах по сравнению с твердыми имеет место увеличение числа переноса двухвалентных ионов. Однако в исследованной области составов стекол—с повышенным содержанием щелочей и сравнительно невысоким содержанием двухвалентных окислов—числа переноса двухвалентных ионов все еще невысокие [13]. С понижением содержания щелочных ионов и повышением двухвалентных доля участия последних в переносе электричества будет увеличиваться.

Таблица 5^а

Значения некоторых энергетических величин для натрий-кальций-силикатных стекол (1300°)

№ стекла	Na_2O в вес. %	Уд. вес в г/см ³	[M] · 100 в моль/мл	$\rho_{\text{Э}}$	$V_{\text{Ф}}$ в ккал/моль	ΔH^{\ddagger} в ккал/моль	Λ в ом ⁻¹ · см ⁻²	ΔS^{\ddagger} в ккал/моль	ΔZ^{\ddagger} в ккал/моль
2	23,56	2,305	17,518	2,89	20,2	10,1	30,88	-4,81	17,65
3	18,66	2,318	13,953	3,26	25,7	12,85	31,38	-3,03	17,60
8	14,87	2,295	11,009	3,08	25,7	12,85	20,37	-3,89	18,97
10	23,76	2,203	16,885	2,82	18,1	9,05	37,02	-5,11	17,08
11	18,85	2,252	13,694	2,84	10,9	5,47	28,31	-7,92	17,90

Исследование электропроводности простых силикатов показало, что по значению теплоты активации катионы можно разделить на три группы [14]. Первая группа—щелочные катионы характеризуется сравнительно низким значением теплоты активации ΔZ^{\ddagger} , которая для нат-

рий-силикатных стекол, например, лежит в пределах 14—17 ккал/моль [15]. Вторая и третья группы катионов характеризуются более высокими значениями ΔZ^+ — 35—50 ккал/моль [14].

В таблице 5 приведены значения некоторых энергетических величин натрий-кальций-силикатных стекол при 1300°. Из этой таблицы видно, что значения ΔH^+ для указанных стекол лежат в пределах 6—13 ккал/моль, что говорит о преимущественной зависимости их проводимости от движения щелочного иона. Как видно из таблицы 5, энтропия активации исследованных стекол имеет отрицательное значение. Как было показано в работах [14, 15], отрицательные значения энтропии характерны для силикатных стекол, что в свою очередь приводит к снижению значений фактора подвижности—Рэ.

Научно-исследовательский институт химии
Государственного комитета цветных и
черных металлов при Госплане СССР

Поступило 29 XI 1963

Կ. Ա. Կօստանյան, Կ. Ս. Սահակյան և Օ. Դ. Գեօկչյան

ՆԱՏՐԻՈՒՄ-ԿԱԼՑԻՈՒՄ-ՄԱԳՆԵԶԻՈՒՄ-ԱԼՅՈՒՄԱՍԻԼԻԿԱՏԱՅԻՆ
ԱՊԱԿԻՆԵՐԻ ԽՏՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՎ ԷԼԵԿՏՐԱԶՆՈՐԴԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆԸ
ՀԱՎԱԾ ՎԻՃԱԿՈՒՄ

Ա մ ֆ ո ֆ ո լ մ

Հողվածում բերված են նատրիում-կալցիում-սիլիկատային և նատրիում-կալցիում-մագնեզիում-ալյումասիլիկատային ապակիների խտության և էլեկտրահաղորդականության չափման արդյունքները 850—1450°C ջերմաստիճանային ինտերվալում: Ցույց է տրված, որ ապակիների խտությանը ջերմաստիճանային կախման կորը ավելի բարդ ձևով է փոփոխվում անոմալ ինտերվալում, քան այն ենթադրվում է գրականության մեջ գոյություն ունեցող մի շարք աշխատանքներում: Հայն ջերմաստիճանային ինտերվալում ապակու խտության ջերմաստիճանային կախումն արտահայտվում է 2 և 3 նկարներում բերված կորերի միջոցով, որոնք կառուցված են մեր էքսպերիմենտալ տվյալների և գրականության տվյալների հիման վրա:

Ցույց է տրված, որ հալված վիճակում ապակիների խտության ջերմաստիճանային կախումն արտահայտվում է ուղիղ գծով, իսկ խտության մեծության վրա ամենից ավելի է ազդում կալցիումի օքսիդը, որը մեծացնում է ապակու խտությունը: Նատրիումի օքսիդը բերում է ապակու ծավալային ընդարձակման գործակցի մեծացմանը: Ստացված էքսպերիմենտալ տվյալների հիման վրա արտածվում է էմպիրիկ բանաձև հետազոտված ապակիների խտությունը հալված վիճակում հաշվելու համար (տես 4 և 5 բանաձևերը):

Էլեկտրահաղորդականության չափման տվյալները ցույց են տալիս, որ ինչպես նատրիում-կալցիում-սիլիկատային, այնպես էլ նատրիում-կալցիում-մագնեզիում-սիլիկատային ապակիների էլեկտրահաղորդականությունը որոշվում է ապակում եղած նատրիումի օքսիդի քանակով և կարող է հաշվվել (8) բանաձևի օգնությամբ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. К. А. Костянян, Изв. АН АрмССР, ХН 10, 237 (1957).
2. М. Г. Манвелян, А. Ф. Мелик-Ахназарян, К. А. Костянян, С. О. Налчаджян, Е. А. Ерзнкян, Электростеклоделикатное производство. Айпетрат, Ереван, 1962.
3. а. К. С. Евстропьев, Н. А. Торопов, Химия кремния и физическая химия силикатов. Промстройиздат, Москва—Ленинград, 1956; б. В. Эйтель, Физическая химия силикатов. ИЛ, Москва, 1962.
4. Справочник физических, химических и технических величин. Гостехиздат, Москва, 1935.
5. L. Shartsis, S. Spinner, W. Capps, J. Am. Ceram. Soc. 35, 155 (1952); там же данные Американского бюро стандартов; G. Heidkamp, K. Endel, Glastechn. Ber. 14, 89 (1936).
6. В. Т. Маринина, Влияние сульфата натрия на поверхностные свойства стекла. Гизлегпром, Москва, 1940.
7. Технология стекла (под ред. И. Китайгородского). Промстройиздат, Москва, 1961.
8. Справочник по производству стекла. Промстройиздат, Москва, 1963.
9. E. Borel, J. Soc. Glass. Technol. 38, 238 (1952).
10. Н. А. Шелудяков, Труды ВНИИС 33, 70 (1953).
11. Н. В. Белов, Кристаллохимия силикатов с крупными катионами. АН СССР, Москва, 1961.
12. О. В. Мазурин, Электрические свойства стекла. ЛТИ, Ленинград, 1962.
13. В. И. Малкин, В. В. Подкидышев, ЖФХ 34, 805 (1960).
14. J. O'M. Bockris, J. A. Kitchener, S. Ignatowicz, J. M. Tomlinson, Trans. Farad. Soc. 48, 75 (1952).
15. К. А. Костянян, Изв. АН АрмССР, ХН 18, 3 (1963).