

УДК 544.232

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ВЯЗКОСТИ И ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ ВЯЗКОГО ТЕЧЕНИЯ ЛИТИЕВОБОРАТНЫХ РАСПЛАВОВ ОТ СОДЕРЖАНИЯ ОКСИДА ЛИТИЯ

© 2022 г. А. А. Хохряков<sup>1</sup>, С. Ю. Мельчаков<sup>1</sup>, М. А. Самойлова<sup>1</sup> \*, В. В. Рябов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт металлургии УрО Российской академии наук, ул. Амундсена, 101, Екатеринбург, 620016 Россия

\*e-mail: mari.makarenko.1993@mail.ru

Поступила в редакцию 25.11.2021 г.

После доработки 03.02.2022 г.

Принята к публикации 10.02.2022 г.

Вязкость бинарных расплавов  $x\text{Li}_2\text{O}-(100-x)\text{B}_2\text{O}_3$ , в которых концентрация оксида лития менялась от 4.5 до 55.7 мол. %, была измерена от 1003 до 1630 К методом вибрационной вискозиметрии. С повышением температуры вязкость снижается. Температурная зависимость вязкости может быть разбита на низкотемпературную (1000–1300 К) и высокотемпературную (1300–1620 К) части. При постоянной температуре вязкость литиевоборатных расплавов в зависимости от состава меняется в пределах от 0.1 до 12.3 Па с, тогда как энергии активации вязкого течения меняются от 31.7 до 103.8 кДж/моль. Из конфигурационно-активационной модели вязкого течения рассчитаны конфигурационная энергия активации  $\epsilon_h$ , которая изменялась от 12 до 25.4 кДж/моль, и активационная энергия переключения мостиковых кислородных связей  $U_\infty$  – от 11.5 до 78.4 кДж/моль. Неаддитивное отклонение вязкости при последовательном увеличении содержания оксида лития в бинарном расплаве связано с изменением характера химической связи, формируемой разными соотношениями базовых единиц  $\text{BO}_3$ ,  $\text{BO}_4$ ,  $\text{BO}_2\text{O}^-$  в цепочечных и кольцевых группировках борокислородной сетки расплава.

**Ключевые слова:** литиевоборатный расплав, вязкость, энергия активации, конфигурационно-активационная модель, структура расплава

**DOI:** 10.31857/S0002337X22050050

### ВВЕДЕНИЕ

Литиевоборатные расплавы составляют основу многих электролитов, флюсов и шлаков, используемых в технологии получения металлов, сплавов, кристаллов и стекол. Разработка новых технологий с участием боратных расплавов требует знаний их физико-химических свойств.

Одним из структурно-чувствительных свойств расплавов является вязкость. Вязкость определяет скорость диффузии в расплавах, влияет на кинетику химических реакций и физико-химические процессы, протекающие при кристаллизации и стекловании расплавов. Исследованию вязкости расплавов  $\text{Li}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$  посвящено ограниченное количество научных статей. Шартсис с сотрудниками [1] исследовали вязкость литиевоборатных расплавов в интервале 773–1273 К для составов 2.5–28.8 мол. %  $\text{Li}_2\text{O}$ . Мусихин и Кудряшов изучали вязкость расплавов, содержащих 25 и 50 мол. % оксида лития, в интервале температур 1053–1536 К [2]. Они обнаружили отклонение от линейной зависимости на графике логарифма вязкости от обратной температуры для состава  $25\text{Li}_2\text{O}-75\text{B}_2\text{O}_3$ .

Причины нелинейности авторы не обсуждали. Ота и Сога [3] исследовали вязкость в интервале 959–1333 К для расплавов, содержащих 30–75 мол. %  $\text{Li}_2\text{O}$ . Лиу с соавторами исследовали вязкость шести составов стекол в интервале 16.7–28.6 мол. %  $\text{Li}_2\text{O}$  в температурном диапазоне 1093–1193 К [4]. Они показали, что у стекол, содержащих 22.2 мол. %  $\text{Li}_2\text{O}$ , наибольшая вязкость по сравнению с другими исследованными составами. Авторы объяснили это явление образованием большего отношения  $\text{BO}_4^-/\text{BO}_3$ . В работах [5, 6] приводятся данные по температурам стеклования и физическим свойствам стекол  $\text{Li}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$ .

По данным [1–4] в табл. 1 собраны сведения о вязкости литиевоборатных расплавов, а на рис. 1 приводится зависимость вязкости расплава от содержания оксида лития при 1173 К. Как видно из рис. 1, вязкость расплавов отличается у разных авторов, что, вероятно, связано с ограничениями и погрешностями методов ее определения.

Цель настоящей работы заключается в определении вязкости расплавов  $x\text{Li}_2\text{O}-(100-x)\text{B}_2\text{O}_3$  в

**Таблица 1.** Обзор литературных данных по вязкости расплавов  $x\text{Li}_2\text{O}-(100-x)\text{B}_2\text{O}_3$ 

Li <sub>2</sub> O, мол. %	<i>A</i>	<i>B</i>	Δ <i>T</i> , К	Источник
	lgη = <i>A</i> + <i>B</i> / <i>T</i> (Па с)			
2.5	-4.884	6271	776–1280	[1]
6.3	-5.856	7057	873–1263	[1]
9.9	-8.974	10372	767–1271	[1]
13.9	-9.651	11107	878–1170	[1]
16.7	-8.072	9496	1093–1193	[4]
16.8	-8.814	10308	972–1273	[1]
18.2	-8.807	10385	1093–1193	[4]
20.0	-10.114	11923	1093–1193	[4]
21.6	-12.290	14017	967–1073	[1]
22.2	-9.375	11136	1153–1193	[4]
25.0	-6.005	6818	1099–1250	[2]
	-4.040	4362	1250–1536	
	-15.944	18773	1173–1193	[4]
25.6	-8.459	9632	1074–1174	[1]
28.6	-0.561*		1193	[4]
28.8	-10.062	11379	1071–1170	[1]
30.0	-7.130	7642	1178–1298	[3]
40.0	-3.931	3421	1163–1276	[3]
45.0	-3.953	3295	1123–1281	[3]
50.0	-5.015	4700	1053–1333	[2]
	-3.897	3018	1122–1333	[3]
60.0	-5.016	4137	1041–1225	[3]
70.0	-1.527	166	959–1142	[3]
75.0	-2.801	1255	1069–1228	[3]

\* Значение логарифма вязкости при указанной температуре.

интервалах концентраций  $0 \leq x \leq 56$  мол. % Li<sub>2</sub>O и температур 960–1650 К в связи с отсутствием систематических данных в справочной литературе по этой проблеме.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Хорошо известно, что границы измерения вязкости зависят от применяемого метода измерения [7, 8]. Вязкость бинарных расплавов Li<sub>2</sub>O–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> измеряли на вискозиметре [9], работающем в режиме вынужденных колебаний. Конструкция вискозиметра, построенного в Институте металлургии УрО РАН, детально описана в работе [9]. Вискозиметр калибровали по эталонным жидкостям, использовали растворы глюкозы в тяжелой жидкости М-45 (ТУГХ № 150-59), применяемой

для выделения мономинеральных фракций. Расчет относительной погрешности измерений был также выполнен в работе [9].

Боратные смеси готовили из предварительно переплавленного оксида бора и карбоната лития (“х. ч.”). Смесь нагревали до 1600 К и выдерживали в течение 1 ч, затем расплав выливали на стальную плиту. Полученную стекловидную массу использовали для измерений вязкости.

Зависимость вязкости от температуры и состава расплава приведена на рис. 2, коэффициенты зависимости  $\lg \eta = f(1/T)$  – в табл. 2.

Из рис. 2 видно, что при увеличении содержания оксида лития в расплаве значения вязкости отклоняются от правила аддитивности. Наблюдаемая зависимость отражает изменение межчастичных взаимодействий вследствие образования

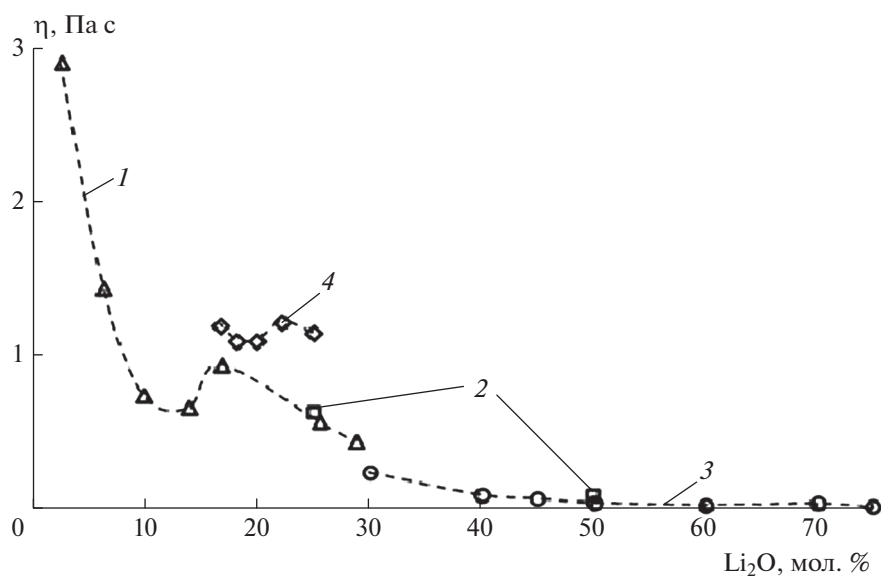


Рис. 1. Литературные данные по вязкости литиево-боратных расплавов при 1173 К: 1 – [1], 2 – [2], 3 – [3], 4 – [4].

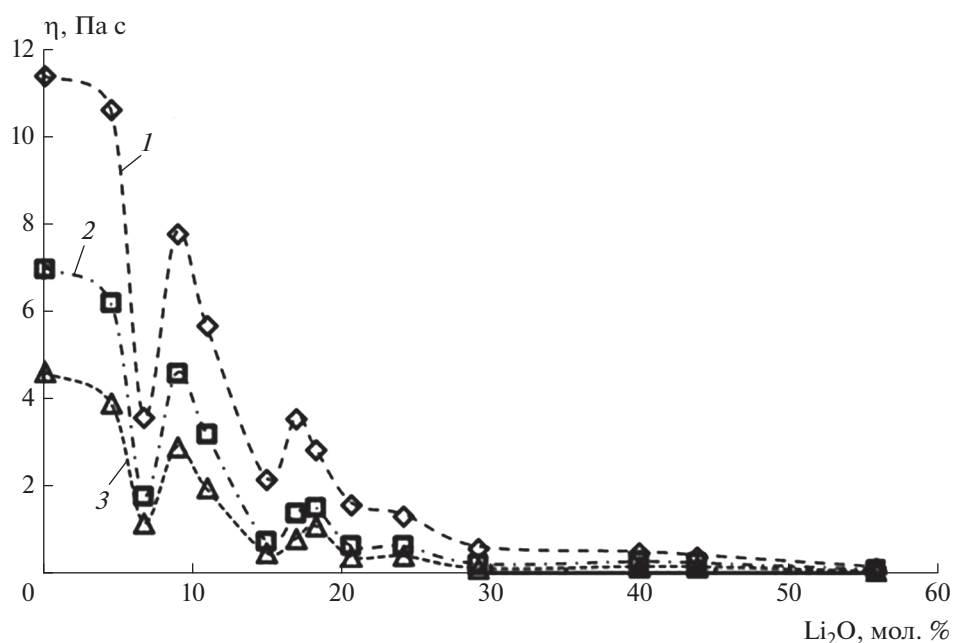


Рис. 2. Зависимости вязкости от состава расплава  $x\text{Li}_2\text{O}-(100-x)\text{B}_2\text{O}_3$  при 1173 (1), 1273 (2), 1373 К (3).

кольцевых и цепочечных группировок, формирующих мостиковые и немостиковые кислородные связи, соотношение между которыми зависит от состава расплава.

Вводимый в расплавленный  $\text{B}_2\text{O}_3$  оксид лития взаимодействует в первую очередь с более рыхлой частью сетки расплава, в которой ион лития занимает наибольшее количество вакансий. В результате в диапазоне 0–9 мол. %  $\text{Li}_2\text{O}$  в расплавах

формируется “субмикронеоднородная” структура, вытянутая в одном направлении, в окрестностях которой концентрируются ионы лития [10]. Эта “субмикронеоднородная” структура представляет собой цепочки из полиэдров  $\text{BO}_4^-$ , в которых связи  $\text{B}^{\text{IV}}-\text{O}-\text{B}^{\text{IV}}$  слабее по сравнению со связями  $\text{B}^{\text{III}}-\text{O}-\text{B}^{\text{III}}$  (IV – к. ч. атомов бора, O – мостиковый кислород). Это значительно облегчает сдвиги мостиковых атомов кислорода во

Таблица 2. Вязкость расплавов  $x\text{Li}_2\text{O}-(100-x)\text{B}_2\text{O}_3$ 

$\text{Li}_2\text{O}$ , мол. %	$A$	$B$	$\pm\Delta_A$	$\pm\Delta_B$	$\pm\lg \eta$	$\Delta T$ , К
	$\lg \eta = A + B/T$					
0	-1.657	3182	0.027	39	0.012	1173–1613
4.5	-1.975	3520	0.031	43	0.017	1148–1622
6.7	-3.36	4592	0.08	88	0.024	1035–1307
	-1.73	2459	0.09	128	0.022	1307–1605
8.9	-2.08	3485	0.11	133	0.028	1111–1373
	-1.34	2460	0.06	82	0.010	1373–1597
10.9	-2.45	3758	0.05	62	0.018	1062–1381
	-1.53	2489	0.05	76	0.009	1381–1622
14.9	-5.63	6998	0.31	356	0.09	1025–1288
	-2.44	2894	0.17	243	0.046	1288–1630
16.9	-4.80	6277	0.16	188	0.041	1070–1294
	-2.61	3439	0.14	206	0.036	1294–1597
18.2	-3.70	4873	0.18	205	0.044	1008–1245
	-1.80	2516	0.11	150	0.033	1245–1597
20.6	-7.26	8755	0.22	241	0.042	1051–1220
	-3.18	3779	0.20	286	0.08	1220–1605
24.1	-6.56	7843	0.32	348	0.07	1032–1208
	-2.88	3395	0.17	229	0.042	1208–1506
29.1	-6.00	6777	0.17	206	0.038	1114–1319
	-2.66	2354	0.13	194	0.031	1319–1597
39.8	-9.5	10684	0.8	836	0.14	1021–1153
	-3.81	4098	0.24	318	0.08	1153–1491
43.7	-8.73	9782	0.27	284	0.06	1003–1174
	-3.42	3545	0.22	284	0.07	1174–1482
55.7	-3.76	3373	0.09	108	0.05	1017–1430
	-1.82	599	0.16	243	0.014	1430–1572

фрагментах  $\text{B}^{\text{IV}}-\text{O}-\text{B}^{\text{IV}}$ , что является причиной снижения вязкости. Следует отметить, что образование таких цепочек не нарушает в целом слоистого строения бинарной системы  $\text{Li}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$ .

В интервале 9–11 мол. %  $\text{Li}_2\text{O}$  при контакте цепочек из полиэдров  $\text{B}\text{O}_4$  с бороксольными кольцами начинают образовываться триборатные группировки ( $\text{B}_3\text{O}_3\text{O}_4^-$ ). Последние формируют трехмерные фрагменты сетки расплава. Это увеличивает вязкость бинарного боратного расплава. Поскольку межчастичное взаимодействие между оставшимися бороксольными кольцами достаточно сильное, вводимый оксид лития при  $x > 11$  мол. % переводит цепочки, собранные из полиэдров  $\text{B}\text{O}_4^-$ , в метаборатные группировки  $\text{B}\text{O}_2\text{O}^-$ . Ион лития становится мостиковым ионом между ме-

лаборатными единицами расплава, его к. ч. увеличивается. Трансформация цепочечных группировок заканчивается при содержании  $\text{Li}_2\text{O} \sim 15$  мол. %. Дальнейшее увеличение содержания оксида лития в расплаве приводит к образованию кольцевых три-, пента- и ди-триборатных групп ( $\text{B}_3\text{O}_3\text{O}_4^-$ ,  $\text{B}_5\text{O}_6\text{O}_4$ ,  $\text{B}_5\text{O}_6\text{O}_5^{2-}$ ), изображение этих структур приведено в [11]. Известно, что в щелочноборатных расплавах в области 15–30 мол. % оксида щелочного металла происходит реакция диспропорционирования



При повышенных температурах динамическое равновесие реакции (1) смещается вправо. В области 30 мол. %  $\text{Li}_2\text{O}$  происходит заметное снижение вязкости расплава (рис. 2). В области 30–

45 мол. %  $\text{Li}_2\text{O}$  формируются диборатные группы ( $\text{B}_4\text{O}_5\text{O}_4^{2-}$ ). Взаимодействие ионов лития с диборатными единицами приводит к практически постоянному значению вязкости.

По данным табл. 2, в области температур 1200–1300 К для составов с  $x > 6$  мол. %  $\text{Li}_2\text{O}$  наблюдается излом, который разделяет зависимость  $\lg \eta = f(1/T)$  на низко- и высокотемпературный интервалы и связан с распадом кольцевых групп при повышении температуры [11]. Для расплавов, содержащих менее 6 мол. %  $\text{Li}_2\text{O}$ , температура излома ( $T_{\text{изл}}$ ) не зафиксирована. Это означает, что она, вероятно, находится в более высокотемпературной области, недоступной для используемого метода измерений.

Необходимо отметить, что в отличие от работы [1] (рис. 1, табл. 1) на зависимости вязкости от состава (рис. 2, табл. 2) выделяется дополнительный минимум при  $x = 6.7$  мол. %  $\text{Li}_2\text{O}$ . Этот минимум отделяет область образования цепочечных единиц из полиэдров  $\text{BO}_4^-$  от области образования кольцевых полярных группировок. Наблюдаемое отличие, возможно, связано с тем, что используемый в работе [1] метод измерения вязкости дает более усредненные величины вследствие более низкой чувствительности к химическим связям бинарного расплава.

Для расчетов энергетических параметров литиевооборотных расплавов была использована конфигурационно-активационная модель вязкого течения Д.С. Сандитова [12], согласно которой вязкость описывается уравнением Эйринга

$$\eta = \frac{Nh}{V_\eta} \exp\left(\frac{F_\eta}{RT}\right). \quad (2)$$

В уравнении (2) температурная зависимость свободной энергии активации вязкого течения имеет вид

$$F_\eta = U_\infty + \gamma \frac{v_0}{v_h} RT \left[ \exp\left(\frac{\epsilon_h}{RT}\right) - 1 \right]. \quad (3)$$

Здесь  $N$  – число кинетических единиц расплава,  $h$  – постоянная Планка,  $V_\eta$  – активационный объем вязкого течения,  $U_\infty$  – энергия переключения мостиковых связей в сетке расплава,  $\epsilon_h$  – конфигурационная энергия активации борокислородной сетки расплава (или энергия образования микродырки),  $\gamma$  – коэффициент перекрытия микропустот ( $0.5 \leq \gamma \leq 1$ ),  $v_0$  – минимальный объем микродырки, в который может перескочить частица,  $v_h$  – изменение объема аморфной среды, вызванное образованием дырки.

В статье [12] было показано, что множитель  $\gamma \frac{v_0}{v_h}$  существенно не влияет на вычисляемые зна-

чения  $F_\eta$  и варьируется в интервале  $0.5 \leq \gamma \leq 1$ , поэтому для упрощения расчетов его значение было принято равным единице.

Энергию активации вязкого течения литиевооборотных расплавов для высокотемпературного ( $E_{a(L)}$ ) и низкотемпературного ( $E_{a(H)}$ ) интервалов рассчитывали по формуле:

$$E_a = R \frac{\ln \eta_1 - \ln \eta_2}{1/T_1 - 1/T_2}, \quad T_1 > T_2. \quad (4)$$

В работе [12] показано, что начиная с некоторой температуры смещение кинетических единиц оксидного расплава осуществляется только переключением мостиковых кислородных связей ( $F_\eta = \text{const}$ ). Тогда энергия активации вязкого течения расплава  $E_a$  соответствует энергии переключения мостиковых связей  $U_\infty$  и для высокотемпературного интервала будет справедливо тождество

$$F_\eta = U_\infty \equiv E_{a(L)}. \quad (5)$$

На зависимости  $\lg \eta = f(1/T)$  в области низких температур свободная энергия активации вычисляется по уравнению (3). В данном случае использовать значение  $E_{a(H)}$  для расчета  $F_\eta$  по уравнению (5) уже нельзя, т.к.  $E_{a(H)}$  включает в себя и энергию переключения мостиковых кислородных связей, и энергию образования “микродырок”. Поэтому при расчетах необходимо учитывать приращение свободной энергии вязкого течения  $\Delta F_\eta = E_{a(H)} - E_{a(L)}$  для интервала  $\Delta T = T_{\text{изл}} - 0$ . В качестве температурной “привязки” был выбран абсолютный нуль шкалы Кельвина. Тогда уравнение (3) для расчета свободной энергии активации в низкотемпературном интервале можно представить в виде

$$F_\eta = E_{a(L)} + RT \exp\left(\frac{\epsilon_h}{RT}\right) - RT, \quad (6)$$

а приращение функции  $\Delta F_\eta$  в низкотемпературном интервале

$$\Delta F_\eta + R\Delta T = R\Delta T \exp\left(\frac{\epsilon_h}{R\Delta T}\right). \quad (7)$$

Параметр  $\epsilon_h$  может быть вычислен по формуле

$$\begin{aligned} \epsilon_h &= R\Delta T \ln\left(\frac{\Delta F_\eta}{R\Delta T} + 1\right) = \\ &= RT_{\text{изл}} \ln\left(\frac{E_{a(H)} - E_{a(L)}}{RT_{\text{изл}}} + 1\right). \end{aligned} \quad (8)$$

Из уравнений (5) и (8) следует важный вывод, что параметры  $\epsilon_h$  и  $U_\infty$  не являются функциями температуры, а определяются только составом и физико-химическими параметрами расплава, которые в свою очередь зависят от его структуры. Значения параметров  $\epsilon_h$  и  $U_\infty$  для исследованных литиевооборотных расплавов приведены в табл. 3.

**Таблица 3.** Параметры конфигурационно-активационной модели для расплавов  $x\text{Li}_2\text{O}-(100-x)\text{B}_2\text{O}_3$ 

$\text{Li}_2\text{O}$ , мол. %	$U_\infty$ , кДж/моль	$\epsilon_h$ , кДж/моль	$F_\eta = U_\infty + \epsilon_h$ , кДж/моль	Структурная единица [11]
4.5	$E_a = 67.4^*$		67.4	Цепочки $\text{BO}_4^-$
6.7	47.1	17.0	64.1	
8.9	47.6	12.0	59.2	$\text{B}_3\text{O}_3\text{O}_4^-$
10.9	47.7	13.0	60.7	Цепочки $\text{BO}_4^- \rightleftharpoons \text{BO}_2\text{O}$
14.9	55.4	22.7	78.1	
16.9	65.9	19.4	85.3	$\text{B}_3\text{O}_3\text{O}_4^-$ $\text{B}_5\text{O}_6\text{O}_4^-$ $\text{B}_5\text{O}_6\text{O}_5^{2-}$ – $\text{B}_4\text{O}_5\text{O}_4^{2-}$
18.2	48.2	17.4	65.6	
20.6	72.3	23.7	96.0	
24.1	65.0	22.6	87.6	
29.1	45.1	23.7	78.0	
39.8	78.4	25.4	103.8	
43.7	67.9	25.2	93.1	
55.7	11.5	20.2	31.7	

\* Энергия активации вязкого течения (кДж/моль) расплава в интервале 1148–1622 К.

Из табл. 3 следует, что зависимость энергии активации вязкого течения литиевоборатных расплавов  $\epsilon_h$ ,  $U_\infty$ ,  $F_\eta$  от состава достаточно сложная и определяется несколькими факторами. При  $x < 6.7$  мол. % она зависит от количества мостиковых атомов кислорода  $\text{B}^{\text{IV}}-\text{O}-\text{B}^{\text{IV}}$ , входящих в состав цепочек из полиэдров  $\text{BO}_4^-$ . При концентрациях оксида лития больше 6.7 мол. % величины активационных энергий обусловлены соотношением кинетических единиц  $\text{BO}_4^-/\text{BO}_2\text{O}^-$ , а также типом кольцевых группировок, формирующих мостиковые связи  $\text{B}^{\text{IV}}-\text{O}-\text{B}^{\text{IV}}$ . Необходимо отметить, что минимумы энергии активации вязкого течения в расплавах  $F_\eta$  приходятся на составы 8.9, 18.2 и 29.1 мол. %  $\text{Li}_2\text{O}$ , в которых отношение концентраций  $\text{BO}_4^-/\text{BO}_2\text{O}^-$  является максимальным.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом вибрационной вискозиметрии измерена вязкость литиевоборатных расплавов в температурном 1003–1630 К и концентрационном  $0 \leq x \leq 56$  мол. %  $\text{Li}_2\text{O}$  интервалах.

В области малых концентраций  $0 \leq x \leq 9$  мол. %  $\text{Li}_2\text{O}$  снижение вязкости вызвано образованием цепочек из полиэдров  $\text{BO}_4^-$ , а увеличение вязкости при  $9 \leq x \leq 11$  мол. %  $\text{Li}_2\text{O}$  – образованием кольцевых триборатных групп.

В целом нелинейное изменение вязкости с увеличением концентрации оксида лития связано с конверсией  $\text{BO}_4^-$  в группы  $\text{BO}_2\text{O}^-$ , входящих в другие типы кольцевых полиборатных цепочек.

С использованием конфигурационной теории вязкого течения вычислены конфигурационная энергия активации  $\epsilon_h$  и энергия переключения мостиковых связей  $U_\infty$  для исследованных составов расплава.

В области температур 1200–1300 К наблюдается излом, который разделяет зависимость  $\lg \eta = f(1/T)$  на низко- и высокотемпературный интервалы и связан с распадом кольцевых боратных группировок при увеличении температуры.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shartsis L., Capps W., Spinner S.* Viscosity and Electrical Resistivity of Molten Alkali Borates // J. Am. Ceram. Soc. 1953. V. 36. № 10. P. 319–326.
2. *Мусихин В.И., Кудряшов В.Н.* Строение и свойства металлургических расплавов Свердловск: Ин-т металлургии УНЦ АН СССР, 1974. Т. 28. С. 91–96.
3. *Ota R., Soga N., Yogyo-Kyokai-Shi* // J. Ceram. Soc. Jpn. 1983. V. 91. № 6. P. 265–271.
4. *Liu H., Shen G., Wang X., Wei J.D.* Viscosity and Ir Investigations in the  $\text{Li}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$  System // Prog. Cryst. Growth Character. Mater. 2000. V. 40. P. 235–241.
5. *Chryssikos G.D., Duffy J.A., Hutchinson J.M., Ingram M.D., Kamitsos E.I., Pappin A.J.* Lithium Borate Glasses: a Quantitative Study of Strength and Fragility //

- J. Non-Cryst. Solids. 1994. V. 172–174. Part 1. P. 378–383.
6. *Kojima S., Novikov V.N., Kodama M.* Fast Relaxation, Boson Peak, and Anharmonicity in  $\text{Li}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$  Glasses // *J. Chem. Phys.* 2000. V. 113. № 15. P. 6344–6350.
  7. *Соловьев А.Н., Каплун А.Б.* Вибрационный метод измерения вязкости жидкостей. Новосибирск: Наука, 1970. 140 с.
  8. *Viswanath D.S., Ghosh. T.K., Prasad D.H.L., Dutt N.V.K., Rani K.Y.* Viscosity of liquids. Theory, Estimation, and Data. Dordrecht: Springer, 2007.
  9. *Штенгельмейер С.В., Прусов В.А., Бочегов В.А.* Усовершенствование методики измерения вязкости вибрационным вискозиметром // *Завод. лаб.* 1985. Т. 51. № 9. С. 56–57.
  10. *Голубков В.В.* Структура  $\text{B}_2\text{O}_3$  и щелочных боратов в стеклообразном и расплавленном состоянии // *Физика и химия стекла.* 1992. Т. 18. № 2. С. 14–33.
  11. *Осипов А.А., Осипова Л.М., Быков В.Н.* Структура щелочноборатных стекол и расплавов. Миасс. 2009. С. 417.
  12. *Сандитов Д.С.* Вязкость стеклообразующих расплавов в области перехода “жидкость-стекло” // *ЖЭТФ.* 2010. Т. 137. № 4. С. 767–782.