

ВЯЗКОСТЬ И СВОБОДНАЯ ЭНЕРГИЯ АКТИВАЦИИ ВЯЗКОГО ТЕЧЕНИЯ НАТРИЕВОБОРАТНЫХ РАСПЛАВОВ

© 2022 г. С. Ю. Мельчаков¹, *, А. А. Хохряков¹, М. А. Самойлова¹,
В. В. Рябов¹, Д. А. Ягодин¹

¹Институт металлургии УрО РАН, ул. Амундсена, 101, Екатеринбург, 620016 Россия
*e-mail: s.yu.melchakov@gmail.com

Поступила в редакцию 22.11.2021 г.

После доработки 12.01.2022 г.

Принята к публикации 07.02.2022 г.

Вязкость натриевооборотных расплавов измерена в интервале температур 918–1655 К с помощью вибрационного вискозиметра, работающего в режиме вынужденных колебаний. Содержание оксида натрия варьировалось от 0 до 37.7 мольных процентов. С использованием конфигурационно-активационной модели рассчитаны параметры энергии активации вязкого течения жидких и стеклющихся расплавов. Обнаружено, что с увеличением содержания оксида натрия наблюдаются отклонения от правила аддитивности в значениях вязкости расплавов, в том числе зафиксированы три хорошо выделяемых максимума вязкости при 7, 15.5 и 28 мол. % Na₂O. Такое изменение свойств свидетельствует о сильном межчастичном химическом взаимодействии между компонентами расплава. Дано объяснение наблюдаемым зависимостям с точки зрения структурных изменений расплава.

Ключевые слова: натриевооборотный расплав, вязкость, энергия активации, конфигурационно-активационная модель, структура

DOI: 10.31857/S0132665122030064

ВВЕДЕНИЕ

Вязкость щелочнооборотных расплавов является структурно-чувствительным свойством. Она влияет на кинетику химических реакций, процессы тепло- и массопереноса, скорость установления фазовых равновесий и кинетику кристаллизации расплавов стекол. Вязкость натриевооборотных расплавов, особенно в области высоких температур и малых концентрациях оксидов щелочных металлов, изучена недостаточно подробно. Поэтому цель настоящей работы заключалась в экспериментальном определении вязкости двойной системы Na₂O–V₂O₅ в интервале концентраций 0–37 мол. % оксида натрия и диапазоне температур 918–1655 К.

В научной литературе имеются сведения о вязкости натриевооборотных расплавов. Однако имеющиеся данные плохо согласуются между собой, что связано с различной чувствительностью использованных методов определения вязкости. Большинство измерений вязкости системы Na₂O–V₂O₅ выполнено до 1273 К, но в разных концентрационных интервалах по Na₂O [1–4]. В работах [5–8] измерения вязкости проводились в более высокотемпературном интервале 873–1573 К. В [6] измерения сделаны в интервале 1273–1573 К с содержанием оксида натрия от 37.3 до 49.4 мол. %. Несовпадение концентрационных и температурных интервалов, а также применявшихся методов измерений вязкости натриевооборотных расплавов, серьезно усложняет задачу по

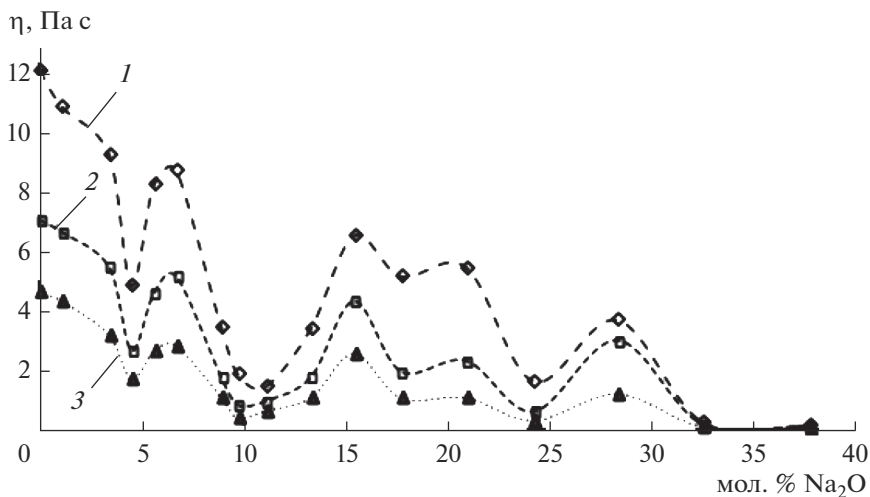


Рис. 1. Зависимость вязкости расплавов $x\text{Na}_2\text{O} \cdot (100 - x)\text{B}_2\text{O}_3$ от состава и температуры: 1 – 1173 К, 2 – 1273 К, 3 – 1373 К.

их взаимному согласованию. Тем не менее, в работе [7], авторы показывают наличие максимума на концентрационной зависимости вязкости в области ~ 17 мол. % Na_2O . Однако слишком большой шаг концентрационных измерений и отсутствие данных для составов менее 7 мол. % оксида натрия в [7] не дает полного представления об изменении вязкости в двойной системе.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Хорошо известно, что границы измерения вязкости зависят от применяемого метода измерений [9, 10]. В настоящей работе вязкость расплавов $x\text{Na}_2\text{O} \cdot (100 - x)\text{B}_2\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 37$ мол. % Na_2O) измеряли на вибрационном вискозиметре, работающем в режиме вынужденных колебаний [11]. Вискозиметр позволял измерять вязкость в диапазоне 0.1–12.5 Па·с. Погрешность измерения вязкости составила $\pm 5\%$. Температуру стеклования расплавов измеряли на объемных образцах методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на калориметре фирмы Netzsch STA 409 PC (Германия) при скорости нагрева 10 К/мин с точностью до $\pm 1\%$. При измерении вязкости расплавов большое значение имеет подготовка бинарных натриевообратных смесей. В работах [2, 12] показано, что оксид бора сильно адсорбирует влагу, которая влияет на физико-химические свойства расплавов. Поэтому боратные смеси готовили из предварительно переплавленного оксида бора с последующим перемешиванием с карбонатом щелочного металла. Нагревание смеси проводили в течение часа до 1500 К. По данным дифференциального термического анализа (ДТА) [13], основная масса “связанной” воды испаряется в температурной области 400–600 К. При достижении температуры ~ 1500 К расплав дополнительно выдерживался в течение получаса. Измерения вязкости проводили в температурном интервале 918–1655 К. Зависимость вязкости от температуры и состава расплавов приведена на рис. 1, а зависимость $\lg \eta$ от обратной температуры – в табл. 1 и на рис. 2.

Из рис. 1 видно, что с увеличением содержания оксида натрия в расплаве значения вязкости отклоняются от правила аддитивности и наблюдается 3 хорошо различимых

Таблица 1. Вязкость расплавов $x\text{Na}_2\text{O} \cdot (100 - x)\text{B}_2\text{O}_3$

*Содержание Na_2O , мол. %	$\lg \eta = A + B/T$ (Па с)					ΔT , К
	A	B	$\pm \Delta_A$	$\pm \Delta_B$	$\pm \lg \eta$	
0	-1.657	3182	0.027	39	0.012	1173–1613
1.1	-1.702	3208	0.031	41	0.015	1122–1523
3.4	-2.100	3595	0.032	42	0.015	1124–1543
	-0.51	1138	0.17	268	0.005	1543–1630
4.5	-2.231	3745	0.046	62	0.027	1132–1630
5.6	-2.187	3567	0.038	48	0.026	1068–1530
	-1.5	2545	0.7	1100	0.023	1530–1630
6.7	-2.184	3652	0.044	60	0.024	1114–1576
	-0.528	1043	0.23	368	0.003	1576–1630
8.9	-3.130	4296	0.048	56	0.018	1020–1333
	-2.23	3098	0.09	124	0.016	1333–1581
9.7	-5.74	7126	0.28	314	0.05	1038–1200
	-3.41	4332	0.11	154	0.05	1200–1628
11.1	-2.87	3607	0.14	156	0.113	946–1459
	-0.70	450	0.08	119	0.006	1459–1614
13.3	-3.123	4283	0.029	35	0.016	1007–1358
	-1.76	2435	0.17	252	0.026	1358–1572
15.5	-2.51	3930	0.10	129	0.07	1090–1614
17.6	-4.50	6124	0.12	139	0.031	1098–1351
	-0.95	1332	0.13	194	0.018	1351–1547
20.9	-3.96	5475	0.15	184	0.05	1081–1396
	-2.80	3858	0.20	301	0.037	1396–1630
24.2	-6.00	7305	0.21	238	0.07	1039–1307
	-2.94	3298	0.23	330	0.06	1307–1622
28.3	-5.40	7477	0.15	202	0.10	1126–1655
32.5	-7.97	8326	0.64	627	0.13	937–1103
	-3.54	3441	0.12	160	0.06	1103–1531
37.7	-11.71	11 723	0.49	468	0.08	918–1056
	-3.19	2721	0.11	143	0.07	1056–1605

* Составы стекол представлены по синтезу.

максимума при 7, 15.5 и 28 мол. %. Такая зависимость свидетельствует о сильном межчастичном взаимодействии оксидов натрия и бора и структурной перестройке расплава. Этой зависимости можно дать объяснение с привлечением известных структурных данных [13]. Необходимо отметить, что основным стеклообразующий компонент B_2O_3 имеет неоднородную микроструктуру. Борный ангидрид состоит из бороксольных колец (B_3O_6) и неколецевых единиц, состоящих из планарных треугольников (BO_3), где O – мостиковый кислород. Вводимый в расплавленный B_2O_3 оксид натрия взаимодействует, в первую очередь, с более рыхлой частью сетки расплава, то есть с неколецевыми группировками из неупорядоченных единиц BO_3 . В результате в диапазоне $0 \leq x \leq 5$ мол. % Na_2O в расплавах формируется “субмикроненеднородная структура”,

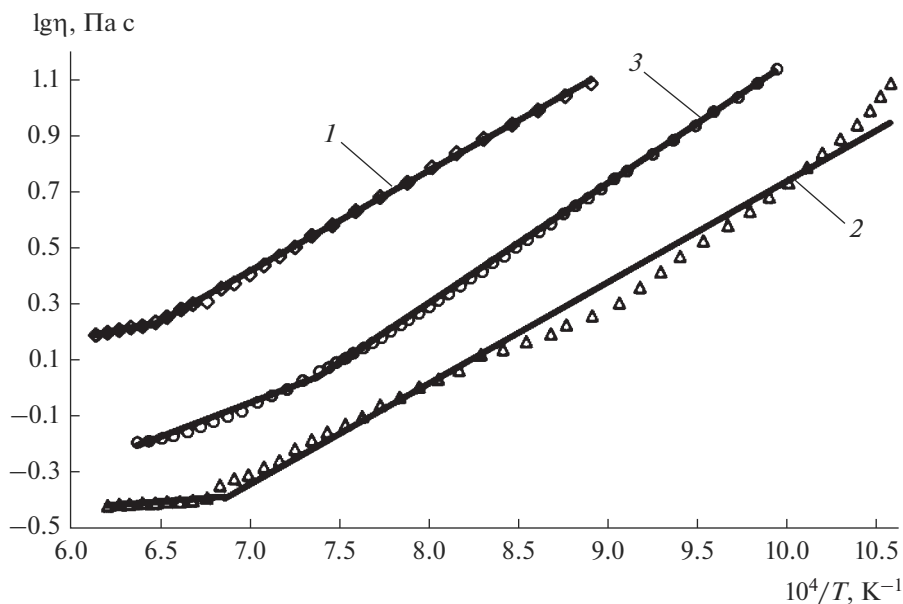


Рис. 2. Зависимость логарифма вязкости натриевоборатных расплавов от обратной температуры. Содержание Na_2O , мол. %: 1 – 3.4, 2 – 11.1, 3 – 13.3. Линии – аппроксимация, точки – экспериментальные данные.

имеющая вытянутый характер в одном направлении, в окрестностях которой концентрируются ионы натрия [14]. Эта “субмикронееднородная” структура представляет собой звенья из полиэдров BO_4^- [15], в которых энергия связи $\text{B}^{\text{IV}}-\text{O}-\text{B}^{\text{IV}}$, слабее по сравнению с энергией связи $\text{B}^{\text{III}}-\text{O}-\text{B}^{\text{III}}$. Это является причиной снижения вязкости.

В диапазоне 5–7 мол. % Na_2O полиэдры BO_4^- входят в состав кольцевых полиборатных групп, наиболее вероятной из которых является триборатная группировка ($\text{B}_3\text{O}_4/2\text{O}_3^-$). Таким образом, в расплаве начинает формироваться трехмерная структура. Это увеличивает вязкость бинарного боратного расплава.

В интервале 7–10 мол. % Na_2O происходит преобразование полиэдров BO_4^- , входящих в некольцевые группировки, в метаборатные единицы BO_2O^- , в окрестностях которых увеличивается концентрация ионов натрия [14].

При $x > 10$ мол. % образуются кольцевые три-, тетра-, пентаборатные группы [15], в результате чего слоистая сетка расплава становится трехмерной. Такая трансформация борокислородной сетки расплава приводит к увеличению вязкости. Наблюдаемый минимум в области ~25 мол. % Na_2O связан с реакцией изомеризации, при которой происходит частичное преобразование группировок BO_4^- в метаборатные BO_2O^- [16]. С повышением температуры доля полиэдров BO_4^- в расплаве уменьшается. В пределах 25–27 мол. % Na_2O рост вязкости связан с образованием диборатных групп ($\text{B}_4\text{O}_4/2\text{O}_5^{2-}$). При $x > 28$ мол. % изменение вязкости вызвано разделением борокислородной сетки расплава на кластеры, в которых увеличивается концентрация метабора-

ратных единиц, то есть увеличивается число немостиковых связей. Происходит расширение областей с ионными связями.

По данным табл. 1 и рис. 2 видно, что на зависимостях $\lg \eta = f(1/T)$ четко наблюдается отклонение от линейности в области $T \sim 1173$ К для составов, содержащих значительное количество полиэдров VO_4^- , концентрация которых снижается с температурой.

В области ~ 1473 К наблюдается излом, разделяющий зависимость $\lg \eta = f(1/T)$ на низко- и высокотемпературные интервалы. Этот излом вызван распадом бороксолевых колец [16]. Обнаружить и выявить излом температурной зависимости удалось не для всех составов, что может означать, что он находится в более высокотемпературной области, что недоступно для использованного нами метода измерения. При более высоких концентрациях оксида-модификатора (Na_2O), выделить четкий переход от высокотемпературного интервала к низкотемпературному становится все сложнее и увеличивается погрешность определения параметров А и В (см. табл. 1).

Для расчетов энергетических параметров натриевооборотных расплавов в высокотемпературном и низкотемпературном интервалах была использована конфигурационно-активационная модель вязкого течения Д.С. Сандитова [17], согласно которой уравнение вязкости описывается уравнением Эйринга и имеет вид:

$$\eta = \frac{Nh}{V_\eta} \exp\left(\frac{F_\eta}{RT}\right), \quad (1)$$

а температурная зависимость свободной энергии активации выражается как

$$F_\eta = U_\infty + \gamma \frac{v_0}{v_h} RT \left[\exp\left(\frac{\varepsilon_h}{RT}\right) - 1 \right], \quad (2)$$

где N – число кинетических единиц расплава, h – постоянная Планка, V_η – флуктуационный объем, U_∞ – энергия переключения мостиковых связей в сетке расплава, ε_h – конфигурационная энергия активации борокислородной сетки расплава (т.е. энергия образования микродырки), T – температура в К, R – универсальная газовая постоянная, γ – среднее значение коэффициента перекрытия дырок, а v_0 и v_h – объем дырки и изменение объема аморфной среды, вызванного образованием дырки соответственно. Д.С. Сандитов показал [17], что множитель $\gamma v_0/v_h$ может варьироваться в интервале от 0.5 до 1 в зависимости от природы стеклообразующих расплавов, однако существенно не влияет на вычисляемое значение F_η , поэтому для упрощения расчетов мы принимали его равным единице.

Энергию активации вязкого течения натриевооборотных расплавов для высокотемпературного и низкотемпературного интервалов рассчитывали по формуле:

$$E_a = \frac{\ln \eta_1 - \ln \eta_2}{1/T_1 - 1/T_2}, \quad T_1 > T_2, \quad (3)$$

где $\ln \eta_1$ и $\ln \eta_2$ (Па с) – значения натуральных логарифмов вязкости (их можно получить, пересчитав коэффициенты А и В из табл. 1), а T_1 и T_2 – соответствующие этим значениям температуры (К).

В работе [17] показано, что свободная энергия активации F_η , начиная с некоторой температуры, принимает постоянное значение, то есть смещение кинетических единиц оксидного расплава осуществляется только переключением мостиковых кислородных связей. Тогда энергия активации вязкого течения расплава E_a по физическому смыслу соответствует энергии переключения мостиковых связей U_∞ . Очевидно, что для высокотемпературного интервала для зависимости $\lg \eta = f(1/T)$, будет справедливо тождество:

$$F_\eta = U_\infty \equiv E_{a(L)}. \quad (4)$$

Индексами L и H обозначены соответственно меньшее и большее значения E_a , соответствующие высокотемпературному и низкотемпературному интервалам. Для высокотемпературного интервала значение $E_{a(L)}$ всегда должно быть меньше $E_{a(H)}$, вычисляемого для низкотемпературного интервала.

С переходом через температуру излома ($T_{изл}$) на зависимости $\lg \eta = f(1/T)$ в области низких температур, свободная энергия активации будет вычисляться строго по уравнению (2). Физический смысл очевиден: чем холоднее расплав, тем больше надо затратить энергии для осуществления элементарного акта его движения, и, соответственно, тем выше будет его вязкость. Однако, использовать только значение $E_{a(H)}$ для расчета F_η уже нельзя, т.к. это значение включает в себя энергию переключения мостиковых связей, и энергию образования “микродырок”. Поэтому, необходимо также учитывать приращение свободной энергии вязкого течения $\Delta F_\eta = E_{a(H)} - E_{a(L)}$ на интервале температур $\Delta T = T_{изл} - 0$. В качестве температурной “привязки” был выбран абсолютный нуль шкалы Кельвина, т.к. при абсолютном нуле невозможен ни один акт элементарного движения. Тогда параметр ϵ_h будет определять “скорость” стеклования и кривизну функции $F_\eta = f(T)$ (2). С учетом этих рассуждений перепишем уравнение (2) для расчета значения свободной энергии активации для низкотемпературного интервала:

$$F_\eta = E_{a(L)} + RT \exp\left(\frac{\epsilon_h}{RT}\right) - RT, \quad (5)$$

тогда приращение функции ΔF_η на низкотемпературном интервале:

$$\Delta F_\eta + R\Delta T = R\Delta T \exp\left(\frac{\epsilon_h}{R\Delta T}\right), \quad (6)$$

а параметр ϵ_h может быть вычислен с учетом “привязки” по формуле:

$$\epsilon_h = R\Delta T \ln\left(\frac{\Delta F_\eta}{R\Delta T} + 1\right) = RT_{изл} \ln\left(\frac{E_{a(H)} - E_{a(L)}}{RT_{изл}} + 1\right). \quad (7)$$

Из уравнения (7) следует важный вывод о том, что параметры ϵ_h и U_∞ не являются функциями температуры, а определяются только физико-химическими параметрами стеклующейся жидкости, которые в свою очередь зависят от структуры расплавов.

Данные параметров ϵ_h и U_∞ для исследованных натриевооборотных расплавов сведены в табл. 2. Там же приведены измеренные значения температуры стеклования (T_g) и доли флуктуационного свободного объема (f_g) при температуре стеклования. Долю свободного объема вычисляли по формуле:

$$f_g = 1/\exp\left(\frac{\epsilon_h}{RT_g}\right). \quad (8)$$

Из табл. 2 видно, что рассчитанные нами параметры конфигурационно-активационной модели вязкого течения удовлетворительно согласуются с данными Д.С. Сандитова [17] и имеют тот же порядок значений. Это свидетельствует о применимости предложенного математического аппарата для расчета параметров. Из табл. 2 следует, что при составе 5.6 мол. % Na_2O , когда в системе образуются некольцевые цепочечные группы, замена тригональных единиц VO_3 на полиэдры VO_4 снижает конфигурационную энергию активации (ϵ_h). В концентрационных областях, где увеличивается доля кольцевых полиборатных групп, формируется трехмерная сетка расплава, энергия активации (ϵ_h) растет. По отношению к конфигурационной энергии активации энергия переключения мостиковых связей имеет обратную зависимость.

Таблица 2. Параметры конфигурационно-активационной модели для расплавов $x\text{Na}_2\text{O} \cdot (100 - x)\text{B}_2\text{O}_3$

Содержание Na_2O , мол. %	T_g , К	U_∞ , кДж/моль	U_∞ [17], кДж/моль	ε_h , кДж/моль	ε_h [17], кДж/моль	f_g
3.4	573	21.8	–	19.8	–	0.016
5.6	569	48.7	–	11.8	–	0.083
6.7	612	20	–	20.6	–	0.017
8.9	657	59.3	–	12.4	–	0.103
9.7	567	83	56	18.5	19.0	0.020
11.1	591	8.6	–	21.7	–	0.012
13.3	697	46.6	~57	16.0	21.2	0.063
17.6	708	25.5	–	24.9	–	0.015
20.9	701	73.9	40	15.1	23.2	0.075
24.2	737	63.1	26	22.7	24.1	0.025
32.5	737	65.9	~15	22.1	25.0	0.027
37.7	757	52.1	–	26.6	–	0.015

Вязкое течение возникает с образованием минимального флуктуационного свободного объема, который необходим для перемещения частиц. Доля свободного флуктуационного объема зависит от состава и температуры расплава, и ее значения, как правило, составляют ~5% от общего объема частиц, участвующих в перегруппировке при температуре стеклования. Превышение данного показателя (см. табл. 2) указывает на усиление межчастичного взаимодействия компонентов расплава, сопровождающееся перестройкой борокислородной сетки, изменением координационного состояния атомов бора или появлением новых типов надструктурных единиц. Так, например, для составов, предшествующих появлению экстремума (минимума или максимума) на зависимости $\eta = f(N_{\text{Na}_2\text{O}})$ (см. рис. 1) доля “замороженного” свободного объема при температуре стеклования всегда превышает 5% (см. табл. 2). Это, видимо, свидетельствует о наличии в “переходных” расплавах максимального количества различных типов структурных (или надструктурных) группировок, плохо упаковывающихся при кристаллизации расплавов. Интересно отметить, что для составов расплавов, демонстрирующих на изотермах экстремумы функции $\eta = f(N_{\text{Na}_2\text{O}})$ (см. рис. 1) значения f_g не превышают 2.5%, что, вероятно, свидетельствует о стабилизации структуры стекла за счет доминирования одного, наиболее энергетически выгодного типа структурных группировок.

Учитывая данные табл. 2 и рис. 1 можно заключить, что вязкое течение расплавов определяется как энергетическими, так и энтропийными характеристиками, как это ранее было показано в работе [18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была измерена вязкость натриевобратных расплавов в температурном диапазоне 918–1655 К и концентрационном интервале 0–37.7 мол. % Na_2O . Показано,

что с ростом содержания Na_2O при одной и той же температуре вязкость расплавов изменяется сложным образом. Изменение вязкости связано с межчастичным взаимодействием компонентов расплава и объясняется изменением координации атомов бора, появлением новых надструктурных единиц в борокислородной сетке. Дано объяснение наблюдаемого явления с точки зрения структурных характеристик расплава.

Используя конфигурационно-активационную теорию вязкого течения Д.С. Сандитова, предложен математический аппарат для вычисления конфигурационной энергии активации ϵ_h и энергии переключения мостиковых связей U_∞ . Показано, что рассчитываемые таким образом значения параметров, удовлетворительно согласуются с данными Сандитова, вычисленными теоретически, и имеют тот же порядок значений. Найденные параметры позволяют рассчитать значение свободной энергии активации вязкого течения расплава.

Установлено, что в области температур ~ 1270 К наблюдается отклонение зависимости $\lg \eta = f(1/T)$ от линейного характера, которое объяснено распадом полиэдров BO_4^- , на метаборатные единицы BO_2O^- . В диапазоне температур 1300–1400 К обнаружен излом, связанный с переходом расплава к состоянию, движение которого определяется только переключением мостиковых связей в борокислородной сетке расплава.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМЕТ УрО РАН с использованием оборудования ЦКП “Урал-М”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воларович М.П., Толстой Д.М. Исследование внутреннего трения двойной системы $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{--B}_2\text{O}_3$ в расплавленном состоянии // Изв. Акад. наук СССР. 1930. № 9. С. 897–906.
2. Shartsis L., Capps W., Spinner S. Viscosity and Electrical Resistivity of Molten Alkali Borates // J. American Ceramic Society. 1953. V. 36. № 10. P. 320–326.
3. Ota R., Soga N. Role of Viscosity Playing in the Formation of $\text{B}_2\text{O}_3\text{--Na}_2\text{O}$ Binary Glasses by Quenching Method // J. Society of Materials Science Japan. 1981. V. 30. № 333. P. 600–606.
4. Li Pei-Ching, Ghose Anil C., Su Gouq-Jen. Viscosity Determination of Boron Oxide and Binary Borates // J. American Ceramic Society. 1962. V. 45. № 2. P. 83–88.
5. Богданов В.Н., Михайлов И.Г., Немилев С.В. Изучение методом ультразвуковой спектроскопии и вискозиметрии структуры расплавленных стекол системы $\text{Na}_2\text{O--B}_2\text{O}_3$ // Акустический журн. 1974. Т. XX. № 4. С. 511–517.
6. Tandon Sashi, Agrawal Ranchhor D., Kapoor Madan L. Viscosity of Molten $\text{Na}_2\text{O--B}_2\text{O}_3$ Slags // J. American Ceramic Society. 1994. V. 77. № 4. P. 1032–1036.
7. Kaiura G.H., Toguri J.M. The viscosity and structure of sodium borate melts // Physics and chemistry of glasses. 1976. V. 13. № 7. P. 62–69.
8. Koishi T., Misawa M. Life time of structural units and viscosity of borate melt by computer simulation // J. Physical Society of Japan. 1999. V. 68. № 8. P. 2669–2672.
9. Соловьев А.Н., Каплун А.Б. Вибрационный метод измерения вязкости жидкостей. Новосибирск: Наука, 1970. 140 с.
10. Viswanath D.S., Ghosh T.K., Prasad D.H.L., Dutt N.V.K., Rani K.Y. Viscosity of liquids. Theory, Estimation, Experimental and Data. Dordrecht: Springer, 2007. 667 p.
11. Штенгельмейер С.В., Прусов В.А., Бочегов В.А. Усовершенствование методики измерения вязкости вибрационным вискозиметром // Заводская лаборатория. 1985. Т. 51. № 9. С. 56–57.
12. Апакашев Р.А., Осинцева Т.Н. Исследование термической дегидратации расплава B_2O_3 методом фотометрии // Расплавы. 2005. № 6. С. 80–83.
13. Хохлаков А.А., Истомин С.А., Рябов В.В., Иванов А.В. Влияние механоактивации оксидов M_2O_3 (M = Gd, Tb, Dy, Ho, Lu) на электропроводность боратных расплавов // Расплавы. 2011. № 5. С. 8–17.
14. Голубков В.В. Структура B_2O_3 и щелочных боратов в стеклообразном и расплавленном состояниях // Физ. и хим. стекла. 1992. Т. 18. № 2. С. 14–33.

15. Хохряков А.А., Вершинин А.О., Пайвин А.С., Истомин С.А. Электронные спектры расплавленных смесей $x\text{Na}_2\text{O}-(100-x)\text{V}_2\text{O}_3$ и $x\text{Na}_2\text{O}-(100-x)\text{V}_2\text{O}_3-\text{RE}_2\text{O}_3$ (RE = Sm, Eu) // Расплавы. 2017. № 6. С. 538–549.
16. Осипов А.А., Осипова Л.М., Быков В.Н. Спектроскопия и структура щелочноборатных стекол. Екатеринбург–Миасс: УрО РАН, 2009. 174 с.
17. Сандитов Д.С. Сдвиговая вязкость стеклообразующих расплавов в области перехода жидкость–стекло // ЖЭТФ. 2010. Т. 137. № 4. С. 767–782.
18. Сандитов Д.С. Энтропия активации процесса возбуждения атома в области перехода жидкость–стекло // Доклады Академии наук. 2005. Т. 403. № 4. С. 498–501.