

УДК 541.64:539.199:537.3

МОДЕЛЬ ДЕЛОКАЛИЗОВАННЫХ АТОМОВ И СВОЙСТВА СУЛЬФАТНО-ФОСФАТНЫХ СТЕКОЛ

© 2019 г. Д. С. Сандитов^{1,2, *}, С. С. Бадмаев^{1, **}

¹Бурятский государственный университет, Россия, 670000 Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а

²Институт физического материаловедения СО Российской академии наук,
Россия, 670047 Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

*e-mail: sanditov@bsu.ru

**e-mail: sayan75@mail.ru

Поступила в редакцию 27.02.2018 г.

Показана применимость основных положений модели делокализованных атомов к легкоплавким сульфатно-фосфатным стеклам. Рассчитаны параметры модели. На их основе высказаны определенные суждения о процессе “делокализации атома” в исследованных стеклах и об их свойствах (вязкость, микротвердость, стеклование, внутреннее давление). Установлено, что между энергией делокализации атома и температурой стеклования наблюдается линейная корреляция. При переходе жидкость – стекло замораживается процесс делокализации атома.

Ключевые слова: вязкое течение, стеклование, ангармонизм, микротвердость

DOI: 10.1134/S0002337X1901010X

ВВЕДЕНИЕ

Легкоплавкие сульфатно-фосфатные стекла используются как среды, передающие давление при высокотемпературном гидростатическом уплотнении легких металлических сплавов, а также в качестве стеклосмазок при их термомеханической обработке (штамповке, прессовании) [1, 2]. Они находят применение и в других отраслях техники, например, в качестве аморфных припоев для скрепления керамических, кварцевых неметаллических деталей между собой [1].

Настоящая работа посвящена возможности описания ряда механических и тепловых свойств сульфатно-фосфатных стекол в рамках модели делокализованных атомов [3, 4]. Данные по свойствам этих стекол – вязкости η , модулю упругости E , коэффициенту Пуассона μ , микротвердости H_V , температуре стеклования T_g – получены В.Л. Мамошиным [1, 2].

МОДЕЛЬ ДЕЛОКАЛИЗОВАННЫХ АТОМОВ НА ПРИМЕРЕ СИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ

Под делокализацией атома в силикатных стеклах и их расплавах подразумевается предельное смещение атома кислорода в мостике $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$, связанное с локальной низкоактивационной деформацией кремнекислородной сетки из валентных связей. На рис. 1 приведена схема элементарного акта вязкого течения силикатного стекла по

Немилову [5], который, как мы считаем, состоит из двух этапов: делокализации мостикового атома кислорода (переход $A-B$) и переключения валентной связи (переход $B-C$). Полагаем, что делокализация мостикового атома кислорода служит необходимым условием переключения валентной связи и, следовательно, самого вязкого течения. Поэтому замораживание процесса делокализации активного атома в области стеклования приводит к прекращению вязкого течения и к переходу расплава в стеклообразное состояние [6, 7].

Методами статистической физики получена формула для относительного числа делокализованных атомов [3, 7]

$$\frac{N_e}{N} = \exp\left(-\frac{\Delta\varepsilon_e + p\Delta v_e}{kT}\right), \quad (1)$$

где $\Delta\varepsilon_e = p_i\Delta v_e$ – энергия делокализации атома, равная работе предельного смещения атома из равновесного положения, совершаемой против внутреннего давления p_i , обусловленного силами межатомного притяжения, Δv_e – элементарный флуктуационный объем, необходимый для смещения атома (объем делокализации атома), N – число атомов в аморфном веществе.

Вязкое течение выше температуры стеклования T_g обеспечивается наличием возбужденных делокализованных атомов с энергией возбуждения $\Delta\varepsilon_e$

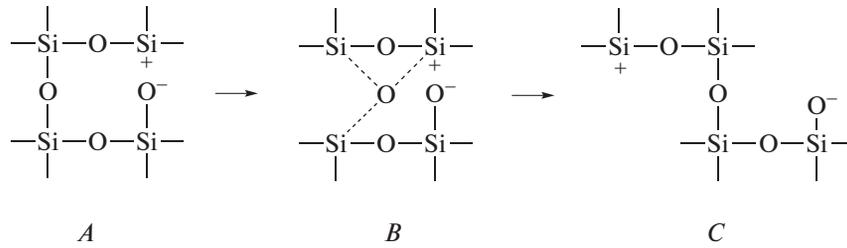


Рис. 1. Схема делокализации мостикового атома кислорода (переход $A \rightarrow B$) [6, 7] и переключения валентной связи (переход $B \rightarrow C$) в силикатном стекле [5] (см. пояснения в тексте).

$$\Delta\varepsilon_e = RT_g \ln(1/f_g). \quad (2)$$

Здесь R – газовая постоянная, $f_g = (\Delta V_e/V)_{T=T_g}$ – доля флуктуационного объема, замороженная при температуре стеклования T_g . Флуктуационный объем аморфного вещества обусловлен тепловыми смещениями (делокализацией) атомов

$$\Delta V_e = N_e \Delta v_e. \quad (3)$$

Величина f_g определяется по данным о вязкости в области стеклования и слабо зависит от природы стеклообразующих веществ: у стекол одного класса она практически постоянна $f_g \approx \text{const}$.

При охлаждении расплава неорганических стекол относительное число делокализованных активных мостиковых атомов (N_e/N), ответственных за вязкое течение, в интервале стеклования уменьшается до ничтожно малого значения, порядка 3%, что равносильно их замораживанию [7, 8],

$$\left(\frac{N_e}{N}\right)_{T=T_g} \approx \exp\left(-\frac{\Delta\varepsilon_e}{kT_g}\right) \approx \text{const} \approx 0.03. \quad (4)$$

При $T = T_g$ замораживается процесс делокализации атома – переход активной частицы из основного в возбужденное состояние.

Объем делокализации атома Δv_e вычисляется по формуле [3, 7]

$$\Delta v_e = \frac{3(1 - 2\mu)kT_g}{f_g E}, \quad (5)$$

где μ – коэффициент Пуассона, E – модуль упругости при одноосной деформации, k – постоянная Больцмана.

ЭНЕРГИЯ ДЕЛОКАЛИЗАЦИИ АТОМА И СВОЙСТВА СУЛЬФАТНО-ФОСФАТНЫХ СТЕКОЛ

Вязкое течение. Вязкое течение сульфатно-фосфатных стекол и их расплавов, как и других стеклообразных систем, вполне удовлетворительно описывается “двойной экспонентой” – уравнением Брэдбури–Шишкина (см. [2, 9])

$$\eta = \eta_0 \exp\left[a \exp\left(\frac{c}{T}\right)\right], \quad (6)$$

которое может быть обосновано в рамках модели делокализованных атомов с помощью соотношений [3, 7]

$$\eta = \eta_0 \exp\left(\frac{1}{f}\right), \quad (7)$$

$$f = \left(\frac{\Delta v_e}{v}\right) \exp\left(-\frac{\Delta\varepsilon_e}{kT}\right),$$

где $f = (\Delta V_e/V)$ – доля флуктуационного объема, $v = (V/N)$ – объем, приходящийся на один атом. При этом константы a и c приобретают следующий физический смысл:

$$a = \frac{v}{\Delta v_e}, \quad (8)$$

$$c = \frac{\Delta\varepsilon_e}{k}. \quad (9)$$

Была разработана программа [1], по которой производился подбор эмпирических параметров η_0 , a , c (табл. 1). Предэкспоненциальный множитель η_0 представляет собой высокотемпературный предел вязкости и равен $\eta_0 = 10^{-3} - 10^{-4}$ П, величина c для исследованных стекол меняется от 1960 до 2160 К. Параметр a близок к единице $a = 0.95 - 0.99$. Это означает (см. (8)), что объем Δv_e , необходимый для делокализации атома (кинетической единицы), практически совпадает с объемом v , приходящимся на атом ($\Delta v_e \approx v$).

Долю флуктуационного объема f_g , замороженную при температуре стеклования, вычисляем по формуле

$$\frac{1}{f_g} = a \exp\left(\frac{c}{T_g}\right), \quad (10)$$

вытекающей из сравнения уравнений вязкости (6) и (7) при $f = f_g$ и $T = T_g$. Значение f_g у сульфатно-фосфатных стекол меняется в сравнительно узких пределах (табл. 1). При увеличении содержания сульфата цинка ZnSO_4 в стеклах системы $\text{NaPO}_3 - \text{ZnSO}_4$ от 0 до 40 мол. % величина

Таблица 1. Свойства сульфатно-фосфатных стекол и параметры модели делокализованных атомов

№	Стекло	T_g , К	E , $\frac{\text{КГС}}{\text{ММ}^2}$	μ	a	c , К	f_g	$\Delta\epsilon_e$, кДж/моль		Δv_e , Å^3	ρ_i , $\frac{\text{КГС}}{\text{ММ}^2}$	H_V , $\frac{\text{КГС}}{\text{ММ}^2}$	γ_D (15)
								(2)	(11)				
1	NaPO ₃	523	3610	0.294	0.99	2160	0.016	17.95	17.93	16	195	175	1.74
2	0.9 NaPO ₃ –0.1 ZnSO ₄	493	4060	0.288	0.98	1990	0.018	16.45	16.52	12	231	210	1.70
3	0.8 NaPO ₃ –0.2 ZnSO ₄	505	4220	0.284	0.98	2005	0.019	16.61	16.64	11	248	225	1.68
4	0.7 NaPO ₃ –0.3 ZnSO ₄	510	4530	0.273	0.99	2000	0.020	16.56	16.60	11	260	235	1.62
5	0.6 NaPO ₃ –0.4 ZnSO ₄	515	5210	0.259	0.98	2015	0.020	16.72	16.72	10	286	260	1.54
6	0.9 NaPO ₃ –0.1 Li ₂ SO ₄	451	4140	0.300	0.97	1940	0.014	15.98	16.10	13	206	200	1.72
7	0.8 NaPO ₃ –0.2 Li ₂ SO ₄	447	4210	0.303	0.95	1950	0.013	16.11	16.18	14	205	200	1.79
8	0.7 NaPO ₃ –0.3 Li ₂ SO ₄	429	4230	0.034	0.95	1860	0.014	15.20	15.44	11	212	215	1.80
9	0.9 NaPO ₃ –0.1 Na ₂ SO ₄	496	3730	0.299	0.97	2060	0.016	17.02	17.10	14	207	195	1.77
10	0.8 NaPO ₃ –0.2 Na ₂ SO ₄	493	3550	0.292	0.96	2050	0.016	16.92	17.01	15	191	190	1.72
11	0.7 NaPO ₃ –0.3 Na ₂ SO ₄	490	3540	0.288	0.95	2095	0.015	17.08	17.39	16	172	180	1.70
12	0.9 NaPO ₃ –0.1 K ₂ SO ₄	444	3380	0.316	0.95	1945	0.013	16.00	16.14	16	175	210	1.88
13	0.8 NaPO ₃ –0.2 K ₂ SO ₄	453	3350	0.316	0.96	1940	0.014	16.05	16.10	15	185	205	1.88
14	0.7 NaPO ₃ –0.3 K ₂ SO ₄	473	3340	0.313	0.99	2015	0.014	16.76	16.72	16	180	200	1.86

на f_g слабо растет от 0.016 до 0.020. У стекол NaPO₃–MSO₄ (M = Li, Na, K) значение f_g несколько ниже $f_g \approx 0.014$ –0.016.

На основе данных о константе $c = (1940$ – $2160)$ К по формуле (9) ($R = N_A k$ – газовая постоянная)

$$\Delta\epsilon_e = Rc \quad (11)$$

была рассчитана энергия делокализации атома $\Delta\epsilon_e = 16$ – 18 кДж/моль. Эти значения находятся в хорошем согласии с результатами расчета $\Delta\epsilon_e$ по формуле модели делокализованных атомов (2) (табл. 1).

Объем делокализации атома, вычисленный по формуле модели (5), для исследованных стекол составляет $\Delta v_e \approx 11$ – 16 Å^3 , что заметно выше, чем у силикатных стекол $\Delta v_e = 6$ – 8 Å^3 [3, 4].

Температура стеклования. В соответствии с формулой энергии делокализации атома (2) при $f_g \approx \text{const}$ следует ожидать линейную корреляцию между $\Delta\epsilon_e$ и T_g . Действительно, энергия $\Delta\epsilon_e$, определенная независимым способом (по данным об эмпирической постоянной уравнения вязкости), у щелочно-силикатных стекол линейно зависит от температуры стеклования T_g (рис. 2) [6, 7].

Как и следовало ожидать, энергия $\Delta\epsilon_e = Rc$, вычисленная на основе данных о постоянной c (см. ур-е (11)), у сульфатно-фосфатных стекол линейно зависит от температуры стеклования (табл. 1 и рис. 3). При этом рассмотренные стекла делятся на две группы, которые отличаются

наклонами прямых: у первой группы $f_g \approx 0.018$, у второй – $f_g \approx 0.014$ (табл. 1).

В соответствии с развиваемым нами представлением [6, 7] (см. выше) замораживание процесса

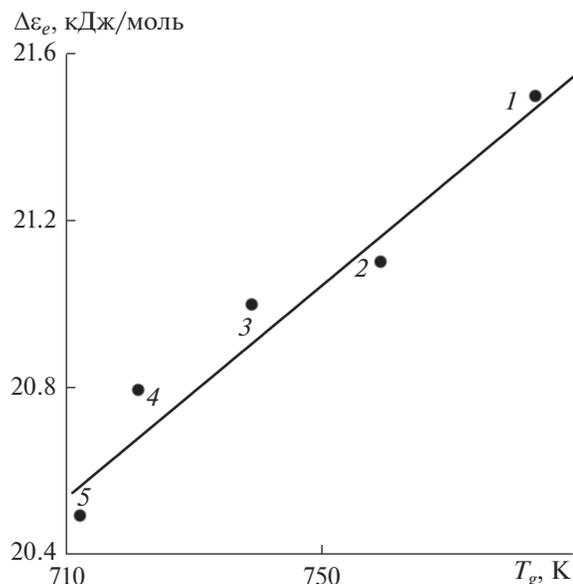


Рис. 2. Линейная корреляция между энергией делокализации атома $\Delta\epsilon_e = RD$ и температурой стеклования T_g натриево-силикатных стекол Na₂O–SiO₂ [6, 7] (D – эмпирический параметр уравнения Енкеля (см. [9]), R – газовая постоянная); содержание Na₂O, мол. %: 15 (1), 20 (2), 25 (3), 30 (4), 35 (5).

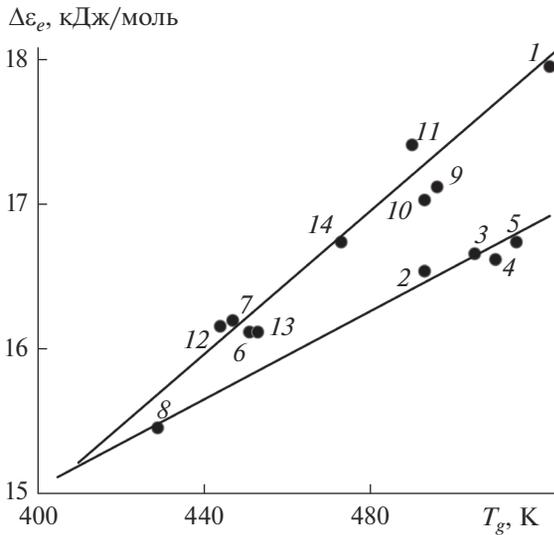


Рис. 3. Корреляция между энергией делокализации атома $\Delta\epsilon_e = Rc$ и температурой стеклования T_g сульфатно-фосфатных стекол (c – параметр уравнения Брэдбури–Шишкина (см. [9]), R – газовая постоянная); номера точек совпадают с номерами стекол в табл. 1.

делокализации атома приводит к прекращению вязкого течения и к переходу жидкости в стеклообразное состояние. Этот момент наступает тогда, когда энергия тепловых колебаний решетки $(i/2)kT$, отнесенная к атому, становится равной или меньше энергии делокализации атома: $(i/2)kT \leq \Delta\epsilon_e$, откуда следует приближенный критерий стеклования

$$\frac{i}{2}kT_g \cong \Delta\epsilon_e, \tag{12}$$

где i – число степеней свободы кинетической единицы, ответственной за стеклование. Как отмечено выше (рис. 2 и 3, табл. 1), энергия $\Delta\epsilon_e$, определенная независимыми способами из данных об эмпирических постоянных уравнений вязкости, а также по модели делокализованных атомов (2), линейно зависит от температуры стеклования, что согласуется с условием стеклования (12).

Микротвердость. Под действием механического напряжения, превышающего некоторый порог σ_y , при 20°C в неорганических стеклах возникает деформация, которая после снятия напряжения может сохраняться сколь угодно долго (эффект пластичности стекла) (см. [9–12]). Однако при нагревании (ниже T_g) данная деформация релаксирует до исчезновения. Следовательно, она оказывается замороженной обратимой деформацией [9, 11]. Тем не менее, следуя многим авторам, будем пользоваться термином “пластическая”, а величину σ_y

назовем пределом текучести. Аналогичная замороженная обратимая деформация наблюдается у аморфных органических полимеров [9, 11] и массивных металлических стекол [13].

“Пластичность” хрупких неорганических стекол удобно изучать методом микротвердости. При вдавлении в них алмазной пирамидки Виккерса и других заостренных инденторов образуется “пластичный” микротпечаток – лунка при 20°C. При этом микротвердость по Виккерсу H_V у силикатных, германатных и других неорганических стекол совпадает с предельным напряжением σ_y . Следовательно, микротвердость для них служит пределом текучести $H_V \approx \sigma_y$, выше которого происходит “пластическая” деформация [12, 14].

Представление о том, что элементарный акт “пластической” деформации стекол сводится к делокализации атома (кинетической структурной единицы), находится в согласии с экспериментальными данными: расчеты предела текучести и энергии активации этой деформации согласуются с экспериментом [12].

Предел текучести σ_y имеет смысл напряжения, необходимого для критического смещения (делокализации) кинетической единицы. По величине σ_y совпадает с внутренним давлением

$$p_i = \Delta\epsilon_e / \Delta v_e,$$

против которого совершается работа делокализации атома. Принимая во внимание равенство $H_V \cong \sigma_y$, приходим к заключению, что микротвердость стекол должна совпадать с их внутренним давлением

$$H_V \approx p_i, \tag{13}$$

что подтверждается для силикатных и германатных стекол [9, 14].

Как видно из табл. 1 и рис. 4 и 5, линейная корреляция между H_V и p_i удовлетворительно выполняется и для исследованных сульфатно-фосфатных стекол. Их микротвердость $H_V = 175–260$ кгс/мм² в пределах погрешности измерений (± 10 кгс/мм² [1]) совпадает с внутренним давлением, рассчитанным по модели делокализованных атомов,

$$p_i = \frac{f_g \ln(1/f_g)}{3(1-2\mu)} = 180–286 \text{ кгс/мм}^2. \tag{14}$$

Ангармонизм колебаний решетки. Делокализация атома – его предельное смещение из равновесного положения – связана с отклонением зависимости силы межатомного (межмолекулярного) взаимодействия от смещения атома от линейной, иными словами, связана с нелинейностью этой силы и с ангармонизмом колебаний решетки (межцепочечных колебаний подрешетки), мерой которых служит параметр Грюнайзена γ_D (см., например, [10]). Его можно оценить с

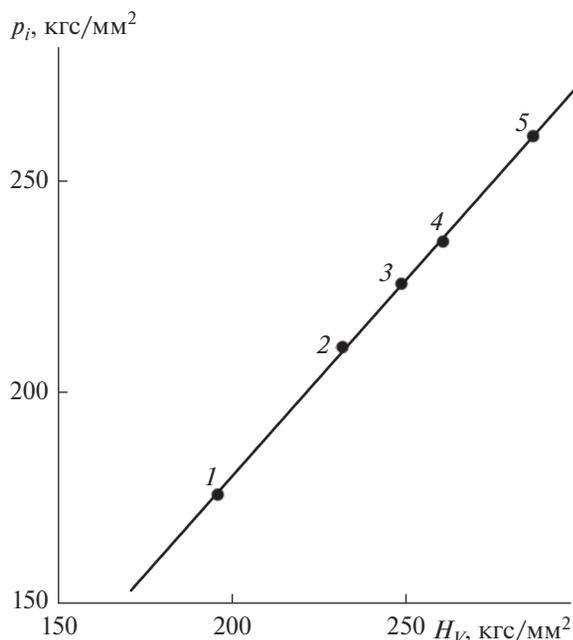


Рис. 4. Линейная корреляция между внутренним давлением p_i и микротвердостью H_V стекол в системе $\text{NaPO}_3\text{--ZnSO}_4$; номера точек соответствуют номерам стекол в табл. 1.

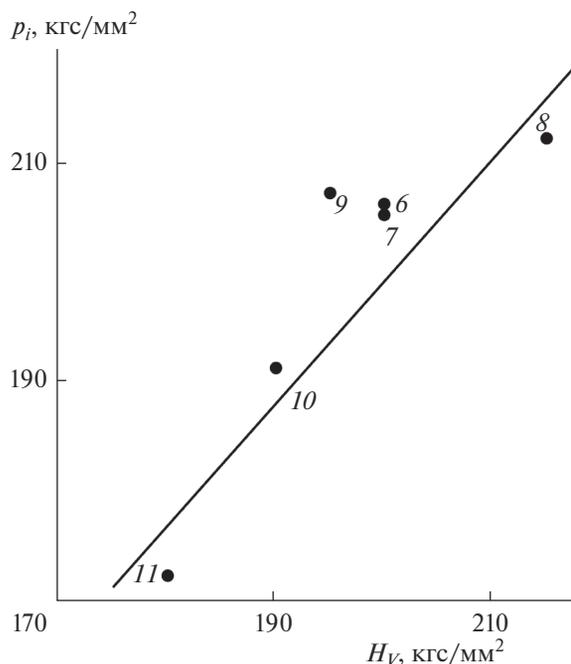


Рис. 5. Корреляция между p_i и H_V для стекол системы $\text{NaPO}_3\text{--M}_2\text{SO}_4$ ($M = \text{Li}, \text{Na}$); номера точек соответствуют номерам стекол в табл. 1, точка 9 (стекло $0.9\text{NaPO}_3\text{--}0.1\text{Na}_2\text{SO}_4$) выпадает из общей закономерности.

помощью формулы Беломестных–Теслевой [15] (табл. 1)

$$\gamma_D = \frac{3}{2} \left(\frac{1 + \mu}{2 - 3\mu} \right). \quad (15)$$

Примечательно то, что это соотношение находится в согласии с известным уравнением Грюнайзена для расчета γ_D [15, 16].

При переходе от стеклообразного метафосфата натрия NaPO_3 к стеклам системы $\text{NaPO}_3\text{--ZnSO}_4$ (табл. 1) наблюдается убывание ангармонизма (γ_D), что согласуется с представлением о том, что катионы Zn^{2+} в структуре стекол играют связующую роль, образуя мостики типа $\text{--P--O...Zn...O--P--}$ [1]. Увеличение содержания ZnSO_4 (катионов Zn^{2+}) приводит к укреплению структуры и к ослаблению ангармонизма колебаний цепей: параметр Грюнайзена уменьшается от 1.74 до 1.54. Об укреплении структуры при этом свидетельствует рост внутреннего давления с 195 до 286 кгс/мм² и возрастание микротвердости с 175 до 260 кгс/мм² (табл. 1).

Наоборот, при переходе от NaPO_3 к стеклам $\text{NaPO}_3\text{--K}_2\text{SO}_4$ наблюдается усиление степени ангармонизма колебаний решетки, величина γ_D растет с 1.74 до 1.88 (табл. 1), что связано с ослаблением и разрыхлением структуры. При этом падает и внутреннее давление — с 195 до 175 кгс/мм².

О ДЕЛОКАЛИЗАЦИИ АТОМА В СУЛЬФАТНО-ФОСФАТНЫХ СТЕКЛАХ

Наряду с прочными ионно-ковалентными связями в цепях --P--O--P-- и тетраэдрах PO_4 и SO_4 в процессах структурообразования сульфатно-фосфатных стекол принимают участие силы слабого межмолекулярного взаимодействия (ван-дер-ваальсовы силы) [1, 2], ответственные за повышенные значения коэффициента теплового расширения и низкие температуры плавления (легкоплавкость). В целом структура сульфатно-фосфатных стекол образована относительно короткими цепями --P--O--P-- и изолированными тетраэдрами SO_4 , причем указанные структурные фрагменты соединены между собой слабыми силами межмолекулярного взаимодействия [1].

Небольшие значения энергии делокализации атома $\Delta\epsilon_e = 15\text{--}17$ кДж/моль указывают на то обстоятельство, что делокализация атома в сульфатно-фосфатных стеклах связана с преодолением сил слабого взаимодействия.

Внутреннее давление p_i (ур-е (14)), обусловленное реакцией квазирешетки на ее всестороннее растяжение или сжатие (табл. 1), для исследованных стекол определяется, очевидно, также указанными выше силами слабого взаимодействия. Они прежде всего реагируют на внешнее воздействие. Работа деформации при микровдавливании алмазной пирамидки Виккерса совер-

шается против этих слабых сил, поэтому микротвердость H_V практически совпадает с внутренним давлением $H_V \approx p_i$ (табл. 1).

К сожалению, полученных данных недостаточно для однозначного заключения по механизму делокализации атома в исследованных стеклах. По аналогии с силикатными стеклами под делокализацией атома в сульфатно-фосфатных стеклах подразумеваем предельное смещение мостикового атома кислорода в мостике P—O—P, связанное с локальной низкоактивационной деформацией структурной сетки из валентных связей.

Тот факт, что объем делокализации атома $\Delta v_e = 11\text{--}16 \text{ \AA}^3$ у сульфатно-фосфатных стекол больше, чем у силикатных ($\Delta v_e = 6\text{--}8 \text{ \AA}^3$), объясняется, по-видимому, большей длиной связи P—O в мостике P—O—P и большим смещением мостикового атома кислорода Δr_m из равновесного положения, чем в случае силикатных стекол (см. рис. 1). В модели делокализованных атомов величина Δv_e определяется площадью эффективного сечения атома πd^2 (d — диаметр атома) и его предельным отклонением Δr_m [3]

$$\Delta v_e = \pi d^2 \Delta r_m.$$

Сульфатно-фосфатные стекла можно рассматривать, в принципе, как линейные и линейно-разветвленные аморфные полимеры. В органических аморфных полимерах внутри цепных макромолекул действуют сильные ковалентные связи, а участки соседних цепей шиты между собой слабыми межмолекулярными связями. На основе данных $\Delta \epsilon_e = 5\text{--}10$ кДж/моль и $\Delta v_e = 30\text{--}60 \text{ \AA}^3$ предполагается, что процессу делокализации атома в стеклообразных органических полимерах соответствует предельное смещение небольшого фрагмента основной цепи макромолекулы — вероятно, группы атомов в соединительном звене [3, 4, 7, 8].

В связи с этим можно было предложить “полимерный” вариант процесса делокализации атома в сульфатно-фосфатных стеклах. Однако этот вариант считаем маловероятным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе экспериментальных данных для сульфатно-фосфатных стекол рассчитаны параметры модели делокализованных атомов. Небольшие значения энергии делокализации атома $\Delta \epsilon_e = 15\text{--}17$ кДж/моль указывают на то обстоятельство, что процесс делокализации атома в этих стеклах и их расплавах связан с преодолением сил слабого взаимодействия типа ван-дер-ваальсовых сил. Элементарный объем, необходимый для делокализации атома, составляет около

$\Delta v_e = 11\text{--}16 \text{ \AA}^3$, что заметно выше, чем у силикатных стекол $\Delta v_e = 6\text{--}8 \text{ \AA}^3$ (у которых делокализации подвергается мостиковый атом кислорода в мостике —Si—O—Si—). Такое различие объясняется большей длиной мостиковой связи P—O в мостике P—O—P и большим отклонением мостикового атома кислорода из равновесного положения, чем в случае силикатного стекла. Высказано предположение, что процесс делокализации атома в исследованных сульфатно-фосфатных, как и в силикатных стеклах, представляет собой предельное смещение мостикового атома кислорода в мостике P—O—P, связанное с локальной деформацией структурной сетки из валентных связей.

Температурная зависимость вязкости рассматриваемых стекол удовлетворительно описывается эмпирическим уравнением Брэдбури—Шишкина, которое получает обоснование в рамках модели делокализованных атомов. По данным о параметре этого уравнения определяется энергия делокализации атома $\Delta \epsilon_e = Rc$ (R — газовая постоянная). Энергия $\Delta \epsilon_e = Rc$ линейно зависит от температуры стеклования T_g . Развито представление о том, что при $T = T_g$ замораживается процесс делокализации атома. Микротвердость этих стекол практически совпадает с внутренним давлением, характеризующим межмолекулярное взаимодействие.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (грант № 3.5406.2017/8.9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мамошин В.Л.* Структурные особенности и свойства неупорядоченных конденсированных систем на основе сульфатов и полифосфатов: Автореф. дис. докт. ... хим. наук. Свердловск: УПИ им. С.М. Кирова, 1990. 40 с.
2. *Сандитов Д.С., Мамошин В.Л., Архипов В.Г.* Применение теории свободного объема к сульфатно-фосфатным стеклам и их расплавам // *Физика и химия стекла.* 1993. Т. 19. № 4. С. 593—601.
3. *Сандитов Д.С.* Модель делокализованных атомов в физике стеклообразного состояния // *ЖЭТФ.* 2012. Т. 142. Вып. 1(7). С. 123—137.
4. *Сандитов Д.С., Бадмаев С.С.* О делокализации атома в стеклах и их расплавах // *Физика и химия стекла.* 2015. Т. 40. № 5. С. 621—630.
5. *Немилов С.В.* Природа вязкого течения стекол с замороженной структурой и некоторые следствия валентно-конфигурационной теории текучести // *Физика и химия стекла.* 1978. Т. 4. № 6. С. 662—674.
6. *Сандитов Д.С.* Модель вязкого течения стеклообразующих жидкостей и стекол // *ДАН.* 2013. Т. 451. № 6. С. 650—654.

7. *Sanditov D.S., Ojovan M.I.* On Relaxation Nature of Glass Transition in Amorphous Materials // *Physica B*. 2017. V. 523. P. 96–113.
8. *Сандитов Д.С.* О природе уравнения перехода жидкость-стекло // *ЖЭТФ*. 2016. Т. 150. Вып. 3(9). С. 501–515.
9. *Сандитов Д.С., Бартенов Г.М.* Физические свойства неупорядоченных структур. Новосибирск: Наука, 1982. 259 с.
10. *Козлов Г.В., Сандитов Д.С.* Ангармонические эффекты и физико-механические свойства полимеров. Новосибирск: Наука, 1994. 261 с.
11. *Сандитов Д.С.* Термостимулированная низкотемпературная релаксация пластической деформации стеклообразных органических полимеров и неорганических стекол // *Высокомолек. соединения. Сер. А*. 2007. Т. 49. № 5. С. 832–842.
12. *Сандитов Д.С., Сангадиев С.Ш., Сандитов Б.Д.* Пластичность и вязкость стеклообразных материалов // *Деформация и разрушение материалов*. 2013. № 3. С. 2–7.
13. *Чах К., Ляхов С.А., Хоник В.А.* Обратимая вязкоупругая деформация массивного металлического стекла // *Деформация и разрушение материалов*. 2006. № 8. С. 22–25.
14. *Сандитов Д.С., Сангадиев С.Ш.* О внутреннем давлении и микротвердости неорганических стекол // *Физика и химия стекла*. 1998. Т. 24. № 6. С. 741–751.
15. *Беломестных В.Н., Теслева Е.П.* Взаимосвязь ангармонизма и поперечной деформации квазиизотропных поликристаллических тел // *Журн. техн. физики*. 2004. Т. 74. Вып. 8. С. 140–142.
16. *Сандитов Д.С., Беломестных В.Н.* Взаимосвязь параметров теории упругости и усредненный модуль упругости твердых тел // *Журн. техн. физики*. 2011. Т. 81. Вып. 11. С. 77–83.