

УДК 544.31.031541.11/118546.03

## КАЛОРИЧЕСКИЕ И ВОЛЮМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЕКЛООБРАЗУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ $\text{Vi}_2\text{O}_3\text{--V}_2\text{O}_3\text{--BaO}$ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ<sup>1</sup>

© 2022 г. А. Д. Плехович<sup>1</sup>\*, Е. Е. Ростоккина<sup>1</sup>, М. Е. Комшина<sup>1</sup>,  
К. В. Балужева<sup>1</sup>, К. Ф. Игнатова<sup>1</sup>, А. М. Кутьин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт химии высококичистых веществ им. Г.Г. Десятых Российской академии наук,  
ул. Троицкая, 49, БОКС-75, Нижний Новгород, 603951 Россия

\*e-mail: plekhovich@ihps-nnov.ru

Поступила в редакцию 24.02.2022 г.

После доработки 08.04.2022 г.

Принята к публикации 11.04.2022 г.

Измерены теплоемкость и волюметрические характеристики в интервале температур 300–1000 К стекол  $0.20\text{Vi}_2\text{O}_3 \cdot x\text{BaO} \cdot (0.80 - x)\text{V}_2\text{O}_3$ , содержащих 5, 10, 15 и 20 мол. % BaO. По полученным данным с учетом установленных характеристик стеклования рассчитаны стандартные термодинамические функции:  $C_p^\circ(T)$ ,  $H^\circ(T) - H_f^\circ(0)$ ,  $S^\circ(T) - S_f^\circ(0)$ ,  $G^\circ(T) - H_f^\circ(0)$ , плотности  $\rho(T)$  и КТР  $\alpha(T)$  в области от  $T \rightarrow 0$  до 900 К в стеклообразном и переохлажденном жидком состояниях. Обладающие широкой областью прозрачности, подтвержденной спектроскопическими измерениями, исследованные методом ДСК образцы показали высокую кристаллизационную устойчивость.

**Ключевые слова:** ДСК, теплоемкость, стекло, плотность, КТР

**DOI:** 10.31857/S0002337X22060094

### ВВЕДЕНИЕ

Прозрачные в спектральном диапазоне от 0.38 до 3.4 мкм боратные стекла  $\text{Vi}_2\text{O}_3\text{--BaO--V}_2\text{O}_3$  способны хорошо растворять редкоземельные элементы, обладают низкой энергией фононов, высокой физической и химической стабильностью и имеют нелинейно-оптические свойства, а потому представляют большой интерес для разработок оптоэлектронных устройств [1–7]. Кроме того, благодаря широким концентрационным областям стеклообразования [8], варьируя состав стекла, можно приблизить показатель преломления, плотность, КТР и другие свойства стеклокерамики на его основе к характеристикам кристаллической фазы.

Кратко характеризуя исследуемую боратную стеклофазу, отметим, что оксид висмута, не являясь стеклообразователем [9], стабилизирует сетку стекла. В работе [10] установлено, что в системе  $\text{Vi}_2\text{O}_3\text{--V}_2\text{O}_3$  наблюдается постепенное изменение к. ч. бора в стекле с 4 до 3 в интервале 40–50 мол. %  $\text{Vi}_2\text{O}_3$ . Висмут в  $\text{Vi}_2\text{O}_3$  обычно стремится занять

октаэдрические позиции в структуре стекла [11], при этом плотность возрастает с увеличением содержания  $\text{Vi}_2\text{O}_3$  [1, 12]. Оптически активная добавка  $\text{Vi}_2\text{O}_3$  в системе  $\text{Vi}_2\text{O}_3\text{--BaO--V}_2\text{O}_3$  способствует увеличению области пропускания стекол в ИК-диапазоне спектра, а также показателя преломления [8]. Получить стекло системы  $\text{Vi}_2\text{O}_3\text{--V}_2\text{O}_3$  можно при относительно малых скоростях охлаждения (5–10 К/мин) при содержании оксида бора свыше 50 мол. % [13].

Боратные стекла на основе оксида висмута находят применение в виде стеклокерамики, для планарных оптических и электронных устройств [14], тепловых и механических датчиков, отражающих окон [1, 15], в качестве преобразователя частоты лазерного излучения на основе вынужденного комбинационного рассеяния [16] и т.д.

Фазовые равновесия и условия стеклообразования в системе  $\text{Vi}_2\text{O}_3\text{--V}_2\text{O}_3\text{--BaO}$  изучены в работах [8, 17]. Поиск висмут-барий-боратных стекол, оптически совместимых по основным характеристикам с эрбий-алюмоиттриевым гранатом, может быть ускорен использованием метода минимизации энергии Гиббса для термодинамического прогнозирования условий образования кристалли-

<sup>1</sup> Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi 10.31857/S0002337X22060094 для авторизованных пользователей.

**Таблица 1.** Результаты определения макросостава стекол системы  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--V}_2\text{O}_5\text{--BaO}$  методом АЭС-ИСП

Образец	Мольная доля		
	$\text{Bi}_2\text{O}_3$	$\text{V}_2\text{O}_5$	BaO
1	0.207	0.747	0.047
2	0.192	0.709	0.099
3	0.189	0.668	0.143
4	0.190	0.614	0.196

Примечание. Неопределенность результатов анализа 0.010 ( $P = 0.95$ ).

ческих фаз в зависимости от состава стеклокристаллической системы [18]. При наличии литературных данных о стандартных термодинамических функциях (СТФ) исходных оксидных компонентов, а также кристаллической фазы YAG [19, 20] актуальность исследования определяется получением недостающей термодинамической информации для стеклообразующей системы  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--V}_2\text{O}_5\text{--BaO}$ .

Цель работы – определение теплоемкости стекла, переохлажденного расплава и характеристик стеклования (ДСК-эксперимент), измерение плотности и КТР; обработка калорических и волюметрических данных по модельно-статистической теории [21–23] с получением полного набора STF образцов состава  $0.20\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot (0.80 - x)\text{V}_2\text{O}_5 \cdot x\text{BaO}$  с  $x = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$  мол. доли.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

**Получение стекол.** Использование наиболее полной к настоящему времени базы данных о стеклах и керамике SciGlass показало, что подбором состава стеклообразующей системы  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--V}_2\text{O}_5\text{--BaO}$  можно обеспечить ее совместимость с дисперсно-кристаллической фазой эрбий-алюмоиттриевого граната  $\text{Er:YAG}$  по показателю преломления, плотности, КТР при удобных для синтеза температурах стеклования и плавления стеклофазы.

Стекла  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--V}_2\text{O}_5\text{--BaO}$  с гомогенным распределением компонентов на молекулярном уровне получали растворением прекурсоров  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ ,  $\text{H}_3\text{VO}_5$ ,  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  квалификации “ос. ч.” в бидистиллированной воде в заданном мольном соотношении. Подготовленную смесь компонентов после интенсивного перемешивания разливали

в формы из фторопласта и помещали с сушильный шкаф до полного высыхания при температуре 423 К. Высушенный образец диспергировали в планетарной мельнице и нагревали в печи до 1223 К для получения расплава, после охлаждения разливали в нагретую до 623 К форму. Полученные образцы стекол отжигали 3 ч при температуре 603 К, при этом происходило формирование прозрачного аморфного стеклообразного образца, что подтверждается данными порошковой рентгенографии. Макросостав полученных стекол  $0.20\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot (0.80 - x)\text{V}_2\text{O}_5 \cdot x\text{BaO}$  с  $x = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$  мол. доли контролировался методом АЭС-ИСП, результаты анализа приведены в табл. 1.

**Рентгенофазовый анализ.** Рентгенограммы приготовленных порошков стекол записывали на дифрактометре XRD-6000 фирмы Shimadzu (излучение  $\text{CuK}\alpha$ , геометрия съемки на отражение, шаг сканирования  $0.02^\circ$ ,  $2\theta = 10^\circ\text{--}60^\circ$ ).

**Плотность и КТР.** Плотность стекол определяли методом гидростатического взвешивания в воде при температуре  $294 \pm 0.5$  К. Погрешность определения составляла  $\pm 0.01$  г/см<sup>3</sup> при чувствительности цифровых весов  $10^{-4}$  г.

ТКЛР стекол определяли на горизонтальном dilatометре из кварцевого стекла с точностью  $\pm 0.1 \times 10^{-6}$  К<sup>-1</sup>. Для расчетов по модели использована известная взаимосвязь объемного и линейного КТР:  $\text{КТР} = 3\text{ТКЛР}$ .

**Спектроскопические исследования.** Спектр пропускания стекол измеряли на спектрофотометре SF-2000 UV/vis (LOMO, Россия) в диапазоне длин волн 0.2–1.1 мкм и на ИК-фурье-спектрометре ФТ-801 (SIMEX, Россия) в диапазоне 7–1.8 мкм. Толщина образцов составляла 2–3 мм.

**Термический анализ.** Стекла  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--V}_2\text{O}_5\text{--BaO}$  исследовали на приборе DSC 404 F1 Pegasus, откалиброванном по стандартной методике с использованием сертифицированных эталонов, рекомендуемых фирмой NETZSCH. Измерения проводились в наиболее инертных к таким стеклам платиновых тиглях в потоке высокочистого и осушенного  $\text{Ar}$  80 мл/мин при скорости нагревания 5 К/мин на образцах в форме дисков массой около 30 мг. Аппаратура и методика позволили выполнить измерения с погрешностями: 0.2 К для температур превращений, 1% для энтальпий переходов, а также определить удельную теплоемкость стекол в диапазоне температур 300–900 К с погрешностью менее 3%. Измерение удельной теплоемкости в интервале 300–900 К выполнено по стандартной методике с использованием поставляемого фирмой NETZSCH эталонного образца

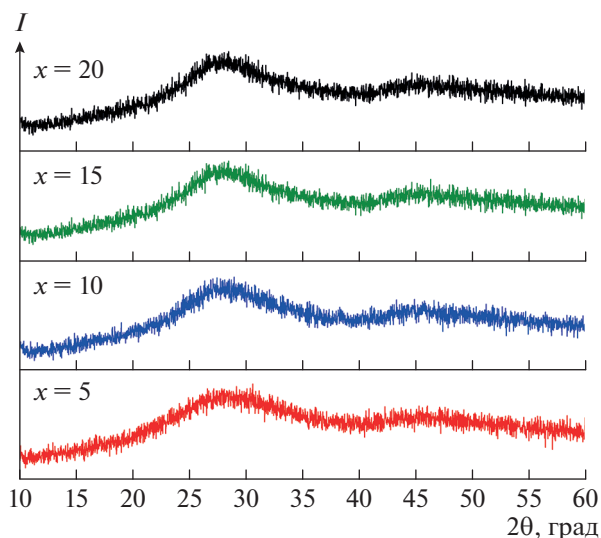


Рис. 1. Рентгенограммы стекол  $20\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot (80 - x)\text{V}_2\text{O}_3 \cdot x\text{BaO}$ .

$\text{Al}_2\text{O}_3$  с известной теплоемкостью. Полученные значения теплоемкости соответствуют химической формуле  $0.20\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot (0.80 - x)\text{V}_2\text{O}_3 \cdot x\text{BaO}$  ( $x = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Рентгенофазовый анализ** (рис. 1) подтвердил аморфную природу всех образцов.

**Оптические спектры пропускания** образцов стекол с различным содержанием  $\text{BaO}$ , представленные на рис. 2, свидетельствуют об их прозрачности в диапазоне  $0.38\text{--}3.4\ \mu\text{м}$ .

Авторы [8] отмечают, что содержание групп  $[\text{OH}]$  в ИК-спектре таких стекол зависит от концентрации бора. Переплавление стекол с выдержкой при  $1223\ \text{K}$  в течение  $5\ \text{ч}$  не приводит к снижению концентрации ионов гидроксила. Существование групп  $[\text{VO}_4]$  в стеклах с высоким содержанием висмута может быть связано с наличием атомов кислорода в составе  $[\text{OH}]$  [5].

**Теплоемкость и характеристики стеклования.** В исследованной серии стекол  $20\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot (80 - x)\text{V}_2\text{O}_3 \cdot x\text{BaO}$  ( $x = 5, 10, 15, 20\ \text{мол. \%}$ ) величина скачка теплоемкости уменьшается с увеличением содержания оксида бария (рис. 3), что может быть связано с соответствующим уменьшением содержания оксида бора.

Обработка данных по теплоемкости и расчет СТФ выполнены в рамках модельно-статистического подхода, основанного на квазичастичных

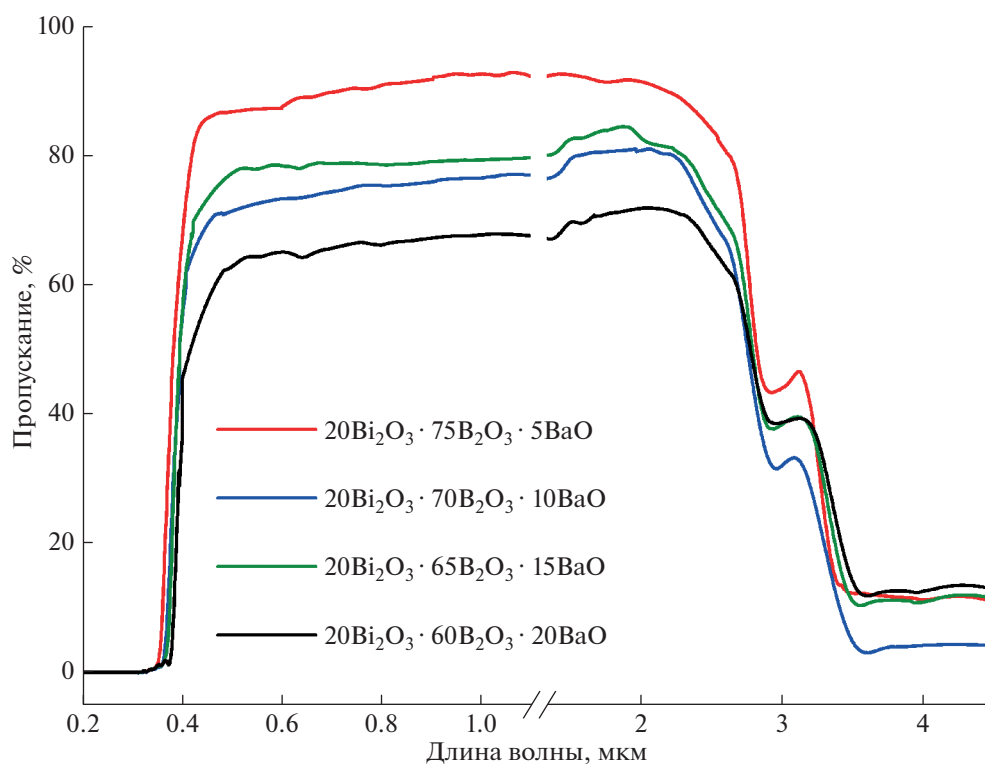


Рис. 2. Спектры пропускания стекол  $20\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot (80 - x)\text{V}_2\text{O}_3 \cdot x\text{BaO}$ .

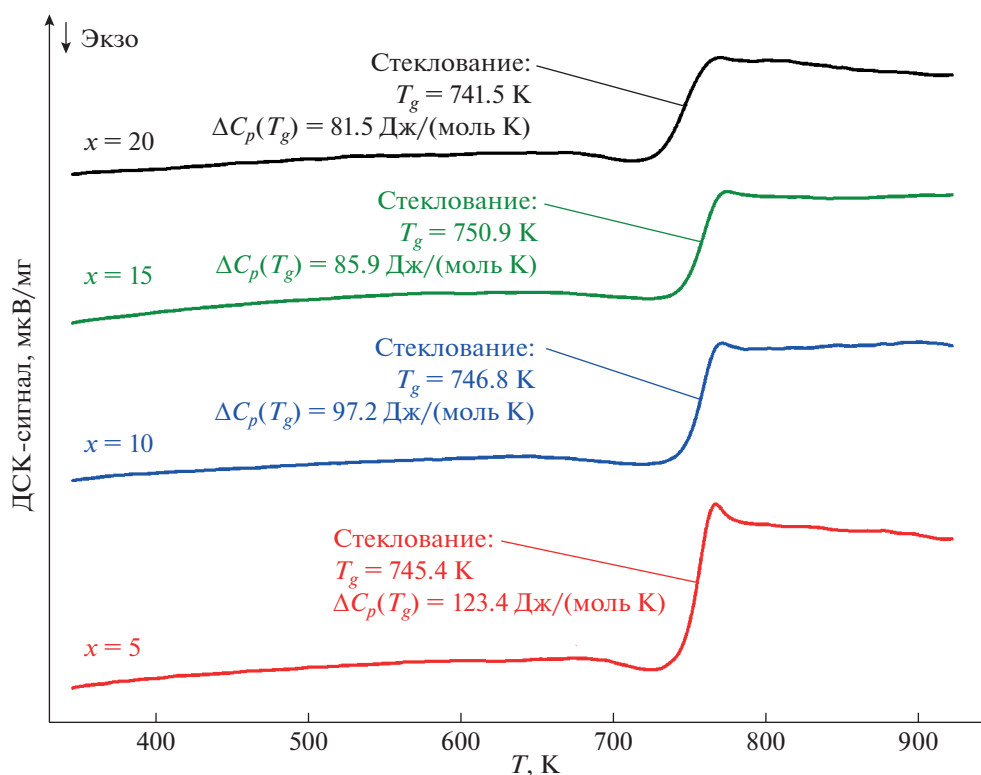


Рис. 3. Кривые ДСК стекол  $20\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot (80 - x)\text{V}_2\text{O}_5 \cdot x\text{BaO}$  при скорости нагрева 5 К/мин.

представлениях, отражающих природу тепловых возмущений в стекле и расплаве [21–26].

Результаты расчета (линия) и экстраполяции (пунктир) теплоемкости по найденным методом нелинейной регрессии параметрам статистической модели в сравнении с измеренными значениями теплоемкости для серии стекол  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--V}_2\text{O}_5\text{--BaO}$  представлены на рис. 4. Значения параметров модели приведены в табл. 2, а их зависимости от содержания оксида бария показаны на рис. 5.

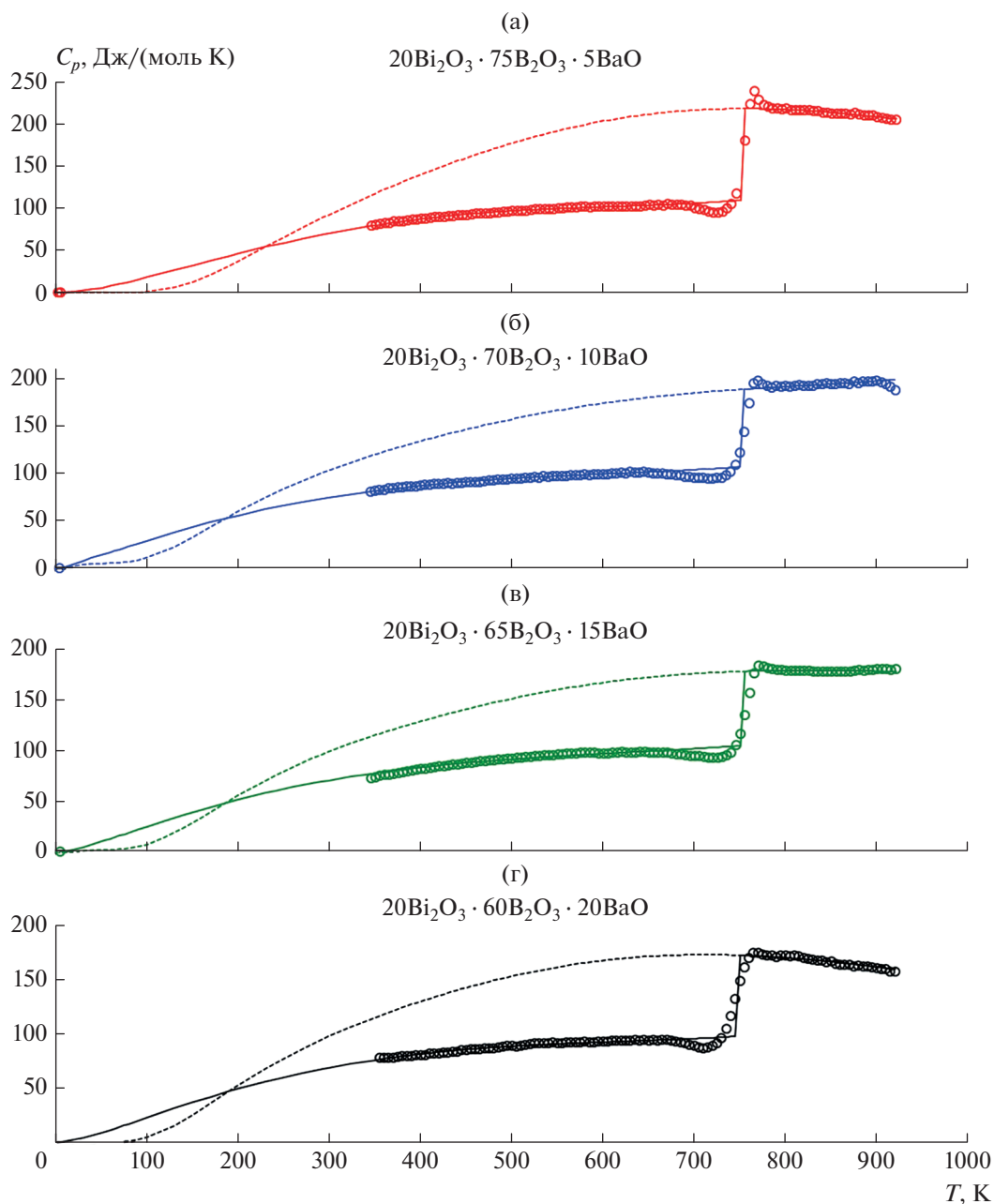
Использование приведенных в Приложении аналитических выражений модельно-статистической теории при найденных параметрах, обеспечивающих хорошее описание измеренных значений  $C_p^\circ$ , позволяет, кроме  $C_p^\circ$ , рассчитать СТФ: энтальпию  $H^\circ(T) - H_1^\circ(0)$ , энтропию  $S^\circ(T) - S_1^\circ(0)$ , энергию Гиббса  $G^\circ(T) - H_1^\circ(0)$  с возможностью их экстраполяции как в низкотемпературную область до 0 К, так и в область расплава. Отметим, что ненулевые значения при 0 К характеризуют избыточные энтальпию, энтропию и энергию Гиббса стекла.

**Плотность и КТР.** В табл. 3 представлены измеренные значения плотности стекла и расчетное

Таблица 2. Параметры статистической модели, характеризующие стеклообразное и переохлажденное жидкое состояния стекол  $0.20\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot (0.80 - x)\text{V}_2\text{O}_5 \cdot x\text{BaO}$

x	0.05	0.10	0.15	0.20
$m_0$	14.55	14.1	13.65	13.20
$h^*$ , К	974.62	808.49	766.46	851.54
$s^*$	0.495	0.344	0.285	0.390
$p$	4.36	4.68	5.82	4.64
$d_0$	1.97	1.76	1.88	1.97
$t$	3.10	2.76	2.53	2.87
$m_e$	0.21	0.57	0.57	0.20
$\theta_e$ , К	64.7	58.3	49.5	47.3
$\alpha_e$	0.001	0.044	0.027	0.001

Примечание. Суммарное число степеней свободы, равное утроенному числу атомов в формульной единице вещества:  $m_0 = 3(0.2 \cdot 5 + (0.8 - x) \cdot 5 + x \cdot 2) = m + m_e$ , в свою очередь равно числу акустических и эйнштейновских мод;  $h^*$ ,  $s^*$  – энтальпийный и энтропийный параметры квазичастиц, соответствующих акустическим модам;  $p$  – параметр парастатистики, определяющий соотношение вакансионных Френкеля и Шотки;  $d_0$  и  $t$  определяют “критическую” зависимость параметра внутренней размерности  $d = d_0 / (1 - (T/T_g)^t)$  для стекла ( $T < T_g$ );  $\theta_e$  и  $\alpha_e$  – характеристическая температура и параметр ангармонизма  $m_e$  эйнштейновских мод.



**Рис. 4.** Измеренные значения теплоемкости (значки) и результат их обработки (пунктирные линии) для образцов  $0.20\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot (0.80 - x)\text{B}_2\text{O}_3 \cdot x\text{BaO}$ .

значение КТР стекол. По результатам измерений наблюдается увеличение плотности и КТР при увеличении содержания оксида бария.

Модельно-статистическая теория стеклообразующих систем кроме калорических функций включает в себя температурные зависимости плотности и КТР, выражения которых представлены в части II Приложения. Единый набор параметров квазичастиц как результат совместной обработки данных калориметрических и волюметрических

**Таблица 3.** Экспериментально измеренные плотности и КТР стекол  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--B}_2\text{O}_3\text{--BaO}$

BaO, мол. %	$\rho_{293\text{ K}}$ , г/см <sup>3</sup> ( $\pm 0.01$ )	КТР $\times 10^6$ , К <sup>-1</sup> ( $\pm 0.30$ )
5	4.31	19.44
10	4.55	20.77
15	4.72	22.11
20	4.95	22.86

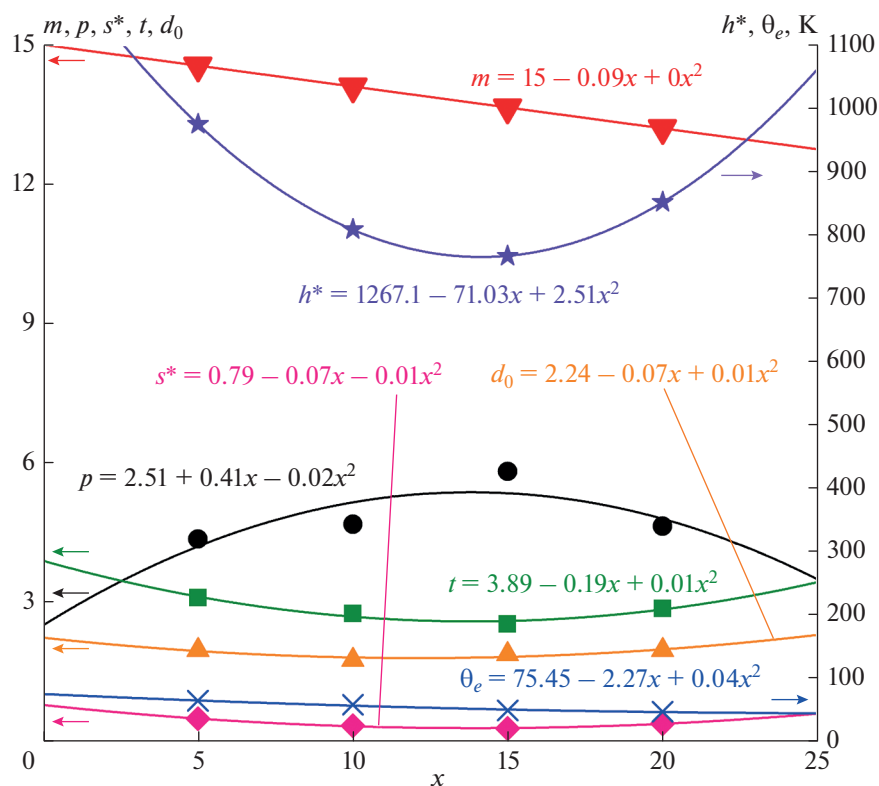


Рис. 5. Корреляционные зависимости параметров модели от содержания оксида бария в образцах  $0.20\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot (0.80 - x)\text{V}_2\text{O}_5 \cdot x\text{BaO}$ .

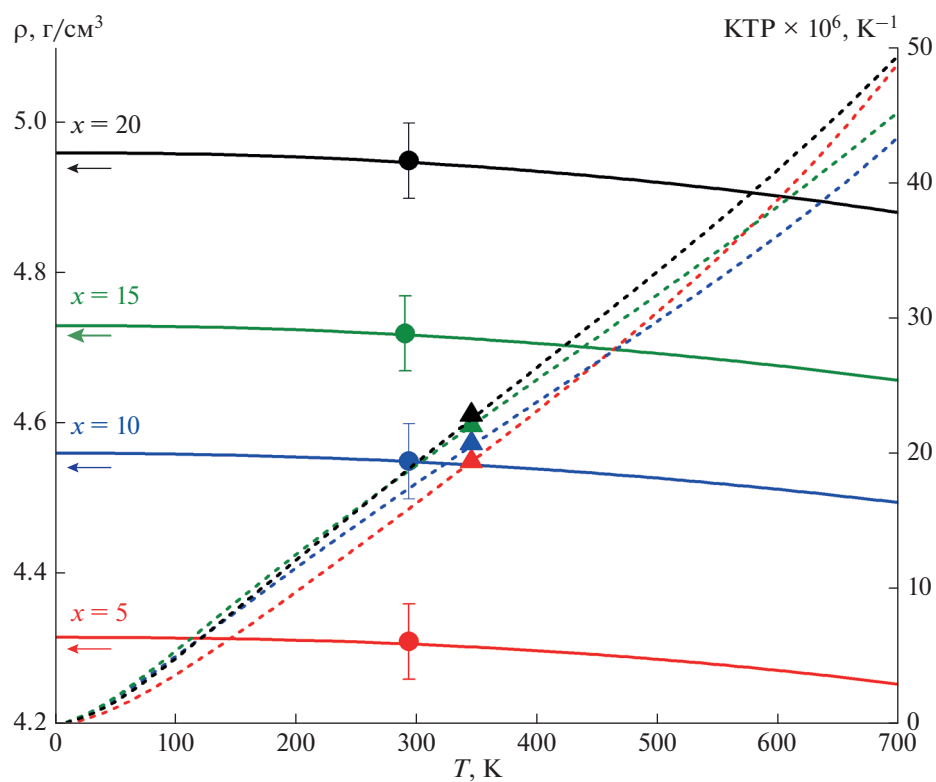


Рис. 6. Температурные зависимости плотности (сплошные линии) и КТР (пунктирные линии) для стекол  $0.20\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot (0.80 - x)\text{V}_2\text{O}_5 \cdot x\text{BaO}$  (значки — измеренные значения плотности и КТР с погрешностями  $\pm 0.01 \text{ г/см}^3$  и  $\pm 0.3 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$  соответственно).

Таблица 4. Объемные параметры элементарных возбуждений стекол

Стекло	$V_0$ , см <sup>3</sup> /моль	$\Delta V^* \times 10^2$ , см <sup>3</sup> /моль
0.20Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 0.75B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 0.05BaO	35.39	4.71
0.20Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 0.70B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 0.10BaO	34.48	5.16
0.20Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 0.65B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 0.15BaO	34.13	5.39
0.20Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 0.60B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 0.20BaO	33.39	5.94

Примечание. Параметры  $V_0$ ,  $\Delta V^*$  отнесены к акустическим степеням свободы.

измерений содержит объемные параметры элементарных возбуждений (табл. 4), дополняющие модельные параметры табл. 2, и тем самым по формулам (П11)–(П14) определяет температурные зависимости плотности  $\rho(T)$  и КТР( $T$ ) (рис. 6).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для спектроскопически и рентгенографически охарактеризованных образцов стеклообразующей системы 0.20Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · (0.80 –  $x$ )B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ·  $x$ BaO ( $x = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$ ) методом ДСК изучены теплоемкость стекла, переохлажденного расплава и характеристики стеклования, а также измерены плотность (гидростатическое взвешивание) и КТР (дилатометрия).

Параметры модельно-статистической теории стекла и расплава, найденные при совместной обработке данных калориметрического и волюметрического эксперимента, позволили

- определить СТФ  $C_p^\circ(T)$ ,  $H^\circ(T) - H_1^\circ(0)$ ,  $S^\circ(T) - S_1^\circ(0)$ ,  $G^\circ(T) - H_1^\circ(0)$  в температурной области от  $T \rightarrow 0$  до 900 К;

- рассчитать температурные зависимости плотности и КТР исходя из опорных значений, измененных при комнатной температуре;

- осуществить теоретически обоснованную экстраполяцию калорических и волюметрических функций в низкотемпературную область до 0 К для определения, в частности, важной термодинамической характеристики  $S^\circ(298.15)$ ;

- получить корреляционные зависимости параметров модели от содержания оксида бария.

Полученные данные – необходимая исходная информация для применения методов химической термодинамики, включая ее неравновесную часть, при анализе и прогнозировании процессов получения стеклокристаллических материалов с использованием перспективной стеклообразующей системы Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–BaO–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 20-73-10110.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Saritha D., Markandeya Y., Salagram M., Vithal M., Singh A.K., Bhikshamaiah G. Effect of Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on Physical, Optical and Structural Studies of ZnO–Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Glasses // J. Non-Cryst. Solids. 2008. V. 354. P. 5573–5579. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrsol.2008.09.017>
2. Barbier J., Cranswick L.M.D. The Non-Centrosymmetric Borate Oxides, MBi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (M = Ca, Sr) // J. Solid State Chem. 2006. V. 179. P. 3958–3964. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2006.08.037>
3. Barbier J., Penin N., Denoyer A., Cranswick L.M.D. BaBiBO<sub>4</sub>, a Novel Noncentrosymmetric Borate Oxide // Solid State Sci. 2004. V. 7. P. 1055–1061. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2004.11.031>
4. Bubnova R.S., Krivovichev S.V., Filatov S.K., Egorysheva A.V., Kargin Y.F. Preparation, Crystal Structure and Thermal Expansion of a New Bismuth Barium Borate, BaBi<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>10</sub> // J. Solid State Chem. 2007. V. 180. P. 596–603. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2006.11.001>
5. Rada S., Culea E., Rus V. Spectroscopic and Quantum Chemical Investigation of the 4Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Glass Structure // J. Mater. Sci. 2008. V. 43. P. 6094–6098. <https://doi.org/10.1007/s10853-008-2949-7>
6. Becker P. Thermal and Optical Properties of Glasses of the System Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // Cryst. Res. Technol. 2003. V. 38. P. 74–82. <https://doi.org/10.1002/crat.200310009>
7. Stehle C., Vira C., Hogan D., Feller S., Affatigato M. Optical and Physical Properties of Bismuth Borate Glasses Related to Structure // Phys. Chem. Glas. 1998. V. 39. P. 83–86.
8. Егорышева А.В., Володин В.Д., Скориков В.М. Стеклообразование в системе Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–BaO // Неорганические материалы. 2008. Т. 44. № 11. С. 1397–1401.
9. Денисов В.М., Белоусова Н.В., Денисова Л.Т. Бораты висмута // Журн. Сибирского федерального ун-та. 2013. Т. 6. № 2. С. 132–150.
10. Жереб В.П., Бабицкий Н.А., Бермешев Т.В., Шубин А.А., Сидорак А.В. Стеклообразование в Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Термическая стабильность и структура стекол // Журн. Сибирского федерального ун-та. 2014. Т. 7. № 3. С. 371–382.

11. *Saritha D., Markandeya Y., Salagram M., Vithal M., Bhikshamaiah G.* Effect of  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  on Physical, Optical and Structural Studies of  $\text{ZnO}-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$  Glasses // *J. Non-Cryst. Solids.* 2008. V. 354. P. 5573–5579. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2008.09.017>
12. *Rani S., Kundu R.S., Ahlawat N., Punia S., Sangwan K.M., Rani K.* Bismuth Modified Physical and Optical Properties of Barium Boro-Tellurite Glasses // *AIP Conf. Proc.* 2019. № 2115. 030255. <https://doi.org/10.1063/1.5113094>
13. *Каргин Ю.Ф., Жереб В.П., Егорышева А.В.* Диаграмма метастабильного состояния системы  $\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$  // *Журн. неорган. химии.* 2002. Т. 47. № 8. С. 1362–1364.
14. *Sayyed M.I., Issa S.A.M., Tekin H.O., Saddeek Y.B.* Comparative Study of Gamma-Ray Shielding and Elastic Properties of  $\text{BaO}-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$  and  $\text{ZnO}-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$  Glass Systems // *Mater. Chem. Phys.* 2018. V. 217. P. 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.06.034>
15. *Saddeek Y.B., Gaafar M.S.* Physical and Structural Properties of Some Bismuth Borate Glasses // *Mater. Chem. Phys.* 2009. V. 115. P. 280–286. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.12.004>
16. *Филатов С.К., Александрова Ю.В., Шепелев Ю.Ф., Бубнова Р.С.* Структура оксобората висмута  $\text{Bi}_4\text{B}_2\text{O}_9$  при 20, 200 и  $450^\circ\text{C}$  // *Журн. неорган. химии.* 2007. Т. 52. № 1. С. 26–33.
17. *Егорышева А.В., Скорицов В.М., Володин В.Д., Мыслицкий О.Е., Каргин Ю.Ф.* Фазовые равновесия в системе  $\text{BaO}-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$  // *Журн. неорган. химии.* 2006. Т. 51. № 12. С. 2078–2082.
18. *Балуева К.В., Плехович А.Д., Кутын А.М., Суханов М.В.* Термодинамический анализ кристаллизационной устойчивости стекол  $\text{Ge}-\text{S}-\text{Bi}$  // *Журн. неорган. химии.* 2021. Т. 66. № 8. С. 1046–1053. <https://doi.org/10.31857/S0044457X2108002X>
19. *Fujita S., Tanabe S.* Thermal Quenching of  $\text{Ce}^{3+}$ : YAG Glass-Ceramic Phosphor // *Conf. on Lasers and Electro-Optics. Pacific Rim.* 2009. P. TUP6\_20. <https://doi.org/10.1109/cleopr.2009.5292444>
20. *Fujita S., Tanabe S.* Fabrication, Microstructure and Optical Properties of  $\text{Er}^{3+}$ : YAG Glass-Ceramics // *Opt. Mater.* 2010. V. 32. P. 886–890. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2010.01.014>
21. *Balueva K.V., Kut'in A.M., Plekhovich A.D., Motorin S.E., Dorofeev V.V.* Thermophysical Characterization of  $\text{TeO}_2-\text{WO}_3-\text{Bi}_2\text{O}_3$  Glasses for Optical Applications // *J. Non-Cryst. Solids.* 2021. V. 553. P. 120465. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120465>
22. *Kut'in A.M., Plekhovich A.D., Balueva K.V., Dorofeev V.V.* Effects of  $\text{Er}_2\text{O}_3$  Content on Heat Capacity, Thermodynamic Functions and Vitrification Characteristics of  $\text{Er}^{3+}$ -Doped Tellurite Glass // *J. Non-Cryst. Solids.* 2018. V. 480. P. 95–99. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.06.020>
23. *Kut'in A.M., Plekhovich A.D., Balueva K.V., Sukhanov M.V., Skripachev I.V.* Standard Thermodynamic Functions of  $\text{GeS}_x\text{Bi}$  ( $1 < x < 2$ ) Glasses // *J. Non-Cryst. Solids.* 2019. V. 509. P. 74–79. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.12.030>
24. *Кутын А.М., Плехович А.Д., Балуева К.В., Дорофеев В.В.* Характеристики стеклования и термодинамические функции стекол  $(1-x)(0.75\text{TeO}_2-0.25\text{WO}_3) + x\text{La}_2\text{O}_3$  // *Неорган. материалы.* 2018. Т. 54. № 7. С. 744–751. <https://doi.org/10.1134/S0020168518070075>
25. *Kut'in A.M., Plekhovich A.D., Balueva K.V., Motorin S.E., Dorofeev V.V.* Thermal Properties of High Purity Zinc-Tellurite Glasses for Fiber-Optics // *Thermochim. Acta.* 2019. V. 673. P. 192–197. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2019.01.027>
26. *Кутын А.М., Маркин А.В., Дорофеев В.В., Моисеев А.Н.* Термодинамические свойства стекол  $(\text{TeO}_2)_{0.95-n-z}(\text{ZnO})_z(\text{Na}_2\text{O})_n(\text{Bi}_2\text{O}_3)_{0.05}$  // *Неорган. материалы.* 2011. Т. 47. № 10. С. 1257–1263. <https://doi.org/10.1134/s0020168511090135>