

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЕКОЛ СИСТЕМЫ $\text{Na}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ТВЕРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

© Л. Ф. Папко¹, М. В. Дяденко¹, А. В. Кузьмин^{2,3},
Д. А. Крайнова^{2,3}, Н. С. Саетова², А. А. Расковалов^{2*}

¹ Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

² Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург

³ Уральский федеральный университет, Екатеринбург

* E-mail: other@el.ru

Поступила в Редакцию 15 октября 2018 г.

После доработки 27 марта 2019 г.

Принята к публикации 25 мая 2019 г.

Синтезирован ряд стеклообразных составов системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, перспективных для применения в качестве стеклогерметиков твердооксидных топливных элементов. Подтверждение стеклообразного состояния выполнено с помощью рентгенофазового анализа, аттестация составов — атомно-эмиссионной спектроскопией с индуктивно связанной плазмой. Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) рассчитан из данных дилатометрии, его величина находится в пределах $(69-77) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ и растет с увеличением отношения концентраций MgO и Al_2O_3 . Расчеты ТКЛР методом Аппена дают результаты, заниженные на 5–8% относительно экспериментальных. Температурные зависимости теплоемкости исследованных стекол определены с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии и рассчитаны по правилу Коппа–Неймана. Сравнение расчетных величин с экспериментальными показало, что для данных систем правило Коппа–Неймана выполняется с достаточной точностью. Сделан вывод о чувствительности различных методов к определению температуры стеклования.

Ключевые слова: стеклогерметик; твердооксидный топливный элемент; алюмосиликаты; температура стеклования; температурный коэффициент расширения; теплоемкость

DOI: 10.1134/S0044461819070041

Топливный элемент — это электрохимическое устройство, которое преобразует химическую энергию взаимодействия топлива с окислителем непосредственно в электрическую энергию. Одной из наиболее перспективных разновидностей топливных элементов являются твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ), которые отличает высокая толерантность к топливу. Важной операцией при изготовлении твердооксидных топливных элементов является организация прочного и герметичного соединения единичных элементов в батарею. Для этих целей используют специальные высокотемпературные герметики, которые способны выдерживать рабочие температуры ТОТЭ (до 900°C). Кроме того, материалы стеклогерметиков должны быть совме-

стимыми по термическому расширению со склеиваемыми элементами, устойчивы в окислительных и восстановительных атмосферах, обладать высоким электросопротивлением и хорошей адгезией к склеиваемым поверхностям. Среди высокотемпературных герметиков наибольшее распространение получили силикатные стекла и стеклокристаллические материалы [1–4]. Стеклогерметики положительно зарекомендовали себя в качестве герметизирующих материалов при температурах порядка 600–900°C. В процессе работы ТОТЭ они могут переходить в вязкотекучее состояние, что позволяет снизить напряжение между функциональными частями ТОТЭ. Кроме того, силикатные стекла устойчивы в окислительных и восстановительных атмосферах, обладают высоким

электрическим сопротивлением и хорошей адгезией к керамике и металлам.

Многостороннего сочетания вышеуказанных свойств силикатных стеклогерметиков удастся достичь только для многокомпонентных систем, поэтому экспериментальный подбор составов становится трудоемкой задачей. В связи с этим резко возрастает значимость предсказательных методов определения свойств силикатных стекол. Одним из наиболее важных свойств, определяющих выбор стекла, используемого в качестве стеклогерметика, является совместимость температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) самого стекла с ТКЛР склеиваемых материалов. Как было отмечено ранее, работа ГТГЭ осуществляется при высоких температурах, что требует исследования и других свойств, определяющих термическое поведение системы, например теплоемкости.

Целью данной работы являлось изучение теплофизических свойств стекол, предназначенных для склейки и герметизации единичных ячеек твердооксидных топливных элементов, и сравнение этих свойств с расчетными. В качестве объекта исследований выбрана система $\text{Na}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2-\text{SiO}_2$, поскольку предварительные результаты исследований подобных стекол показали, что величина их ТКЛР подходит для «склеивания» керамического электролита на основе оксида циркония, стабилизированного иттрием (YSZ), с металлическими интерконнекторами. Величина температурного коэффициента линейного расширения для разрабатываемых стекол должна быть близкой к значению этого параметра для электролитной керамики, в данном случае – YSZ ($-105 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ [5]). Кроме того, алюмосиликатные стекла с большим содержанием оксида кремния относительно устойчивы к кристаллизации, что позволяет

реализовать достаточный ресурс работы топливного элемента.

Экспериментальная часть

В качестве исходных реактивов для получения алюмосиликатных стекол в системе $\text{Na}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ использовали кварцевый песок, глинозем (х.ч.), соду кальцинированную (х.ч.), оксид магния (х.ч.), оксид бора (х.ч.) и оксид титана (ос.ч.). Все компоненты шихты были взяты в определенном соотношении и тщательно перемешаны в фарфоровой ступке в течение 15 мин. Было приготовлено шесть различных составов, различающихся соотношением оксидов кремния, алюминия и магния (табл. 1).

Варка алюмоборосиликатных стекол осуществлялась в алуновом тиглях при температуре $1470 \pm 25^\circ\text{C}$ в газовой пламенной печи периодического действия. При достижении однородности стекломассы тигли извлекали из печи и осуществляли формование изделий отливкой в формы. После выработки образцы подвергали отжигу в муфельной печи марки SNOL 6,7/1100 (SNOL, Литва) при температуре $570 \pm 10^\circ\text{C}$ с выдержкой при максимальной температуре в течение 1 ч.

Для определения рентгеноаморфного состояния образцов и наличия в них кристаллических включений использовался рентгенофазовый анализ (РФА), который проводили на рентгеновском дифрактометре D/MAX-2200VL/PC (Rigaku, Япония) с монохроматором в CuK_α -излучении. Рентгенограммы изучали на измельченных образцах в интервале углов $2\theta = 10-70^\circ$.

Определение химического состава стекол проводили спектрально-эмиссионным методом с индуктив-

Таблица 1

Заданные составы исследованных стекол в системе $\text{Na}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

№ состава	Содержание, мол%					
	SiO_2	Al_2O_3	MgO	B_2O_3	TiO_2	Na_2O
1	60	5	15	6	3	11
2	55	5	20	6	3	11
3	55	10	15	6	3	11
4	50	5	25	6	3	11
5	50	10	20	6	3	11
6	50	15	15	6	3	11

но связанной плазмой на спектрометре Optima 4300 DV (Perkin Elmer, США).

Определение температурного коэффициента линейного расширения в интервале температур 20–300°C осуществлялось с применением электронного горизонтального дилатометра DIL 402PC фирмы Netzsch (Германия). Полученные первичные данные обработаны с помощью прилагающегося программного обеспечения. Погрешность измерения составила $\pm 0.2 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$.

Термический анализ проводили методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на калориметре STA 449 F1 JUPITER фирмы Netzsch (Германия). Измерения проводили в платиновых тиглях в атмосфере аргона со скоростью продувки 20 мл·мин⁻¹. Скорость нагрева составляла 10 град·мин⁻¹; измерения были проведены в температурном интервале 50–1000°C. Анализ спектров ДСК и разделение пиков проводили с помощью пакета программ Netzsch Proteus.

Для определения удельной теплоемкости применяли метод ДСК с использованием калориметра DSC 404 F3 Pegasus фирмы Netzsch (Германия). Образцы исследуемых стекол массой 30–50 мг помещали в платиновые тигли с крышкой и устанавливали в калориметр. Затем измерительная камера калориметра подвергалась вакуумированию с последующим заполнением аргоном со скоростью подачи 10 мл·мин⁻¹. Перед началом измерения проводилась выдержка образцов при температуре 30°C. Измерения осуществлялись с постоянной скоростью нагрева 10 град·мин⁻¹. Обработка результатов измерения осуществлялась с использованием программного обеспечения Netzsch Proteus.

Вязкость стекол в интервале 10^4 – 10^9 Па·с определяли методом сжатия сплошного стеклянного цилиндра с применением вискозиметра PPV-1000 (Orton, США). При измерении фиксировалась деформация образца следующих размеров: диаметр 6–12 мм, высота 3–6 мм. При проведении испытания образец помещали между параллельными металлическими пластинами с платиновой фольгой, предотвращающей прилипание стеклянного цилиндра к металлу при нагревании до температуры $1000 \pm 5^\circ\text{C}$. Погрешность определения вязкости составила 4–6%.

Обсуждение результатов

Все составы получены в виде монолитных прозрачных образцов бурой окраски различных тонов. Данное окрашивание может быть обусловлено примесями железа, содержащимися в исходных реактивах, что подтверждают результаты химического анализа

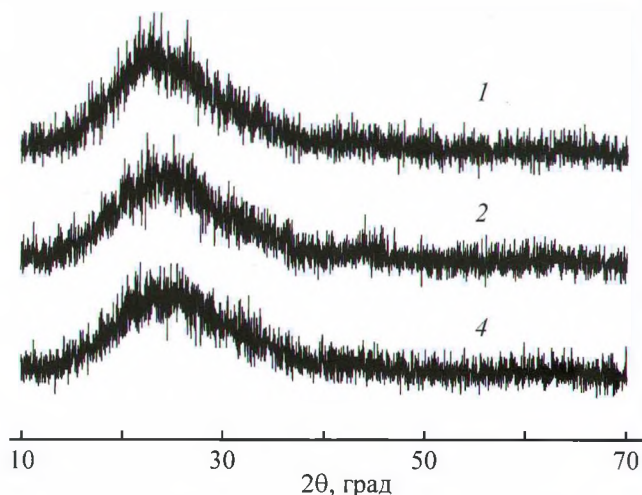


Рис. 1. Рентгенограммы стекол некоторых составов в системе $\text{Na}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ (составы № 1, 2 и 4 согласно табл. 1).

(табл. 2). Во всех образцах присутствует ~0.1 мол% Fe_2O_3 . Ионы железа могут образовывать различные хромофорные комплексы, например $\text{Fe}^{2+}-\text{O}-\text{Ti}^{4+}$ [6]. Кроме оксида железа в испытуемых составах обнаружена примесь оксида кальция, порядка 0.1–0.2 мол%. В целом полученные составы близки к заданным, наибольшее отличие проявляется для оксида бора, однако для бора данный метод допускает большую погрешность. Согласно данным РФА (рис. 1) образцы являются рентгеноаморфными.

Термическое поведение стекол исследовано с помощью метода ДСК (рис. 2). На рисунке отчетливо виден перегиб, соответствующий процессу стеклования. За температуру стеклования (T_g) принята температура середины данного перегиба (рис. 2). Температуры стеклования составили 622, 633 и

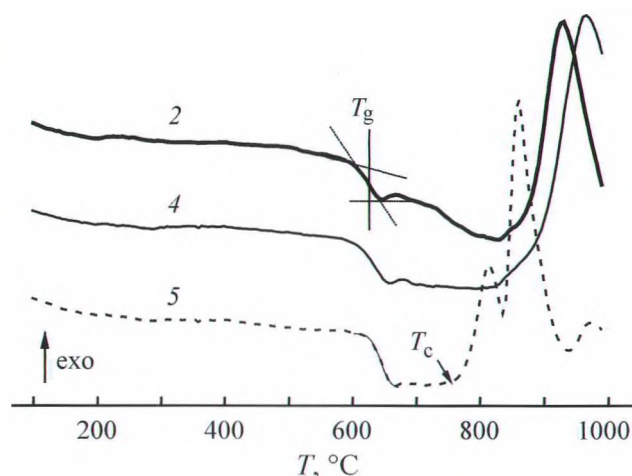


Рис. 2. ДСК-кривые стекол № 2, 4 и 5 (табл. 1).

Таблица 2
Результаты химического анализа некоторых образцов

Состав	Содержание, мол%							
	Al_2O_3	B_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	SiO_2	TiO_2
Состав № 1								
Анализ	6.7	9.3	0.2	0.1	13.1	9.2	57.7	3.6
Заданный	5.0	6.0	—	—	15.0	11.0	60.0	3.0
Состав № 2								
Анализ	6.9	9.7	0.1	0.1	17.4	9.1	52.8	3.8
Заданный	5.0	6.0	—	—	20.0	11.0	55.0	3.0
Состав № 4								
Анализ	6.7	8.2	0.1	0.1	22.2	8.4	50.8	3.6
Заданный	5.0	6.0	—	—	25.0	11.0	50.0	3.0
Состав № 5								
Анализ	12.8	9.6	0.1	0.1	18.9	8.5	46.2	3.7
Заданный	10.0	6.0	—	—	20.0	11.0	50.0	3.0

644°C для составов № 2, 4 и 5 соответственно. После стеклования наблюдается экзотермический эффект, соответствующий кристаллизации, за температуру кристаллизации (T_c) принята координата начала кристаллизационного пика. Температуры кристаллизации составили 835, 825 и 750°C для составов № 2, 4 и 5 соответственно. В данном ряду составов устойчивость стекла к кристаллизации ($T_c - T_g$) уменьшается. Состав № 2 обладает наибольшей устойчивостью из-за большего содержания оксида кремния, являющегося хорошим стеклообразователем.

Дилатометрические измерения показали, что относительное термическое расширение испытываемых стекол изменяется практически линейно, а следовательно, ТКЛР, определенный по наклону данных кривых, почти не зависит от температуры. По результатам измерения ТКЛР опытных стекол выявлено, что в зависимости от состава его величина изменяется в пределах $(69-77) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$. При этом определяющее влияние на термическое расширение оказывает соотношение $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$. Расчет ТКЛР стекол проведен по методике, приведенной в работе [4], с использованием табличных данных.* Из сравнения графиков (рис. 3) видно, что рассчитанные ТКЛР полностью повторяют экспериментальный тренд, но занижены на 5–8%.

С ростом соотношения $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ величина ТКЛР опытных стекол также увеличивается (рис. 3). Это связано с тем, что при увеличении концентрации оксида магния растет доля связи $\text{Si}-\text{O}-\text{Mg}$, которая менее прочная, чем связь $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ [7]. Оксиды щелочноземельных металлов выступают в качестве

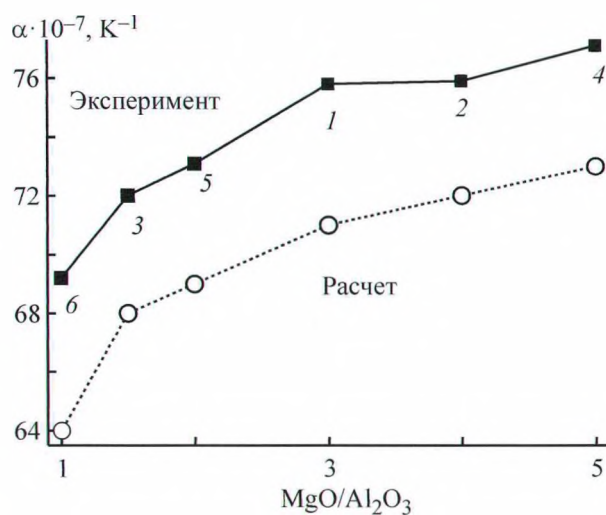


Рис. 3. Влияние отношения $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ на величину ТКЛР в стеклах системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ (экспериментальные данные и расчет методом Аппена).

Цифры — номера составов согласно табл. 1.

* Аппен А. А. Химия стекла. Л.: Химия, 1974. С. 310.

«донора» кислорода для оксидов алюминия и бора, которые в отсутствие O^{2-} будут в структуре стекла представлены преимущественно в виде групп $[AlO_6]$ и $[BO_3]$ и не будут способствовать полимеризации каркаса стекла. В случае избытка MgO будет выполнять деполимеризирующую функцию в структуре стекла и способствовать увеличению доли немостиговых атомов кислорода, определяющих рост ТКЛР.

Поскольку величина ТКЛР исследованных стекол является приемлемой для склеивания устройств на основе керамического YSZ, в работе была получена серия склеек при температуре $1100^\circ C$, представляющих собой гладкую однородную каплю стекла, хорошо смачивающую поверхность подложки YSZ (описание методики приведено в работе [4]). Из рентгенограмм полученных склеек (рис. 4) видно, что кроме рефлексов керамической подложки YSZ присутствуют рефлексы Al_2O_3 и (или) TiO_2 , выкристаллизовавшихся из объема стекла.

Теплоемкость отражает способность материалов поглощать тепло с ростом температуры и определяет их тепловую инерцию. Для стекол, используемых в качестве стеклогерметиков, величина теплоемкости будет характеризовать скорость выравнивания температуры по толщине изделия и как следствие определять термостойкость топливного элемента. Температурные зависимости удельной теплоемкости

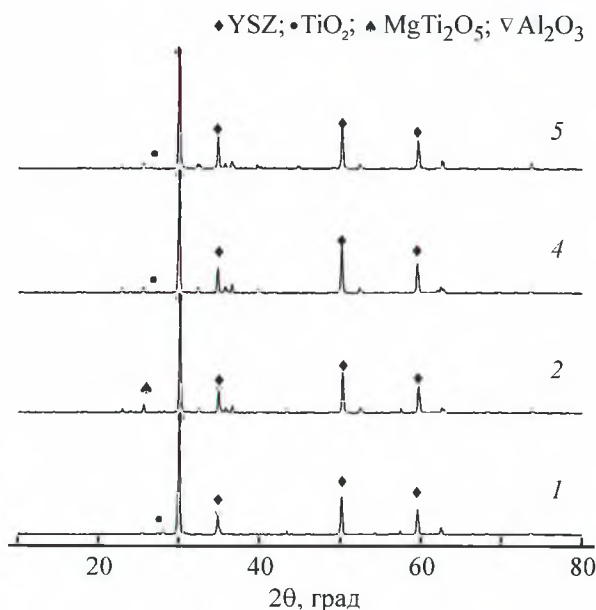


Рис. 4. Рентгенограммы склеек YSZ с различными составами стекол (табл. 1) при температуре $1100^\circ C$.

Кроме рефлексов подложки (YSZ) также присутствуют рефлексы Al_2O_3 (составы № 1 и 2), TiO_2 (составы № 1, 4 и 5) и $MgTi_2O_5$ (состав № 2).

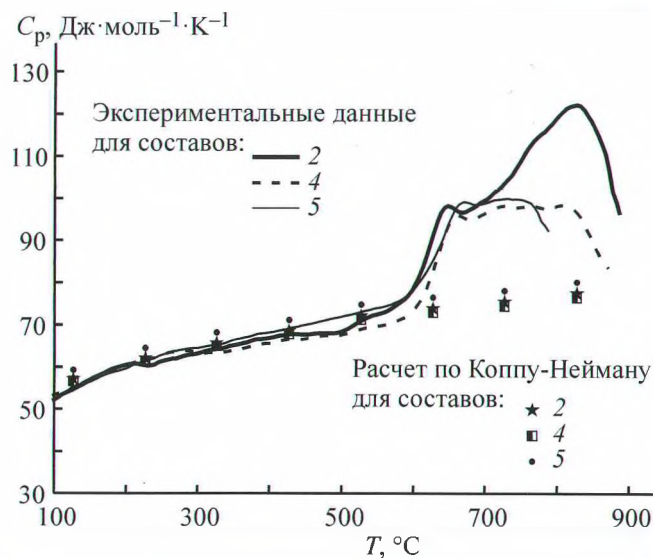


Рис. 5. Температурные зависимости мольной изобарной теплоемкости стекол № 2, 4 и 5 (табл. 1), полученные экспериментально с помощью ДСК (сплошные линии) и рассчитанные по правилу Коппа–Неймана (точки).

были получены с помощью ДСК и затем пересчитаны в мольные теплоемкости согласно формульному составу табл. 1 и молекулярным массам составляющих оксидов.* В качестве формульной единицы для молекулярных масс стекол коэффициент перед соответствующим оксидом равнялся его мольной доле, например, формула для стекла № 2 была принята $0.11Na_2O \cdot 0.2MgO \cdot 0.03TiO_2 \cdot 0.05Al_2O_3 \cdot 0.06B_2O_3 \cdot 0.55SiO_2$. Для оценки корректности измеренной теплоемкости она была сравнена с теплоемкостью, полученной по аддитивному правилу Коппа–Неймана. В оригинальной трактовке правило Коппа–Неймана [8] предписывает рассчитывать мольную теплоемкость химического соединения путем сложения теплоемкостей соответствующих элементов с учетом их стехиометрических коэффициентов. Данное правило не всегда работает, однако его точность может быть существенно повышена, если рассматривать сложное соединение как сумму бинарных и складывать теплоемкости последних [9–12]. Аналогичный подход применялся в том числе и к оксидным стеклам [13]. На рис. 5 приведены мольные изобарные теплоемкости нескольких составов, полученные экспериментально и с помощью правила Коппа–Неймана. Для вычисления теплоемкости пользовались теплоемко-

* Лурье Ю. Ю. Справочник по аналитической химии. М.: Химия, 1989. С. 26.

Таблица 3

Удельная ($C_{p,s}$, Дж·г⁻¹·К⁻¹), молярная ($C_{p,m}$, Дж·моль⁻¹·К⁻¹) и молярная по Коппу–Нейману ($C_{p,K}$, Дж·моль⁻¹·К⁻¹) теплоемкости составов № 2, 4 и 5 (табл. 1) системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

T, К	Состав № 2			Состав № 4			Состав № 5		
	$C_{p,s}$	$C_{p,m}$	$C_{p,K}$	$C_{p,s}$	$C_{p,m}$	$C_{p,K}$	$C_{p,s}$	$C_{p,m}$	$C_{p,K}$
400	0.92	54.8	57.1	0.94	55.0	56.6	0.88	54.3	59.3
500	1.02	60.4	62.0	1.05	61.7	61.4	0.99	61.3	64.4
600	1.08	64.1	65.6	1.08	63.5	64.9	1.06	65.2	68.2
700	1.14	67.7	68.5	1.13	66.4	67.7	1.12	69.0	71.2
800	1.19	71.2	72.1	1.18	69.0	71.3	1.18	73.0	74.8
Жидкость*	1.64	97.6	92.8	1.65	97.2	92.9	1.61	99.3	96.8

* Температура, при которой стекло находится в вязкотекучем состоянии; здесь полагается, что теплоемкость стекол в этом состоянии не зависит от температуры. Для вычисления теплоемкости по правилу Коппа–Неймана использовали теплоемкость соответствующих оксидов в жидком агрегатном состоянии, которая также не зависит от температуры.

стями составляющих простых оксидов.* Для оксида кремния были взяты теплоемкости, соответствующие стеклообразному оксиду кремния. Теплоемкость исследованных стекол изменяется плавно до 580–600°C. До этих температур теплоемкость очень близка к величинам, полученным по аддитивному правилу Коппа–Неймана (рис. 5), сравнение численных величин приведено в табл. 3. Разница между теплоемкостью, рассчитанной по Коппу–Нейману, и экспериментальными данными не превышает 5% (кроме состава № 5 при 400 К, в целом при низких температурах наблюдается худшее совпадение экспериментальных данных и расчета).

Выше 580–600°C происходит резкий рост теплоемкости, связанный, по всей видимости, с переходом стеклования, когда стекло из твердого агрегатного состояния переходит в состояние переохлажденной жидкости [14]. Данный процесс должен сопровождаться уменьшением вязкости, что и наблюдается экспериментально (рис. 6). При температурах порядка 680–700°C вязкость исследуемых стекол начинает падать с 10^{10} П и достигает величин 10^6 – 10^7 П. Отметим, что различные методы дают различную величину температуры стеклования. Так, согласно росту теплоемкости эта температура находится в пределах 580–600°C, согласно ДСК — 620–640°C, а падение вязкости начинается при температурах

680–700°C. Вполне вероятно, что падение вязкости начинается раньше, но диапазон измерений прибора не позволяет это зафиксировать. Примеры различной чувствительности методов к температуре стеклования есть и в литературе, обычно сравнивают результаты ДСК и дилатометрии, и последняя оказывается чувствительнее [15, 16].

После резкого увеличения на температурных зависимостях теплоемкости наблюдается флуктуация значения возле некоторой постоянной величины (рис. 5). По-видимому, в жидком состоянии теплоемкость

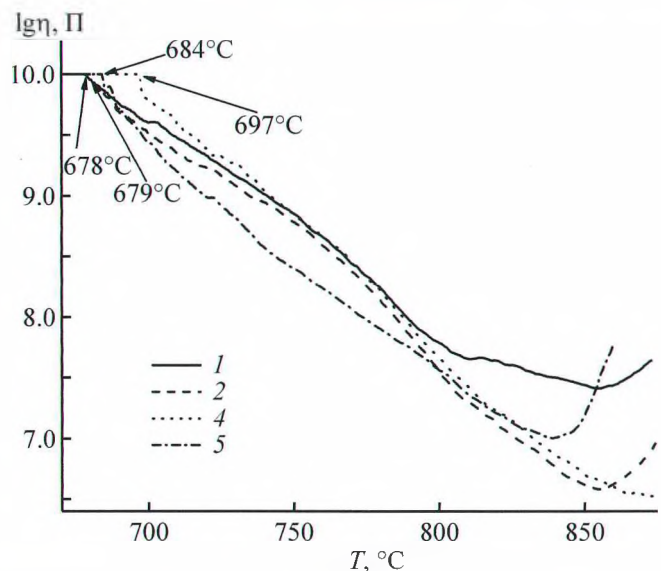


Рис. 6. Зависимость логарифма вязкости стекол № 1, 2, 4, 5 (табл. 1) системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ от температуры.

* Гурвич Л. В., Вейц И. В., Медведев В. А. и др. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справ. изд. / Ред. В. П. Глушко. М.: Наука, 1981. Т. 2, кн. 2-я, С. 334; Т. 3, кн. 2-я, С. 27, 110, 264; Т. 4, кн. 2-я, С. 105, 360.

стекло мало зависит от температуры, а флуктуации и дальнейшие резкие эффекты обусловлены процессами кристаллизации. Значения теплоемкости на «плато» были усреднены и сравнены с результатами, полученными по правилу Коппа–Неймана (табл. 3). Для вычислений по Коппу–Нейману были взяты теплоемкости жидких SiO_2 , Al_2O_3 , V_2O_5 , TiO_2 , MgO и Na_2O .^{*} Их величины соответственно равны: 83.5, 162.9, 133.05, 100.0, 84.0 и 100.0 Дж·моль⁻¹·К⁻¹. Почти для всех перечисленных оксидов, согласно данным справочника, теплоемкость выше температуры плавления не зависит от температуры (для оксида бора — слабо уменьшается, была взята теплоемкость в точке плавления). Разница между теплоемкостью по Коппу–Нейману и экспериментальным данным не превышает 5% для образцов № 2, 4 и 5.

Выводы

Исследован ряд теплофизических свойств алюмосиликатных стекол в системе $\text{Na}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{V}_2\text{O}_5-\text{SiO}_2$. Показано, что ТКЛР данных стекол находится в пределах $(69-77) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$, что позволяет использовать их в качестве стеклогерметиков для склейки единичных ячеек топливных элементов на основе керамики стабилизированного оксида циркония. Расчеты ТКЛР методом Аппена дают те же зависимости от состава, но абсолютные величины занижены на 5–8%. Для целей герметизации твердооксидных топливных элементов такое небольшое расхождение позволяет применять данный подход к выбору концентраций компонентов стекла. В ходе работы было продемонстрировано, что метод ДСК, измерение теплоемкости и вязкости имеют различную чувствительность к переходу стеклования. Наиболее чувствительным методом обнаружения температуры стеклования является измерение теплоемкости. Сравнение экспериментально измеренных величин теплоемкости стекол в твердом состоянии с рассчитанными по правилу Коппа–Неймана из простых оксидов показало отличную сходимость, расхождение не превышает 5%. После перехода стекла в вязкотекучее состояние (состояние переохлажденной жидкости) теплоемкость системы является примерно постоянной и также может быть с достаточно высокой точностью определена по правилу Коппа–Неймана. Для вычисления теплоемкости стекол в вязкотекучем

состоянии необходимо использовать величины теплоемкостей простых оксидов в жидком агрегатном состоянии.

Благодарности

Аналитическая часть работы выполнена с использованием оборудования ЦКП «Состав вещества» ИВТЭ УрО РАН.

Финансирование работы

Исследования выполнены в рамках совместного проекта Белорусского фонда фундаментальных исследований и Российского фонда фундаментальных исследований (грант БРФФИ № X17PM-033, грант РФФИ № 17-58-04116).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация об авторах

Папко Людмила Федоровна, к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-6728-009X

Дяденко Михаил Васильевич, к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-4555-9401

Кузьмин Антон Валериевич, к.х.н., ORCID: 0000-0002-0700-662X

Крайнова Дарья Андреевна, ORCID: 0000-0002-0886-3885

Саетова Науля Саетовна, к.х.н., ORCID: 0000-0002-0721-3944

Расковалов Антон Александрович, к.х.н., ORCID: 0000-0002-6634-4135

Список литературы

- [1] Donald I. W., Mallison P. M., Metcalfe B. L., Gerrard L. A., Fernie J. A. // J. Mater. Sci. 2011. V. 46. P. 1975–2000.
- [2] Ley K. L., Krumpal M., Kumar R., Meiser J. H. // J. Mater. Res. 1996. V. 11. P. 1489–1493.
- [3] Sabato A. G., Cempura G., Montinaro D., Chrysanthou A., Salvo M., Bernardo E., Secco M., Smeacetto F. // J. Power Sources. 2016. V. 328. P. 262–270.
- [4] Крайнова Д. А., Жаркинова С. Т., Саетова Н. С., Расковалов А. А., Кузьмин А. В., Еремин В. А., Шертобитова Е. А., Першина С. В., Дяденко М. В., Xiaoa Z., Shengling J. // ЖПХ. 2017. Т. 90. № 8. С. 1047–1053 [Krainova D. A., Zharkinova S. T.,

^{*} Гурвич Л. В., Вейц И. В., Медведев В. А. и др. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справ. изд. / Ред. В. П. Глушко. М.: Наука, 1981. Т. 2, кн. 2-я, С. 334; Т. 3, кн. 2-я, С. 27, 110, 264; Т. 4, кн. 2-я, С. 105, 360.

- Saetova N. S., Raskovalov A. A., Kuz'min A. V., Eremin V. A., Sherstobitova E. A., Pershina S. V., Dyadenko M. V., Xiaoa Zhang, Shengling Jiang // *J. Appl. Chem.* 2017. V. 90. N 8. P. 1278–1284].
- [5] Hayashi H., Saitou T., Maruyama N., Inaba H., Kawamura K., Mori M. // *Solid State Ionics*. 2005. V. 176. P. 613–619.
- [6] Северенков И. А., Строганова Е. Е., Орлова Л. А., Воропаева М. В., Алексеева Л. А. // *Успехи в химии и хим. технологии*. 2015. Т. XXIX. № 7. С. 68–70.
- [7] Fneich H., Gaumer N., Chaussedent S., Blanc W., Mehdi A. // *Molecules*. 2018. V. 23. ID1768.
- [8] Kopp H. // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1865. V. 155. P. 71–202.
- [9] Qiu L., White M. A. // *J. Chem. Educ.* 2001. V. 78. P. 1076–1079.
- [10] Leitner J., Chuchvalec P., Sedmidubský D., Strejc A., Abrman P. // *Thermochim. Acta*. 2002. V. 395. P. 27–46.
- [11] Leitner J., Vonka P., Sedmidubsky D., Svoboda P. // *Thermochim. Acta*. 2010. V. 497. P. 7–13.
- [12] Il'ina E. A., Raskovalov A. A., Reznitskikh O. G. // *J. Chem. Thermodyn.* 2019. V. 128. P. 68–73.
- [13] Khalimovskaya-Churkina S. A., Priven A. I. // *Glass Phys. Chem.* 2000. V. 26. P. 531–540.
- [14] Souquet J. L., Perera W. G. // *Solid State Ionics*. 1990. V. 40–41. P. 595–604.
- [15] Pershina S. V., Raskovalov A. A., Antonov B. D., Yaroslavtseva T. V., Reznitskikh O. G., Baklanov Ya. V., Pletneva E. D. // *J. Non-Cryst Solids*. 2015. V. 430. P. 64–72.
- [16] Nechaev G. V., Vlasova S. G., Reznitskikh O. G. // *Glass Phys. Chem.* 2015. V. 41. P. 64–67.