УДК 538.958

КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ И ОРИЕНТАЦИОННАЯ РЕЛАКСАЦИЯ НИТРАТ-ИОНА В СИСТЕМЕ LiNO₃-KNO₃ + Al₂O₃

© 2019 г. М. М. Гафуров^{а, b}, К. Ш. Рабаданов^{а, *}, З. Ю. Кубатаев^а, А. М. Амиров^а, А. Р. Алиев^b, А. Ш. Асваров^b, М. Г. Какагасанов^{a, b}

^аФГБУН Дагестанский научный центр РАН, аналитический центр коллективного пользования, Махачкала, Россия

^bФГБУН Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского НЦ РАН, Махачкала, Россия *e-mail: rksh83@mail.ru

Поступила в редакцию 05.11.2018 г. После доработки 28.11.2018 г. Принята к публикации 23.12.2018 г.

Методами колебательной спектроскопии исследовано влияние наноразмерного порошка оксида алюминия на молекулярно-релаксационные свойства нитрат-иона в расплаве эвтектической смеси 0.42LiNO₃–0.58KNO₃. Показано, что наличие нано-Al₂O₃ приводит к существенному изменению микроструктуры расплава и изменению характера элементарных динамических взаимодействий частиц в них.

Ключевые слова: нитрат лития, нитрат калия, эвтектика, дисперсная система, спектр комбинационного рассеяния, инфракрасное поглощение, колебательная и ориентационная релаксация.

DOI: 10.1134/S0235010619050050

введение

Интерес к исследованиям гетерофазных ионных систем, в том числе ионных расплавов наполненных инертными частицами оксидов, обусловлен несколькими обстоятельствами. Ионный расплав — это жидкость, состоящая из электрически заряженных частиц, поэтому можно ожидать сильные кулоновские взаимодействия между анионом (или катионом) расплава и частицей наполнителя в зависимости от наличия на ее поверхности эффективного положительного или отрицательного заряда. Это обстоятельство, очевидно, будет влиять на микроструктуру расплава вблизи поверхности частиц наполнителя, а, следовательно, и на характер релаксации колебательных возбуждений и ориентационную подвижность молекулярных ионов в межфазной области "ионная жидкость—поверхность частиц твердого наполнителя". Изучение отличительных особенностей молекулярно-релаксационных процессов в указанной области по сравнению с объемом ионного расплава имеет отдельный научный интерес.

С другой стороны, выявление особенностей ионной динамики в гетерофазных системах может служить основой для создания динамической картины их строения и установления механизмов переноса заряда в них, что, несомненно, имеет важное прикладное значение, учитывая широкое использование композитных ионных систем в электрохимических устройствах, таких как аккумуляторные батареи, топливные элементы, конденсаторы и т.д. [1–5].

Целью настоящей работы является изучение влияния оксидного порошка γ-Al₂O₃ на ориентационную и колебательную релаксацию нитрат-иона в расплаве эвтектической смеси 0.42LiNO₃-0.58KNO₃.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для получения композиционной системы были использованы: нитрат лития (ч. д. а., "Экрос"), нитрат калия (х. ч., "Экрос") и γ -Al₂O₃ (99%, "ABCR") с величиной удельной поверхности 120 м²/г и средним размером частиц 15–20 нм. Порошок оксида алюминия для дегидратации предварительно прокаливался в течение 2 ч при температуре 500°С. Для приготовления композитов готовая эвтектическая смесь и оксид нагревались при 250°С, затем тщательно перемешивались в инертной атмосфере. Далее полученные смеси спекались при 250°С в течение часа и быстро охлаждались. После остывания полученный композит измельчался в агатовой ступке и запаивался в ампулы из пирекса. Все работы проводились в сухом перчаточном боксе.

Спектры комбинационного рассеяния (КР) чистой эвтектической смеси и композиционных систем на их основе измерялись на конфокальном КР микроскопе Senterга при лазерном возбуждении ($\lambda = 785$ нм; мощность лазера 100 мВт); апертура 50 × 1000 мкм; спектральный диапазон 75–1530 см⁻¹; используемый объектив микроскопа – 10×; число сканов – 20; время интегрирования каждого скана – 20 с.

Измерения ИК спектров проводились на ИК Фурье спектрометре VERTEX 70 ("Брукер", Германия), в диапазоне волновых чисел 400–4000 см⁻¹, с разрешением 1 см^{-1} с числом сканов 128.

Температурные измерения ИК и КР спектров проводились с использованием специально сконструированных нагревательных приставок в диапазоне температур от 20 до 200°С для ИК спектрометра и от 20 до 350°С – для КР спектрометра [6].

Расчет параметров характеризующих колебательную и ориентационную релакса-

цию NO_3^- в исследуемой системе основан на анализе формы контура полосы, отвечающей полно симметричному внутреннему колебанию $v_1(A)$ в спектрах ИК поглощения комбинационного рассеяния композита LiNO₃-KNO₃ + xAl₂O₃.

Известно, что форма контура колебательной полосы в спектрах конденсированных систем определяется процессами колебательной и ориентационной релаксации [6–10]. Полная ширина полосы может быть представлена как:

$$\delta = \delta_{\rm V} + \delta_{\rm R},\tag{1}$$

где δ – ширина колебательной линии; δ_v , δ_R – вклады в ширину за счет процессов колебательной и ориентационной релаксации. Описание динамики релаксационных процессов в конденсированных средах удобно проводить с использованием временных параметров. Для этого от частотного описания спектра переходят к временному описанию посредством привлечения аппарата временных корреляционных функций (ВКФ), обозначаемых $G_i(t)$ [6]. Колебательная ВКФ $G_{vib}(t)$ может быть представлена как Фурье-образ изотропного контура $I_{iso}(v)$, нормированного на интегральную I_{int} интенсивность, в следующем виде:

$$G_{\rm vib}(t) = \frac{1}{I_{\rm int}} \int_{\Pi_{\rm o_KOHTypy}} I_{\rm iso}(v) \exp(2\pi i c v t) dv.$$
(2)

Существует целый ряд моделей, позволяющих описать колебательную релаксацию в терминах ВКФ [11]. Мы использовали модель Кубо—Ротшильда [4], в которой предполагается, что модуляция частоты осуществляться двумя независимыми процессами, связанными с колебательной дефазировкой. Эти процессы в ионных конденсированных системах протекают с различными скоростями, обусловливая однородное и неоднородное уширение изотропных полос спектра КР. Колебательная ВКФ с учетом однородного и неоднородного уширения может быть записана в следующем виде:

$$G_{\rm vib}(t) = F_{\rm h}(t)F_{\rm i}(t),\tag{3}$$

где

$$F_{\rm h}(t) = \exp\left\{-\Delta\omega_{\rm h}^2 \left[\tau_{\rm c}^2 \left(e^{-t/\tau_{\rm c}} - 1\right) + \tau_{\rm c} t\right]\right\},\tag{4}$$

$$F_{\rm i}(t) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\Delta\omega_{\rm i}^2 t^2\right\}.$$
(5)

Функции $F_{\rm h}(t)$ и $F_{\rm i}(t)$ характеризуют скорости фазовой модуляции частоты; $\Delta \omega_{\rm h}^2$ и $\Delta \omega_{\rm i}^2$ – средние квадраты флуктуации частоты, вызванные указанными выше процессами; $\tau_{\rm c}$ – время корреляции. Из уравнений (3)–(5), используя экспериментально найденные значения $G_{\rm vib}(t)$, а также имея в виду, что второй спектральный момент изотропного контура $M_{\rm vib}(2) = \Delta \omega_{\rm h}^2 + \Delta \omega_{\rm i}^2$, были оценены значения $\Delta \omega_{\rm h}^2$, $\Delta \omega_{\rm i}^2$ и $\tau_{\rm c}$ путем подбора параметров (3)–(5) методом наименьших квадратов. Исходя из значений величин $\Delta \omega_{\rm h}^2$ и $\Delta \omega_{\rm i}^2$, были оценены вклады однородного $\delta_{\rm h} = 4\pi c \Delta \omega_{\rm h}^2 \tau_{\rm c}$ и неоднородного $\delta_{\rm i} = 2(2\ln 2)^{1/2} \Delta \omega_{\rm i}$ уширения линии $v_{\rm I}(A)$, отвечающей полносимметричному колебанию NO₃⁻ в спектре KP.

Кроме того, для линии $v_1(A)$ вклад ориентационного уширения в ИК спектре δ_{R1} может быть оценен по методу, предложенному в [12, 13]. Суть метода состоит на том, что контуры сильно поляризованных линий КР (изотропное рассеяние, ширина δ^{RS}) определяются только процессами колебательной релаксации, а контур полосы ИК поглощения (ширина δ^{IR}), отвечающий тому же колебанию, дополнительно уширяется за счет ориентационных движений молекулярного аниона, и тогда:

$$\tau_{1R} = 1/(\pi c \delta_{R1}) = 1/[\pi c (\delta^{1R} - \delta^{RS})].$$
(6)

Для сравнения нами также определены соответствующие значения характеристических времен τ_{FR} для свободных ротаторов

$$\tau_{\rm FR} = (68/360)2\pi [J/(kT)]^{1/2},\tag{7}$$

и времена между бинарными столкновениями в исследуемых системах

$$\tau_{\rm BC} = J/(2kT\tau_{\rm IR}),\tag{8}$$

где J — момент инерции нитрат-иона. Соотношение между τ_{1R} и τ_{BC} справедливо для модели J-диффузии, т.е. когда предполагается, что переориентация частицы осуществляется посредством малоугловой вращательной диффузии сопутствующая бинарными столкновениями с окружающими частицами. Угловой шаг диффузии

$$\varepsilon = \tau_{\rm BC} \Omega,$$
 (9)

где $\Omega = (kT/J)^{1/2}$ – средняя скорость вращения аниона.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Спектры КР и ИК поглощения исследуемых композитных систем $LiNO_3 - KNO_3 + xAl_2O_3$ (x = 0; 0.5), снятых при комнатной температуре ($T = 25^{\circ}C$) и выше температуры $T_{III} = 140^{\circ}C$ плавления ($T = 150^{\circ}C$), представлены на рис. 1, 2. Известно, что изоли-



Рис. 1. Спектры КР композитов (1 - x)LiNO₃-KNO₃ + xAl_2O_3 (x = 0; 0.5) в области полносимметричного валентного колебания нитрат-иона и результаты их разложения на компоненты с частотами: $I - v_1^a$ (KNO₃) ~ $\sim 1050 \text{ сm}^{-1}$; $2 - v_1^b$ (KNO₃) ~ 1047 cm^{-1} ; $3 - v_1$ (LiNO₃) ~ 1070 cm^{-1} ; $4 - v_1^c \sim 1060 \text{ cm}^{-1}$ при температурах (*a*) $T = 25^{\circ}$ C; (*b*) $T = 150^{\circ}$ C.

рованный молекулярный анион NO₃⁻ (симметрия D_{3h}) характеризуется следующими внутренними колебаниями: $v_1(A)$ – валентное полносимметричное колебание (~1050 см⁻¹), $v_2(B)$ – внеплоскосное деформационное колебание (~820 см⁻¹), $v_3(E)$ – дважды вырожденное асимметричное валентное колебание (~1300 см⁻¹), $v_4(E)$ – дважды вырожденное деформационное колебание (~720 см⁻¹).

Как видно из рис. 1, спектры КР чистой бинарной системы без наполнителя, снятые при $T = 25^{\circ}$ С представляют собой, смесь поликристаллов индивидуальных солей LiNO₃ и KNO₃. При допировании наноразмерным оксидом алюминия контуры колебаний заметно усложняются. В системе LiNO₃–KNO₃ + *x*Al₂O₃ при концентрациях наполнителя x = 0.5 помимо основных пиков, характерных для колебаний индивидуальных нитратов калия и лития, появляется дополнительная, достаточно широкая линия с частотой колебания $v_1^c \sim 1060$ см⁻¹, интенсивность которой возрастает по мере увеличения концентрации Al₂O₃. Мы предполагаем, что данный контур соответствует коле-

баниям нитрат-ионов, локализованных в приповерхностной области Al_2O_3 [4, 5]. В спектрах ИК поглощения чистой бинарной соли (рис. 2, x = 0) при комнатной температуре колебание $v_1(A)$ не активно. Однако, в композиционной системе при

 $0.5 \text{LiNO}_3 - \text{KNO}_3 + 0.5 \text{Al}_2 \text{O}_3$ запрещенная полоса $v_1(A_1')$ становится активным и имеет дуплетный вид. Это говорит о том, что в композиционной системе появилась часть анионов с симметрией, отличной от D_{3h} , а также наноразмерный оксид алюминия одновременно влияет на кристаллическую решетку нитрат лития и нитрата калия.

Что касается расплавленной фазы, колебательный контур $v_1(A)$ становится активным как в чистой бинарной соли, так и в композиционной системе при x = 0.5. При этом как в расплаве чистой бинарной соли, так и в композитах при различных кон-



Рис. 2. Спектры ИК поглощения системы LiNO₃-KNO₃ + xAl₂O₃ в области колебаний $v_1(A'_1)$, $v_2(A''_2)$, $v_4(E')$ при температурах *a*) $t = 25^{\circ}$ C; δ) $t = 150^{\circ}$ C.

центрациях Al_2O_3 контур $v_1(A_1)$ в спектрах КР и ИК поглощения регистрируется в виде одиночной симметричной полосы.

Температурные зависимости полуширин колебаний $v_1(A)$ в спектрах КР и ИК поглощения представлены на (рис. 3). С ростом температуры контуры уширяются вследствие ускорения процессами колебательной и ориентационной релаксаций. Однако, можно заметить, что влияние твердого наполнителя на полуширины колебания $v_1(A)$ композитов в спектрах ИК поглощения и КР не одинаково. Контур $v_1(A)$ в ИК спектре сужается, а в спектре КР уширяется при добавлении в расплав частиц оксида алюминия. Наиболее полную информацию о динамике частиц в расплаве можно получить исследуя контур спектральной полосы. Для более детального описания динамики в исследуемых композитных системах нами были проведены расчеты (табл. 1) молекулярно-релаксационных характеристик по спектрам КР с использованием по приведенным выше формулам (3)–(5).

При допировании оксидом алюминия заметно изменение M_2 и вкладов однородного δ_h и неоднородного уширения δ_i . Как известно [4, 5, 8–11], дефазировка колебаний молекулярного иона в ионной системе может произойти в основном как следствие упругих столкновений с ближайшими соседями за счет случайных изменений расстояний и углов между частицами при неизменном характере самого локального окружения, так и в результате диффузионного перехода молекулярного иона в "новое" локальное положение. Эти процессы в ионных конденсированных системах протекают с различными скоростями, обуславливая однородное и неоднородное уширение изо-



Рис. 3. Температурная зависимость полуширин полносимметричного валентного колебания $v_1(A'_1)$ нитратиона в спектрах ИК поглощения (*a*) и КР (δ).

тропных полос спектра КР. Однородное уширение одинаково для всех молекул и связано с релаксацией колебаний, а неоднородное уширение связано с взаимодействием ионов с окружением и его броуновским движением. Поэтому мы можем выбрать неоднородное уширение в качестве критерия изменения локальной структуры ионной системы [5, 14, 15].

На рис. 4. показаны температурные зависимости неоднородного уширения $v_1(A)$ чистого расплава и композита. На рисунке видно, что вклад неоднородного уширения в композите по сравнению с чистым расплавом уменьшается. Поэтому можем предположить, что вблизи поверхности частиц оксидов уменьшается концентрация ион-ас-

Таблица 1

$x \operatorname{Al}_2 \operatorname{O}_3$	<i>T</i> , °C	ν , cm ⁻¹	δ, см ⁻¹	$M_2, { m cm}^{-2}$	$τ_v$, πc	т _с , пс	$\delta_{\rm h},$ см $^{-1}$	δ_i , см $^{-1}$
0	150	1056.54	17.78	687.20	0.76	0.04	11.2	8.0
	200	1054.89	17.95	820.10	0.73	0.04	12.53	7.24
	250	1053.91	18.11	878.8	0.71	0.03	12.78	7.11
0.5	150	1055.32	18.6	1000.303	0.68	0.037	14	6.7
	200	1054.76	19.00	1134.58	0.66	0.035	14.88	6.24
	250	1053.73	19.01	1193.90	0.65	0.034	15.22	5.96

Спектральные и релаксационные характеристики колебания v_1(A'_1) нитрат-иона в композитах (1 – x)LiNO_3–KNO_3 + xAl_2O_3



Рис. 4. Температурная зависимость неоднородного уширения композита $LiNO_3 - KNO_3 + xAl_2O_3$.

социированных комплексов, характерных для систем с сильным кулоновским взаимодействием [15].

Для оценки влияния наполнителя на поворотную подвижность нитрат-иона в композите были рассчитаны параметры времен ориентационной релаксации с помощью формул (6)–(9) (в табл. 2, 3).

Как мы видим все перечисленные выше параметры, характеризующие ориентационную подвижность нитрат-иона, испытывают значительные изменения в наполненной (дисперсной) системе. Интересно отметить, что при добавлении Al_2O_3 наблюдается рост времени ориентационной релаксации τ_{1R} , также уменьшается величина среднего углового шага диффузии. Это говорит о том, что при допировании бинарной

Таблица 2

<i>Т</i> , К	δ^{IR} , см ⁻¹	δ^{RS} , cm ⁻¹	$\tau_{1R} \cdot 10^{-12}, c$	$\tau_{FR} \cdot 10^{-13}, c$	$\tau_{BC} \cdot 10^{-14}, c$	τ_{1R}/τ_{FR}	є, град
413	23.31	17.87	1.952	3.85	2.70	5.07	4.76
423	23.69	17.89	1.83	3.80	2.80	4.81	5.02
433	24.11	17.86	1.70	3.76	2.95	4.523	5.34
443	24.58	17.95	1.60	3.72	3.06	4.31	5.61
453	25.15	17.99	1.48	3.67	3.24	4.03	5.99
463	25.84	18.02	1.36	3.64	3.46	3.74	6.47
473	27.44	18.07	1.13	3.60	4.06	3.15	7.67

Параметры ориентационной релаксации нитрат-иона в чистой бинарной системе LiNO₃-KNO₃

Таблица З

<i>Т</i> , К	δ^{IR} , см ⁻¹	$\delta^{\text{RS}}, \text{cm}^{-1}$	$\tau_{1R} \cdot 10^{-12}, c$	$\tau_{FR} \cdot 10^{-13}, c$	$\tau_{BC} \cdot 10^{-14}, c$	$\tau_{1R}^{}/\tau_{FR}^{}$	ε, град
413	21.57	18.57	3.55	3.85	1.48	9.21	2.62
423	21.65	18.58	3.46	3.80	1.49	9.09	2.66
433	21.92	18.60	3.19	3.76	1.57	8.50	2.84
443	22.24	18.77	3.05	3.72	1.61	8.22	2.94
453	22.49	18.97	3.02	3.676	1.59	8.22	2.94
473	23.11	19.28	2.77	3.60	1.66	7.71	3.13

Параметры ориентационной релаксации нитрат-иона в системе 0.5LiNO₃-KNO₃ + 0.5Al₂O₃

эвтектической смеси LiNO₃-KNO₃ порошками оксида алюминия происходит снижение вращательной подвижности анионов NO₃.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Очевидно, что твердый наполнитель по-разному влияет на процессы ориентационной и колебательной релаксации в исследуемом композите, а именно ориентацион-

ная подвижность NO_3^- уменьшается, в то время как скорость релаксации его колебательного возбуждения возрастает. Иными словами локализация части анионов вблизи поверхности частиц твердого наполнителя приводит к частичной дезактивации их ориентационной подвижности при одновременном росте частоты динамических взаимодействий (в том числе с поверхностью частиц оксида) приводящие к сбою фазы колебательной моды $v_1(A)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Béléké A.B., Mizuhata M., Deki S. Anomalous properties of molten alkali nitrates coexisting with aluminum oxides by hetero-phase effect // Vibr. Spectroscopy. 2006. **40.** \mathbb{N} 1. P. 66–79.

2. Закирьянова И.Д., Николаева Е.В., Бове А.Л., Антонов Б.Д. Электропроводность и спектры комбинационного рассеяния света дисперсных систем α-Al₂O₃ – расплав Li₂CO₃–Na₂CO₃–K₂CO₃–NaCl // Расплавы. 2018. № 1. С. 80–87.

3. Cros C., Castagnet R., Hagenmuller. Electrical conductivity enhancement in an eutectic system containing dispersed second phase particles // Solid State Ionics. 1988. **31**. P. 209–213.

4. Гафуров М.М., Рабаданов К.Ш., Атаев М.Б., Алиев А.Р., Амиров А.М., Кубатаев З.Ю. Спектры комбинационного рассеяния и строение систем (1-x)RbNO₃ + xAl_2O_3 // Журнал структурной химии. 2015. **56**. № 3. С. 457–465.

5. Рабаданов К.Ш., Гафуров М.М., Алиев А.Р., Амиров А.М., Какагасанов М.Г. Спектры комбинационного рассеяния света и молекулярно-релаксационные свойства гетерофазных стекол и расплавов К, Са/СН₃СОО, Li, K, Cs/CH₃COO // Журн. прикладной спектроскопии. 2018. **85.** № 1. С. 69–75.

6. Гафуров М.М. Методы и техника измерения колебательных спектров солевых расплавов // В сб.: Оптические, фотоэлектрические и релаксационные явления в конденсированных средах. Махачкала. 1990. С. 29–56.

7. Гафуров М.М., Алиев А.Р. Механизм релаксации колебательных возбуждений NO₃⁻ в кристаллах и расплавах нитратов // Расплавы. 2000. № 2. С. 41–46.

8. Rothschild W.G. Dynamics of molecular liquids. New York: Wiley. 1984.

9. Wang C. H. Spectroscopy of condensed media. Dynamics of molecular interactions. Orlando: Academic, 1985.

10. Bartoli F.J., Litovitz T.A. Analysis of orientational broadening of Raman lines // J. Chem. Phys. 1972. 56. P. 404–412.

11. Рабаданов К.Ш., Гафуров М.М., Алиев А.Р., Ахмедов И.Р., Какагасанов М.Г., Кириллов С.А. Колебательная дефазировка перхлорат-иона в расплаве LiClO₄ // Расплавы. 2011. № 3. С. 67–76.

12. Погорелов В.Е., Лизенгевич А.И., Кондиленко И.И., Буян Г.П. Колебательная релаксация в конденсированных средах. // УФН. 1979. **127**. № 4. С. 683–704.

13. Гафуров М.М., Гаджиев А.З. Зависимость ориентационной подвижности нитрат-иона от температуры и катионного состава расплавленных нитратов // Журн. при-кладной спектроскопии. 1987. **46**. № 4. С. 660–663.

14. Surovtsev N.V., Adichtchev S.V., Malinovsky V.K. Transition from singlemolecule to cooperative dynamics in a simple glass former: Raman line-shape analysis // Phys. Rev. E. 2007. **76**. 021502.

15. Gafurov M.M., Aliev A.R., Ataev M.B., Rabadanov K.Sh. The peculiarities of spectral manifestations of high-voltage electric discharge in different phase states of ion systems // Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2013. **114**. P. 563– 568.

Vibrational and Orientational Relaxation of Nitrate-Ion in the System LiNO₃-KNO₃ + Al₂O₃

M. M. Gafurov^{1, 2}, K. Sh. Rabadanov¹, Z. Yu. Kubatayev¹, A. M. Amirov¹, A. R. Aliev², A. Sh. Asvarov², M. G. Kakagasanov^{1, 2}

¹Dagestan Scientific Center, Analytical Center for Collective Use, Makhachkala, Russia ²Institute of Physics, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia

The influence of nanosized aluminum oxide powder on the molecular relaxation properties of nitrate ion in the melt of a 0.42LiNO₃-0.58KNO₃ eutectic mixture was studied by vibrational spectroscopy. It is shown that the presence of nano-Al₂O₃ leads to a significant change in the microstructure of the melt and a change in the nature of the elementary dynamic interactions of the particles in them.

Keywords: lithium and potassium nitrate, eutectic, dispersed system, Raman spectrum, infrared absorption, vibrational and orientational relaxation

REFERENCES

1. Béléké A.B., Mizuhata M., Deki S. Anomalous properties of molten alkali nitrates coexisting with aluminum oxides by hetero-phase effect // Vibr. Spectroscopy. 2006. **40.** \mathbb{N} 1. P. 66–79.

2. Zakir'yanova I.D., Nikolayeva Ye.V., Bove A.L., Antonov B.D. Elektroprovodnost' i spektry kombinatsionnogo rasseyaniya sveta dispersnykh sistem α -Al₂O₃ – rasplav Li₂CO₃–Na₂CO₃–K₂CO₃– NaCl [Electrical Conductivity and Raman Spectra of Dispersed α -Al₂O₃ Systems – Li₂CO₃– Na₂CO₃–K₂CO₃–NaCl Melt] // Rasplavy. 2018. № 1. P. 80–87. (In Russian).

3. Cros C., Castagnet R., Hagenmuller. Electrical conductivity enhancement in an eutectic system containing dispersed second phase particles // Solid State Ionics. 1988. **31**. P. 209–213.

4. Gafurov M.M., Rabadanov K.SH., Atayev M.B., Aliyev A.R., Amirov A.M., Kubatayev Z.Yu. Spektry kombinatsionnogo rasseyaniya i stroyeniye sistem (1 - x)RbNO₃ + xAl₂O₃ [Raman spectra and system structure (1-x)RbNO₃ + xAl₂O₃] // Zhurnal strukturnoy khimii. 2015. **56**. No 3. P. 457–465. (In Russian).

5. Rabadanov K.SH., Gafurov M.M., Aliyev A.R., Amirov A.M., Kakagasanov M.G. Spektry kombinatsionnogo rasseyaniya sveta i molekulyarno-relaksatsionnyye svoystva geterofaznykh stekol i rasplavov K, Ca/CH₃COO, Li, K, Cs/CH₃COO [Raman scattering spectra and molecular relaxation properties of heterophase glasses and K, Ca/CH₃COO, Li, K, Cs/CH₃COO melts] // Zhurnal prikladnoy spektroskopii. 2018. **85.** \mathbb{N} 1. P. 69–75. (In Russian).

6. Gafurov M.M. Metody i tekhnika izmereniya kolebatel'nykh spektrov solevykh rasplavov [Methods and techniques for measuring the vibrational spectra of salt melts] // V sb.: Opticheskiye, fotoelektricheskiye i relaksatsionnyye yavleniya v kondensirovannykh sredakh [In book: Optical, photoelectric and relaxation phenomena in condensed media]. Makhachkala. 1990. P. 29–56. (In Russian).

7. Gafurov M.M., Aliyev A.R. Mekhanizm relaksatsii kolebatel'nykh vozbuzhdeniy NO3 v kristal-

lakh i rasplavakh nitratov [The mechanism of relaxation of the vibrational excitations of NO_3^- in crystals and melts of nitrates] // Rasplavy. 2000. No 2. P. 41–46. (In Russian).

8. Rothschild W.G. Dynamics of molecular liquids. New York: Wiley. 1984.

9. Wang C.H. Spectroscopy of condensed media. Dynamics of molecular interactions. Orlando: Academic, 1985.

10. Bartoli F.J., Litovitz T.A. Analysis of orientational broadening of Raman lines // J. Chem. Phys. 1972. 56. P. 404–412.

11. Rabadanov K.SH., Gafurov M.M., Aliyev A.R., Akhmedov I.R., Kakagasanov M.G., Kirillov S.A. Kolebatel'naya defazirovka perkhlorat-iona v rasplave LiClO_4 [Oscillatory dephasing of perchlorate ion in a melt of LiClO_4] // Rasplavy. 2011. No 3. P. 67–76. (In Russian).

12. Pogorelov V.Ye., Lizengevich A.I., Kondilenko I.I., Buyan G.P. Kolebatel'naya relaksatsiya v kondensirovannykh sredakh [Oscillatory relaxation in condensed matter] // UFN. 1979. 127. \mathbb{N} 4. P. 683–704. (In Russian).

13. Gafurov M.M., Gadzhiyev A.Z. Zavisimost' oriyentatsionnoy podvizhnosti nitrat-iona ot temperatury i kationnogo sostava rasplavlennykh nitratov [Dependence of orientational mobility of nitrate ion on temperature and cationic composition of molten nitrates] // Zhurnal prikladnoy spektroskopii. 1987. **46**. № 4. P. 660–663. (In Russian).

14. Surovtsev N.V., Adichtchev S.V., Malinovsky V.K. Transition from single-molecule to cooperative dynamics in a simple glass former: Raman line-shape analysis // Phys. Rev. E. 2007. **76**. 021502.

15. Gafurov M.M., Aliev A.R., Ataev M.B., Rabadanov K.Sh. The peculiarities of spectral manifestations of high-voltage electric discharge in different phase states of ion systems // Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2013. **114**. P. 563–568.