

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИБРОМИДНЫХ КОМПЛЕКСОВ ТЕЛЛУРА¹

© 2024 г. Л.Н. Зеленина^{a, b*}, Т.П. Чусова^a, Н.А. Коробейников^a, А.Н. Усольцев^a

^a Институт неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия

^b Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

*e-mail: zelenina@niic.nsc.ru

Поступила в редакцию 29.06.2023

После доработки 29.06.2023

Принята к публикации 10.07.2023

Давление насыщенного и ненасыщенного пара Br_2 над твердыми полибромтеллуратами состава $(\text{cation})_2\{[\text{TeBr}_6](\text{Br}_2)\}$ ($\text{cation} = \text{Me}_4\text{N}^+, \text{Et}_4\text{N}^+$) измерено методом статической тензиметрии с мембранными нуль-манометрами в широком интервале температур. Из экспериментальных данных определена термическая стабильность этих соединений ($T_{\text{разл}}$), доказана физико-химическая модель парообразования, рассчитаны термодинамические характеристики процесса испарения брома, связывающего фрагменты анионов полибромтеллуратов ($\Delta_{\text{пр}}H^\circ$, $\Delta_{\text{пр}}S^\circ$, $\ln p = f(T)$), а также оценены энергии связи октаэдров $[\text{TeBr}_6]$ с Br_2 ($\Delta_{\text{св}}G^\circ$). Проведено сравнение полученных результатов с изученными ранее полибромидными комплексами висмута.

Ключевые слова: полибромидные комплексы теллура, статическая тензиметрия, давление пара, термодинамические характеристики.

DOI: 10.31857/S0044453724010083, **EDN:** SFZTWC

ВВЕДЕНИЕ

История химии полигалогенидных соединений насчитывает уже более двух сотен лет [1], тем не менее интерес к ним не угасает [2, 3]. В последние несколько лет было получено достаточно большое количество экспериментальных результатов, среди которых особенно можно отметить развитие концепции галогенной связи [4, 5] для описания специфических взаимодействий в подобных системах. Существенно расширен ряд менее стабильных полихлоридных соединений с анионами различного состава [6–11]. Серия работ группы Шевелькова [12–16] в области полийодидных соединений, в том числе соединений висмута(III) и сурьмы(III), представляет интерес как с точки зрения фундаментального понимания природы галогенных взаимодействий, так и для потенциальных применений в фотовольтаических системах. Практическое применение полибромидных соединений связано в основном с цинк-бромными проточными редокс-батареями, в которых бромиды крупных органических катионов используются для связывания молекулярного брома, тем самым увеличивая ресурс аккумулятора [17–19]. Для оптимизации получения функциональных материалов необходимо изуче-

ние термодинамических свойств этих соединений: термической стабильности полигалогенидных комплексов и количественных характеристик возможных химических превращений, происходящих в процессе работы с этими соединениями.

Ранее нашей группой была получена серия полибромидов теллура(IV) [20, 21], термическая устойчивость которых была изучена методом термогравиметрического анализа (ТГА). Наиболее термически стабильными оказались полибромтеллураты с тетраметил- и тетраэтиламмонийными катионами $((\text{cation})_2\{[\text{TeBr}_6](\text{Br}_2)\})$ ($((\text{cation})_2\{[\text{TeBr}_6](\text{Br}_2)\})$, где $\text{cation} = \text{Me}_4\text{N}^+, \text{Et}_4\text{N}^+$) [21]: небольшая потеря массы (до 10–15%) начинается примерно с 373 К, а резкая потеря массы (до 80–90%), вероятно, связанная с разложением матрицы $(\text{cation})_2[\text{TeBr}_6]$, наблюдается при $T = 631$ К для комплекса с катионом Me_4N^+ и при $T = 568$ К для комплекса с катионом Et_4N^+ . В данной работе изучение термического поведения полибромтеллуратов проведено методом статической тензиметрии с мембранными нуль-манометрами, предоставляющим более детальную информацию о физико-химических свойствах этих соединений. Ранее этот метод был применен для исследования процессов испарения брома из полибромо-

¹ Материалы XV симпозиума с международным участием. Новосибирск, 3–7 июля 2023 г.

висмутатных комплексов $(\text{PyH})_3[\text{Bi}_2\text{Br}_9(\text{Br}_2)]$ и $(\text{N-MePy})_3[\text{Bi}_2\text{Br}_9(\text{Br}_2)]$ [22]. В результате была установлена термическая стабильность комплексов, доказана обратимость процесса вплоть до температуры разложения бромвисмутатной матрицы и впервые получены термодинамические характеристики изученных процессов. Таким образом, настоящая работа является продолжением исследований термодинамических аспектов формирования полибромидных комплексов на примере соединений теллура(IV) с катионами четвертичных аммонийных оснований.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез и идентификация исследуемых комплексов $(\text{Me}_4\text{N})_2\{[\text{TeBr}_6](\text{Br}_2)\}$ (I) и $(\text{Et}_4\text{N})_2\{[\text{TeBr}_6](\text{Br}_2)\}$ (II) подробно описаны в нашей работе [21]. Синтезированные соединения, представляющие собой мелкие темно-красные кристаллы, были идентифицированы методами элементного (C, H, N), рентгенофазового и рентгеноструктурного анализов.

Структура анионов изучаемых комплексов, согласно кристаллографическим исследованиям [21], показана на рис. 1.

Совокупность указанных методов анализа позволяет утверждать, что для исследований были приготовлены однофазные образцы состава $\text{C}_8\text{H}_{24}\text{N}_2\text{TeBr}_8$ (I) и $\text{C}_{16}\text{H}_{40}\text{N}_2\text{TeBr}_8$ (II) с суммарным содержанием примесей менее 0.1 мас. %.

Для измерения давления пара над твердыми полибромтеллуратами был использован статиче-

ский метод с мембранными нуль-манометрами системы Новикова–Суворова [23], изготовленными из пирексового стекла. Основные характеристики тензиметрической установки подробно описаны в работах [24, 25]: давление измерялось с точностью ± 60 Па, температура ± 0.5 К. Точность определения массы образца составляла 0.0001 г, объем мембранного нуль-манометра измерялся с точностью 0.05 см^3 . Предварительно взвешенный образец соединения загружали в мембранный манометр и откачивали при комнатной температуре в динамическом вакууме (1.3 Па) в течение получаса; затем манометр отсоединяли от вакуумной системы с помощью газовой горелки и помещали в установку. Давление измерялось после достижения равновесия при заданной температуре. Для контроля установления равновесия переход к следующей температуре осуществлялся после совпадения двух-трех измерений с интервалом от 10 мин до 15 мин при фиксированной температуре. Измерение давления проводилось как при нагревании, так и при охлаждении манометра. Время, необходимое для достижения равновесия при нагревании манометра для комплекса I, было значительно больше (20–60 ч), чем для комплекса II (3–25 ч). Это связано с различием структур исследуемых соединений: рассчитанная из рентгеноструктурных данных, плотность комплексов I и II составляет 2.615 и 2.379 г/см³ соответственно [21] и, таким образом, соединение с тетраметиламмонийным катионом упаковано гораздо более плотно, что может

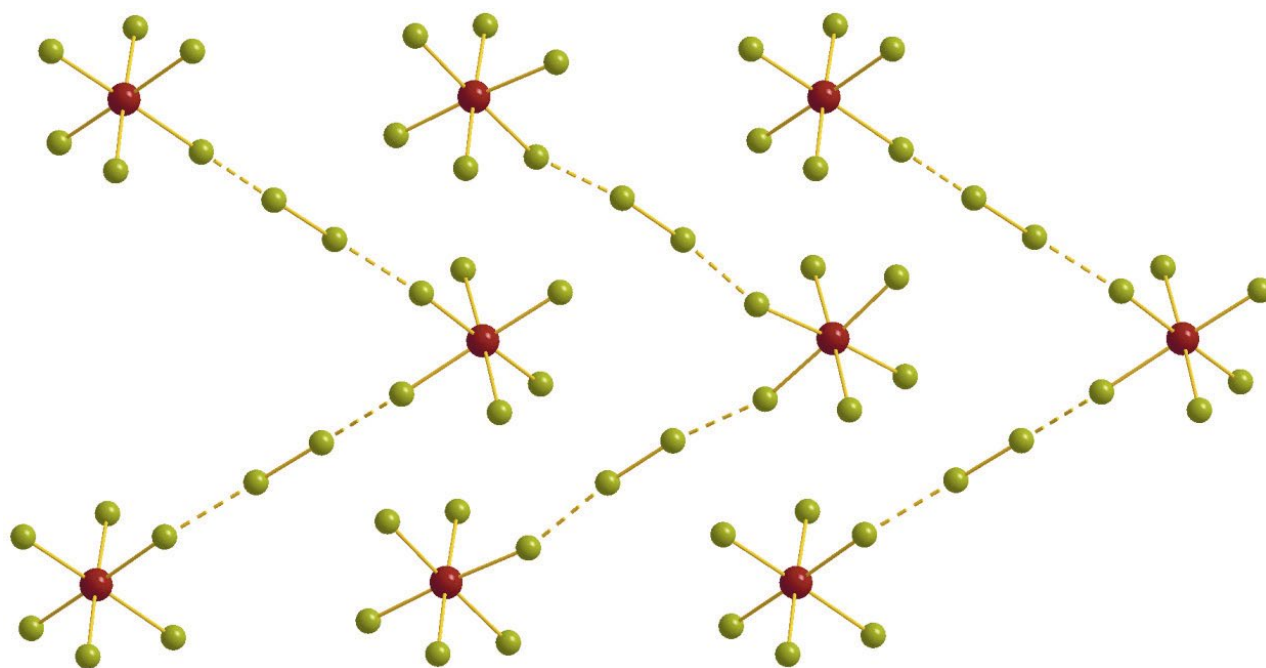
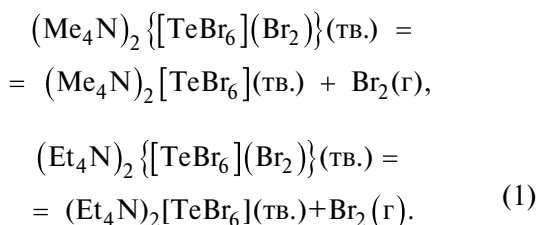


Рис. 1. Анионная часть комплексов I и II [21]. Атомы теллура — бордовые, атомы брома — оливковые.

затруднять выход молекулярного брома в газовую фазу. При охлаждении манометра времени для установления равновесия требовалось намного больше, поэтому было измерено всего несколько точек, которые хорошо согласуются с точками, полученными при нагревании (см. ниже), что свидетельствует о достижении равновесия.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Тензиметрические эксперименты были проведены в широком интервале давлений ($110 \leq p$, Па ≤ 77530), температур ($292.7 \leq T$, К ≤ 543.8) и концентраций Br_2 ($0.32 \leq m_{\text{Br}_2}/V$, г дм⁻³ ≤ 4.61). С каждым из исследуемых комплексов было проведено по четыре эксперимента. Условия проведения экспериментов приведены в табл. 1. Здесь m — масса образца, помещенного в манометр, m_{Br_2} — масса молекулярного брома, связывающего $[\text{TeBr}_6]^{2-}$ -анионы (см. рис. 1). По аналогии с полибромиды висмута [22] предполагалось, что именно этот бром переходит в газовую фазу при проведении экспериментов:



Экспериментальные данные представлены в табл. 2 и на рис. 2, а, б, в виде зависимости $\lg p(1/T)$. Данные, полученные на охлаждении манометра, в табл. 2 подчеркнуты. Данные, полученные после разложения комплексов, выделены курсивом.

Разделение экспериментальных данных на насыщенный и ненасыщенный пар, а также на точки разложения отчетливо видно на рис. 2. В области

Таблица 1. Условия проведения тензиметрических экспериментов: m — масса образца, m_{Br_2} — масса молекулярного брома, связывающего $[\text{TeBr}_6]^{2-}$ -анионы, V — объем манометра

Эксперимент	m , г	m_{Br_2} , г	V , см ³	m_{Br_2}/V , г дм ⁻³
I				
1	0.0827	0.0144	10.35	1.42
2	0.0427	0.0075	15.77	0.47
3	0.0391	0.0068	10.79	0.63
4	0.0330	0.0058	17.91	0.32
II				
1	0.0479	0.0074	16.68	0.44
2	0.0376	0.0058	18.17	0.32
3	0.1750	0.0272	5.91	4.60
4	0.0670	0.0104	7.24	1.44

насыщенного пара, где еще не весь Br_2 , связывающий $[\text{TeBr}_6]^{2-}$ -анионы, вышел в газовую фазу, давление изменяется по экспоненциальному закону. Следует отметить, что в этой области давление при фиксированной температуре не зависит от концентрации исходного соединения (m/V), т.е. процесс парообразования является моновариантным. Ненасыщенный пар наблюдается, когда весь Br_2 вышел в газовую фазу и давление изменяется с температурой по закону идеального газа (для комплекса I — эксперимент 2, для комплекса II — эксперименты 1, 2). Сплошными стрелками на рис. 2 обозначены точки, измеренные на охлаждении манометра. Следует заметить, что процесс парообразования имеет обратимый характер, если точки на охлаждении сняты до разложения исследуемых комплексов.

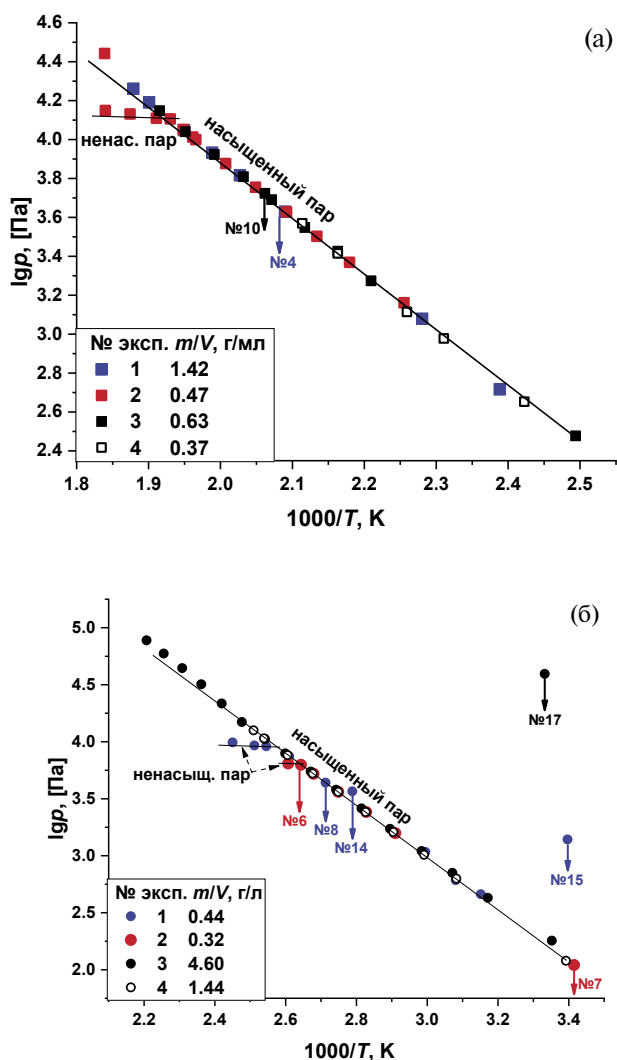


Рис. 2. Зависимости давления пара Br_2 от температуры в координатах $\lg p-1000/T$ для комплексов I (а) и II (б). Значками изображены экспериментальные точки, прямые проведены по точкам насыщенного и ненасыщенного пара, сплошными стрелками обозначены точки, измеренные на охлаждении манометра.

Таблица 2. Экспериментальные давления насыщенного и ненасыщенного пара p , полученные при температурах T , для процесса перехода в газовую фазу Br_2 , связывающего $[\text{TeBr}_6]^{2-}$ -анионы в соединениях **I** и **II**. Данные, полученные на охлаждении, подчеркнуты, данные после разложения выделены *курсивом*.

№ эксп. точки	T , К	p , Па	№ эксп. точки	T , К	p , Па	№ эксп. точки	T , К	p , Па
	(I)	эксп. 1		(I)	эксп. 4		(II)	эксп. 3
	насыщ.	пар		насыщ.	пар		насыщ.	пар
1	418.7	520	1	412.8	450	1	298.3	180
2	438.5	1200	2	432.8	950	2	315.3	427
3	493.3	6550	3	442.6	1300	3	325.6	708
4	<u>478.3</u>	<u>4250</u>	4	462.3	2600	4	335.1	1099
5	502.9	8560	5	473.1	3710	5	345.4	1721
6	513.0	11180		(II)	эксп. 1	6	355.3	2601
7	526.1	15510		насыщ.	пар	7	364.6	3792
8	532.2	<i>18260</i>	1	317.3	460	8	374.4	5469
	(I)	эксп. 2	2	324.6	610	9	384.8	7911
	насыщ.	пар	3	333.9	1080	10	393.4	10582
1	443.4	1450	4	344.1	1580	11	403.8	14900
2	458.8	2340	5	353.9	2440	12	<i>413.3</i>	<i>21660</i>
3	468.6	3180	6	363.6	3580	13	<i>423.4</i>	<i>31900</i>
4	478.0	4250	7	373.3	5260	14	<i>433.3</i>	<i>44270</i>
5	488.1	5690	8	<u>368.6</u>	<u>4380</u>	15	<i>443.3</i>	<i>59400</i>
6	498.2	7530	9	378.1	6290	16	<i>453.1</i>	<i>77530</i>
7	508.7	9980	10	383.1	7440	17	<u>300.1</u>	<u>39340</u>
8	509.8	10300		ненасыщ.	пар		(II)	эксп. 4
9	513.3	11250	11	392.9	9130		насыщ.	пар
	ненасыщ.	пар	12	398.1	9270	1	294.8	120
10	518.1	12670	13	<i>408.1</i>	<i>9870</i>	2	324.4	630
11	523.3	12880		насыщ.	пар	3	334.3	1020
12	<i>533.5</i>	<i>13520</i>	14	<u>358.6</u>	<u>3670</u>	4	344.3	1610
13	<i>543.5</i>	<i>14100</i>	15	<u>294.4</u>	<u>1390</u>	5	353.8	2420
14	<i>543.8</i>	<i>27690</i>		(II)	эксп. 2	6	363.8	3630
	(I)	эксп. 3		насыщ.	пар	7	373.6	5270
	насыщ.	пар	1	343.6	1580	8	383.8	7630
1	401.0	300	2	353.6	2420	9	393.8	10710
2	452.6	1880	3	363.8	3640	10	398.5	12580
3	462.3	2670	4	373.3	5230			
4	472.3	3530		ненасыщ.	пар			
5	482.8	4910	5	383.5	6430			
6	492.1	6440	6	<u>378.3</u>	<u>6280</u>			
7	502.1	8370		насыщ.	пар			
8	512.5	10970	7	<u>292.8</u>	110			
9	522.1	14080						
10	<u>485.5</u>	<u>5290</u>						

Необратимое разложение комплексов характеризуется отклонением от прямых насыщенного (комплекс **II**, эксп. 3) и ненасыщенного пара (комплекс **I**, эксп. 2 и комплекс **II**, эксп. 1), а также необратимым изменением давления (несовпадение значений давления при нагревании и охлаждении). Последняя точка эксп. 2 комплекса **I**, а для комплекса **II** точки № 14, 15

эксп. 1 и точка № 17 эксп. 3 заметно отклоняются от прямых насыщенного и ненасыщенного пара, поскольку в них уже присутствует давление продуктов разложения матрицы $(\text{cation})_2[\text{TeBr}_6]$. Более наглядно температуры разложения комплексов показаны на рис. 3, где представлено количество брома, перешедшего в газовую фазу, рассчитанное в каждой экспериментальной точке

(T_i, p_i) j -го эксперимента, в процентах от исходного количества Br_2 в навеске (m_{Br_2}):

$$m_{\text{Br}_2,i} = p_i V_j M_{\text{Br}_2} / (R / T_i), \%(\text{Br}_{2,i}) = m_{\text{Br}_2,i} \times 100 / m_{j\text{Br}_2}. \quad (2)$$

Как видно из рис. 3, в точках выхода в ненасыщенный пар весь Br_2 , связывающий $[\text{TeBr}_6]^{2-}$ -анионы (m_{Br_2} , см. табл. 1), перешел в газовую фазу, что соответствует предложенной физико-химической модели парообразования (1). На этом же рисунке отчетливо видны температуры начала необратимого разложения матрицы $(\text{cation})_2[\text{TeBr}_6]$ в комплексах I и II: 529 ± 3 К и 406 ± 2 К соответственно. Они существенно ниже температур, определенных методом ДТА/ТГ в работе [20]. Но поскольку статический метод является прямым методом измерения давления (а оно более чувствительный параметр, чем потеря веса) и достижение равновесных значений (p , T) в этом методе гарантировано, нашим данным следует отдавать предпочтение.

Экспериментальные данные моновариантного равновесия насыщенного пара были аппроксимированы следующим уравнением:

$$\ln(p / p^\circ) \pm 2\sigma = A \text{Ц} B / T, \sigma^2 = a / T^2 \text{Ц} b / T + c, \quad (3)$$

где p° — стандартное давление 101325 Па, $\sigma^2 = f(T)$ — дисперсия рассчитанного давления.

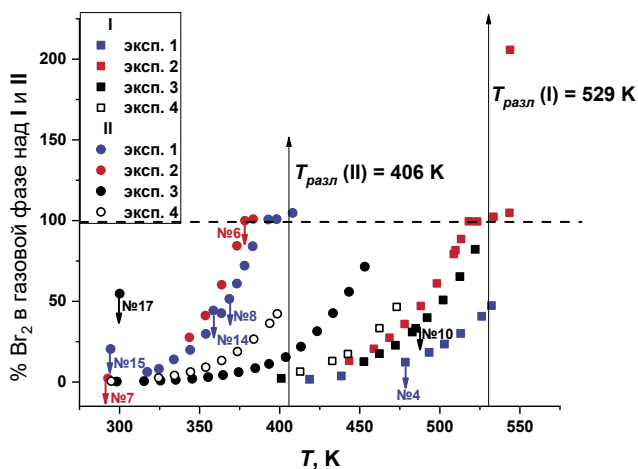


Рис. 3. Процентное содержание брома (от исходного в навеске (m_{Br_2})) в газовой фазе над комплексами I и II в зависимости от температуры. Стрелками вниз обозначены точки, измеренные на охлаждении манометра, стрелками вверх — температуры разложения комплексов.

Аппроксимация была проведена с использованием функции правдоподобия, позволяющей получить несмещенные оценки искоемых параметров [26]. Искомые параметрами были энтальпии и энтропии процессов (1) при средних температурах из измеренного интервала (461.5 К для I и 349.5 К для II), поскольку в литературе отсутствуют данные о теплоемкости твердофазных участников процесса. Результаты обработки приведены в табл. 3, погрешности даны для 95-процентного доверительного интервала.

Отклонения экспериментальных данных от рассчитанных по уравнениям из табл. 3 приведены на рис. 4. Отклонения не превышают предельной ошибки измерения давления и носят случайный характер, что говорит об отсутствии систематических ошибок измерений.

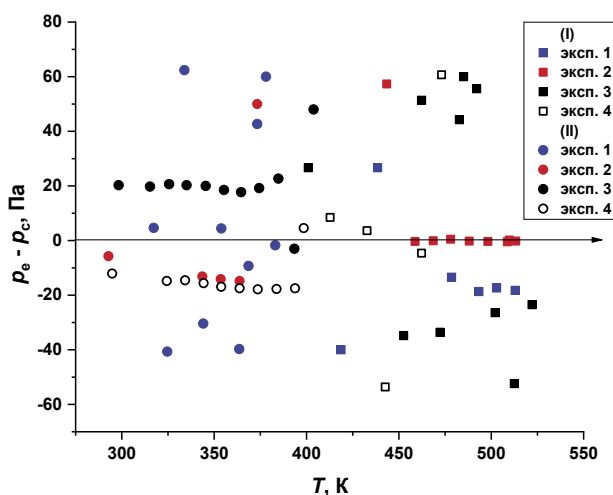


Рис. 4. Отклонения экспериментальных давлений (p_e) от рассчитанных по уравнениям из табл. 3 (p_c).

На рис. 5 приведены результаты исследования полибромидных комплексов теллура и изученных ранее полибромидных комплексов висмута [22]. Из рисунка видно, что бром имеет большую летучесть (и, следовательно, менее прочные связи с анионами матрицы) в случае комплекса II — $(\text{Et}_4\text{N})_2\{[\text{TeBr}_6](\text{Br}_2)\}$, что, несомненно, связано с природой катионов исследуемых соединений.

Оценка энергии связи димеров Br_2 с анионами в комплексах I и II, а также в изученных ранее $(\text{PyH})_3[\text{Bi}_2\text{Br}_9(\text{Br}_2)]$ и $(\text{N-MePy})_3[\text{Bi}_2\text{Br}_9(\text{Br}_2)]$ [22] проведена по следующей схеме:

$$\Delta_{\text{св}} G^\circ_T = -RT \ln(p / p^\circ), \quad (4)$$

где $\ln(p/p^\circ)$ характеризует процесс, обратный изученному нами, т.е. соединение молекул $\text{Br}_{2(\text{r})}$ с анионами матрицы. Расчет произведен для $T = 402$ К, поскольку эта температура входит

Таблица 3. Температурная зависимость давления насыщенного пара $\ln(p/p^\circ) \pm 2\sigma = A - B/T$, где p° – стандартное давление 101325 Па, σ^2 – дисперсия рассчитанного давления, энтальпии ($\Delta_{\text{пр}}H^\circ_{\text{Тср}}$) и энтропии ($\Delta_{\text{пр}}S^\circ_{\text{Тср}}$) процессов (1) при средних температурах из исследуемых интервалов (ΔT)

Комплекс	ΔT , К	$\ln(p/p^\circ) = f(T)$, $\sigma^2 = f(T)$	$\Delta_{\text{пр}}H^\circ_{\text{Тср}}$, кДж моль ⁻¹	$\Delta_{\text{пр}}S^\circ_{\text{Тср}}$, Дж К ⁻¹ моль ⁻¹
I	401–522	$11.062 - 6805.8/T$ $30.787/T^2 - 0.2454/T + 0.00012$	56.6 ± 0.1	92.0 ± 0.2
II	295–404	$10.894 - 5173.6/T$ $140.04/T^2 - 1.4986/T + 0.0010$	43.0 ± 0.2	90.6 ± 0.5

Таблица 4. Энергия Гиббса процесса связывания газообразного Br₂ с анионами комплексов полибромидов при T = 402 К

Процесс	$-\Delta_{\text{св}}G^\circ_{402}$, кДж/моль
$(\text{Me}_4\text{N})_2[\text{TeBr}_6](\text{тв.}) + \text{Br}_2(\text{г}) = (\text{Me}_4\text{N})_2\{[\text{TeBr}_6](\text{Br}_2)\}(\text{тв.})$	19.6 ± 0.1
$(\text{Et}_4\text{N})_2[\text{TeBr}_6](\text{тв.}) + \text{Br}_2(\text{г}) = (\text{Et}_4\text{N})_2\{[\text{TeBr}_6](\text{Br}_2)\}(\text{тв.})$	6.6 ± 0.2
$(\text{PyH})_3[\text{Bi}_2\text{Br}_9](\text{тв.}) + \text{Br}_2(\text{г}) = (\text{PyH})_3[\text{Bi}_2\text{Br}_9(\text{Br}_2)](\text{тв.})$	10.6 ± 0.2
$(\text{N-MePy})_3[\text{Bi}_2\text{Br}_9](\text{тв.}) + \text{Br}_2(\text{г}) = (\text{N-MePy})_3[\text{Bi}_2\text{Br}_9(\text{Br}_2)](\text{тв.})$	12.6 ± 0.3

во все исследованные интервалы температур. Результаты расчета приведены в табл. 4.

Из таблицы видно, что самая сильная связь брома с анионом возникает в комплексе I, а самая слабая — в комплексе II. В полибромидах висмута зависимость силы связи от катиона не столь резкая, как в полибромидах теллура.

Таким образом, методом статической тензиметрии с мембранными нуль-манометрами изучен процесс выхода в газовую фазу молекул брома,

связывающих $[\text{TeBr}_6]^{2-}$ анионы в полибромидных комплексах $(\text{Me}_4\text{N})_2\{[\text{TeBr}_6](\text{Br}_2)\}$ и $(\text{Et}_4\text{N})_2\{[\text{TeBr}_6](\text{Br}_2)\}$. Исследуемые комплексы стабильны до температур 529 ± 3 К ($(\text{Me}_4\text{N})_2\{[\text{TeBr}_6](\text{Br}_2)\}$) и 406 ± 2 К ($(\text{Et}_4\text{N})_2\{[\text{TeBr}_6](\text{Br}_2)\}$). Обратимость изученных процессов указывает на возможность получения новых полибромидов непосредственно из паров Br₂ и твердого бромтеллурата. Из экспериментальных данных впервые получены прецизионные физико-химические характеристики полибромтеллуратов, представляющие интерес как для практического их использования (например, в фотогальванике), так и для синтеза новых супрамолекул, базирующихся на связи $(\text{Br} \cdots \text{Br})$.

ФИНАСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 121031700314-5 и 121031700313-8).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pelletier, J., Caventou J.* // Ann Chim Phys. 1819. V. 10. P. 142.
2. *Svensson P.H., Kloo L.* // Chem. Rev. 2003. V. 103. No 5. P. 1649. <https://doi.org/10.1021/cr0204101>.

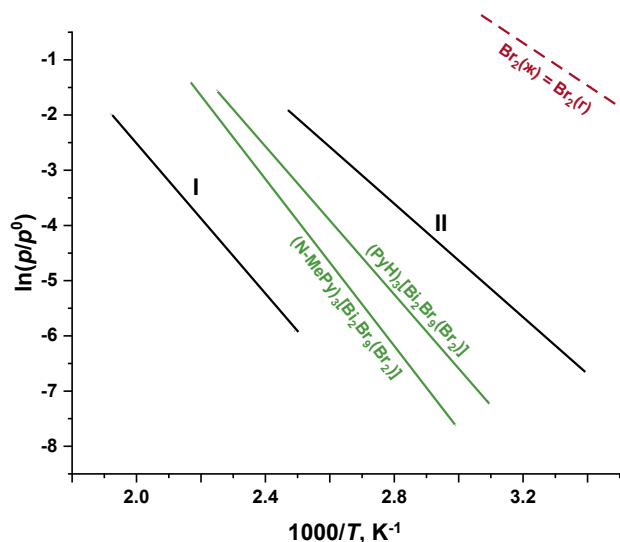


Рис. 5. Температурная зависимость давления насыщенного пара брома над комплексами I и II, изученными в данной работе, над полибромидными комплексами висмута [22] и жидким бромом [27].

3. *Sonnenberg K., Mann L., Redeker F.A. et al.* // *Angew. Chemie — Int. Ed.* 2020. V. 59. No 14. P. 5464. <https://doi.org/10.1002/anie.201903197>.
4. *Desiraju G.R., Shing Ho P., Kloo L. et al.* // *Pure Appl. Chem.* 2013. V. 85. No 8. P. 1711. <https://doi.org/10.1351/PAC-REC-12-05-10>.
5. *Cavallo G., Metrangolo P., Milani R. et al.* // *Chem. Rev.* 2016. V. 116. No 4. P. 2478. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00484>.
6. *Korobeynikov N.A., Usoltsev A.N., Abramov P.A. et al.* // *Inorganics.* 2023. V. 11. № 1. P. 25. <https://doi.org/10.3390/inorganics11010025>.
7. *Keil H., Sonnenberg K., Müller C. et al.* // *Angew. Chemie Int. Ed.* 2021. V. 60. No 5. P. 2569. <https://doi.org/10.1002/anie.202013727>.
8. *Brückner R., Haller H., Steinhauer S. et al.* // *Ibid.* 2015. V. 54. No 51. P. 15579. <https://doi.org/10.1002/anie.201507948>.
9. *Sonnenberg K., Pröhm P., Schwarze N. et al.* // *Ibid.* 2018. V. 57. No 29. P. 9136. <https://doi.org/10.1002/anie.201803486>.
10. *Voßnacker P., Wüst A., Müller C. et al.* // *Ibid.* 2022. V. 61. No 43. e202209684. <https://doi.org/10.1002/anie.202209684>.
11. *Korobeynikov N.A., Usoltsev A.N., Kolesov B.A. et al.* // *CrystEngComm.* 2022. V. 24. No 17. P. 3150. <https://doi.org/10.1039/D2CE00210H>.
12. *Shestimerova T.A., Yelavik N.A., Mironov A.V. et al.* // *Inorg. Chem.* 2018. V. 57. No 7. P. 4077. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.8b00265>.
13. *Shestimerova T.A., Mironov A.V., Bykov M.A. et al.* // *Molecules.* 2020. V. 25. No 12. P. 2765. <https://doi.org/10.3390/molecules25122765>.
14. *Bykov A.V., Shestimerova T.A., Bykov M.A. et al.* // *Int. J. Mol. Sci.* 2023. V. 24. No 3. P. 2201. <https://doi.org/10.3390/ijms24032201>.
15. *Shestimerova T.A., Bykov M.A., Grigorieva A.V. et al.* // *Mendeleev Commun.* 2022. V. 32. No 2. P. 194. <https://doi.org/10.1016/j.mencom.2022.03.014>.
16. *Shestimerova T.A., Golubev N.A., Bykov M.A. et al.* // *Molecules.* 2021. V. 26. No 18. P. 5712. <https://doi.org/10.3390/molecules26185712>.
17. *Küttinger M., Loichet Torres P.A., Meyer E. et al.* // *Chem. — A Eur. J.* 2022. V. 28. No 13. e202103491. <https://doi.org/10.1002/chem.202103491>.
18. *Küttinger M., Riasse R., Wlodarczyk J. et al.* // *J. Power Sources.* 2022. V. 520. P. 230804. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230804>.
19. *Wu W., Luo J., Wang F. et al.* // *ACS Energy Lett.* 2021. V. 6. P. 2891. <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.1c01146>.
20. *Usoltsev A.N., Adonin S.A., Novikov A.S. et al.* // *CrystEngComm.* 2017. V. 19. No 39. P. 5934. <https://doi.org/10.1039/C7CE01487B>.
21. *Usoltsev A.N., Adonin S.A., Abramov P.A. et al.* // *Eur. J. Inorg. Chem.* 2018. V. 2018. No 27. P. 3264. <https://doi.org/10.1002/ejic.150+273201800383>.
22. *Zelenina L.N., Chusova T.P., Isakov A.V. et al.* // *J. Chem. Thermodyn. Elsevier Ltd,* 2020. V. 141. P. 105958. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2019.105958>.
23. *Суворов А.В.* Термодинамическая химия парообразного состояния. Л.: «Химия», 1970. С. 46.
24. *Zelenina L.N., Chusova T.P., Vasilieva I.G.* // *JCT.* 2013. V. 57. P. 101. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jct.2012.08.005>.
25. *Зеленина Л.Н., Чусова Т.П., Сапченко С.А. и др.* // *ЖНХ.* 2023. Т. 68. № 2. С. 174 (*Zelenina L.N., Chusova T.P., Sapchenko S.A., Gelfond N.V.* // *Russian Journal of Inorganic Chemistry.* 2023. V. 68. P. 140) DOI: 10.31857/S0044457X22601274.
26. *Титов В.А., Коковин Г.А.* /Математические методы в химической термодинамике. Новосибирск: «Наука», 1980. С. 98.
27. *Гурвич Л.В.* ИВТАНТЕРМО — автоматизированная система данных о термодинамических свойствах веществ // *Вест. АН СССР.* 1983. 3. С. 54. (*L.V. Gurvich.* IVTANTHERMO — Automated data system on thermodynamic properties of substances. Moscow: Nauka, 1983 (in Russian)).