

Научная статья

УДК 544.32; 544.42

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-2-222-230>



Термодинамические и кинетические параметры экстракции йода из хлоридных водных растворов

Полина Александровна Пономарева, Ольга Николаевна Каныгина,
Елена Владимировна Сальникова

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Российская Федерация

Автор, ответственный за переписку: Пономарева Полина Александровна, pnomareva@narod.ru

Аннотация. Экстракция – универсальный и относительно простой метод извлечения редких и рассеянных элементов, позволяющий добиться хороших результатов при минимальных затратах на реагентное и аппаратное оснащение. Знание тепловых эффектов и кинетических зависимостей процесса экстракции позволяет прогнозировать и оперативно реагировать при изменении внешних условий. Изучены термодинамические и кинетические параметры процесса экстракции йода на модельных растворах, содержащих в качестве фоновой минерализации хлорид натрия с ионной силой от 0 до 5 моль/л, что наилучшим образом соотносится с природными и техногенными водами нефтяных и нефтегазоконденсатных месторождений. В качестве экстрагента применялась композиция три-н-бутилфосфата и изооктана. Для оценки термодинамических параметров были построены изотермы экстракции при температурах 278 и 288 К. Для различных фоновых значений ионной силы определены равновесные параметры экстракции: степень извлечения, коэффициент распределения, константа равновесия, изменение энтальпии, энтропии и энергии Гиббса процесса. Изучение кинетических зависимостей экстракционного извлечения йода из водных растворов с различными значениями ионной силы при температурах 278, 288 и 293 К позволило установить истинный и кажущийся порядки реакции, а также энергию активации процесса экстракции. Во всем изученном интервале значений ионной силы растворов извлечение йода происходит самопроизвольно с высокими коэффициентами распределения и степенью извлечения более 86%. Кинетические параметры экстракции (энергия активации процесса, временной и концентрационный порядки реакции) свидетельствуют о диффузионном характере лимитирующей стадии, наличии промежуточных стадий комплексообразования и об отсутствии влияния температуры на скорость процесса.

Ключевые слова: экстракция, йод, термодинамические параметры, кинетические параметры, лимитирующая стадия

Для цитирования: Пономарева П. А., Каныгина О. Н., Сальникова Е. В. Термодинамические и кинетические параметры экстракции йода из хлоридных водных растворов // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2022. Т. 12. N 2. С. 222–230. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-2-222-230>.

CHEMICAL SCIENCES

Original article

Thermodynamic and kinetic parameters of iodine extraction from chloride aqueous solutions

Polina A. Ponomareva, Olga N. Kanygina,
Elena V. Salnikova

Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation

Corresponding author: Polina A. Ponomareva, pnomareva@narod.ru

Abstract. Extraction is a versatile and relatively simple method for extracting rare and scattered elements, producing good results at minimal expenses in terms of reagents and equipment. Information about the thermal effects and kinetic dependencies of the extraction process is essential for predicting and counteracting fluctuations in external conditions. In this work, the thermodynamic and kinetic parameters of the iodine extraction process were studied using model solutions that contained sodium chloride with an ionic strength of 0–5 mol/l as a background mineralization. This composition closely corresponds to natural and man-made

waters of oil and gas condensate fields. A mixture of tri-n-butyl phosphate and isooctane was used as the extractant. In order to evaluate thermodynamic parameters, extraction isotherms were constructed at temperatures of 278 and 288 K. For different background ionic strength values, equilibrium extraction parameters were determined, including the extraction degree, distribution coefficient and equilibrium constant, as well as changes in the enthalpy, entropy and Gibbs energy of the process. A study of the kinetic dependencies of iodine extraction from aqueous solutions under different ionic strength values at temperatures of 278, 288 and 293 K allowed the true and apparent orders of reaction to be established, along with the activation energy of the extraction process. Across the entire range of the studied ionic strength values, iodine extraction occurs spontaneously with high distribution coefficients and an extraction degree of over 86%. The kinetic parameters of the iodine extraction process (activation energy, temporal and concentration reaction order) indicate the diffusion nature of the rate-determining step, the presence of intermediate complexation stages and the absence of temperature effects on the reaction rate.

Keywords: extraction, iodine, thermodynamic parameters, kinetic parameters, limiting stage

For citation: Ponomareva P. A., Kanygina O. N., Salnikova E. V. Thermodynamic and kinetic parameters of iodine extraction from chloride aqueous solutions. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2022;12(2):222-230. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-2-222-230>.

ВВЕДЕНИЕ

С момента, когда был получен в свободном состоянии, и до настоящего времени исследование химии его природных соединений, вопросов миграции, процессов аккумуляции и извлечения связано с определенными трудностями, поскольку йод относится к рассеянным элементам [1]. Современные технологии, лежащие в основе промышленного производства, достаточно обработаны. В их основе – последовательные операции подкисления воды, окисления иодид-ионов до элементного йода и собственно извлечение йода [2]. Метод экстракции с высокой степенью эффективности используется для извлечения и разделения элементов [3]. Применение фосфорорганических экстрагентов в последнее время получило широкое распространение для большого круга неорганических простых и комплексных соединений [4–6]. Известны экстракционные композиции, позволяющие экстрагировать йод с высокой эффективностью [7, 8]. Для современного производства актуальным является снижение затрат на переработку бедного сырья [9] и увеличение эффективности процессов извлечения за счет контроля и изменения условий проведения процесса [10, 11]. В Оренбургской области потенциальная сырьевая база представлена пластовыми и техногенными водами Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения. К моменту переработки данные воды являются бедными по извлекаемому компоненту (содержат йод в концентрации не более 0,079 ммоль/л, фоновые соли – в концентрации до 5 моль/л с преобладанием хлорида натрия – до 96% от общей минерализации) и не являются термальными [12], поэтому в качестве фоновой соли выбран хлорид натрия.

Изучение кинетики и тепловых эффектов, сопровождающих экстракцию, позволяет прогнозировать и управлять процессом извлечения при изменении внешних условий [13, 14].

Цель работы – изучить кинетические и тер-

модинамические параметры процесса экстракции йода из водных растворов с различной минерализацией.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследования проводили на модельных водных растворах йода, содержащих извлекаемый элемент в концентрациях от $0,5 \cdot 10^{-3}$ до $1,0 \cdot 10^{-3}$ моль/л с ионной силой (I) от 0 до 5 моль/л, задаваемой добавлением хлорида натрия. Модельные растворы готовили путем растворения кристаллического йода в воде с последующим подкислением соляной кислотой. Величина степени извлечения не зависит от pH раствора, однако работа в области $\text{pH} > 3,5$ сопровождалась потерей элементного йода в результате гидролитического диспропорционирования [15].

Органическая фаза представляла собой композицию, состоящую из экстрагента – три-н-бутилфосфат (ТБФ) марки х.ч. – и активного разбавителя – изооктана. Содержание ТБФ в изооктане составляло 10% (по объему) [7, 8].

Экстракцию проводили в статических условиях. При изучении равновесных параметров применяли метод переменных объемов. Для этого активно перемешивали 10 мл экстракционной композиции и аликвоты модельного раствора йода по 40, 50, 70, 80, 100, 200 и 400 мл. Процесс экстракции термостатировали при 278 и 288 К. Изменение энтальпии, энтропии и свободной энергии Гиббса определяли путем графического анализа линейных изотерм Вант-Гоффа [15]:

$$\ln \frac{D_{T_2}}{D_{T_1}} = \frac{-\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right), \quad (1)$$

где ΔH – энтальпия, Дж/моль; D_{T_1} , D_{T_2} – коэффициенты распределения при температурах T_1 и T_2 ; R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,314$ Дж/моль*К; T_1 , T_2 – температура, К.

В частности зависимости $\lg D \sim f(1/T)$ [16].

Изучение кинетических параметров проводили при соотношении органической и водной фаз 1:10 и температурах 278, 288 и 293 К, поскольку правило Вант-Гоффа справедливо для ограниченного числа гомогенных реакций.

Для определения энергии активации применялся метод трансформации, для реализации которого требуется использовать не менее 3-х температур.

Разделение фаз осуществляли в делительных воронках.

Анализ водной фазы после экстракции проводили титриметрическим методом с тиосульфатом натрия [12].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На предварительном этапе было изучено влияние скорости перемешивания (оборотов/минуту) раствора на процесс экстракции – на коэффициент распределения йода (D) и степень извлечения йода (R, %). Эксперименты проводили на бессолевых модельных растворах.

Степень извлечения йода (R) рассчитывали по формуле:

$$R, \% = \frac{m_{(\text{орг.})}}{m_{(\text{исх.})}} \times 100\%, \quad (2)$$

где $m_{(\text{орг.})}$ – масса йода, перешедшего в органическую фазу; $m_{(\text{исх.})}$ – масса йода в исходном растворе [17].

Для описания экстракционных равновесий целесообразно использовать коэффициент распределения, учитывающий все формы существования распределяемого компонента как в водной, так и в органической фазах. Коэффициент распределения определяется как:

$$D = \frac{C(I_2(\text{орг.}))}{C(I_2(\text{водн.}))}, \quad (3)$$

где $C(I_2(\text{орг.}))$ и $C(I_2(\text{водн.}))$ – суммарные концентрации йода в органической и водной фазах, моль/л [16].

Полученные значения степени извлечения йода и коэффициентов распределения приведены в табл. 1.

По результатам, приведенным в табл. 1, можно сделать вывод, что скорость перемешивания мало влияет на степень извлечения йода: при увеличении скорости перемешивания в 5 раз степень извлечения выросла на 11%. Данный факт возможно объяснить изначально высокими значениями степени извлечения. Однако коэффициент распределения стабилизируется только

по достижении скорости перемешивания более 120 об/мин. При этом отношение $D_{120} : D_{50} = 5,6$. В связи с этим фактом в дальнейших исследованиях использовали скорость, равную 200 об/мин.

На следующем этапе рассчитывали изменения термодинамических параметров – энтропии, энтальпии и энергии Гиббса – в процессе экстракции, используя изотермы $S_{\text{орг}}/S_{\text{водн.}}$, построенные по экспериментальным данным. Изотермы во всех случаях линейны с коэффициентом аппроксимации более 95%, что позволяет рассчитать коэффициент распределения йода между водной и органической фазами как тангенс угла наклона изотермы к оси абсцисс. Изотермы экстракции при 278 и 288 К представлены на рис. 1 и 2 [18].

Результаты расчета значений коэффициентов распределения и констант равновесия процесса экстракции йода при различной ионной силе водной фазы представлены в табл. 2.

Увеличение температуры процесса способствует росту коэффициента распределения йода для бессолевого раствора и растворов, содержащих умеренное количество фоновой соли. При ионной силе более 1 моль/л проявляется обратная тенденция. Введение фоновой соли до ионной силы 0,5–1,0 моль/л способствует росту коэффициента распределения йода, однако с ростом минерализации значение коэффициентов распределения падает.

Результаты расчета зависимостей термодинамических параметров от ионной силы растворов представлены на рис. 3. Экстракция из бессолевого и маломинерализованных растворов является эндотермическим процессом, однако с ростом ионной силы растворов процесс становится экзотермическим (рис. 3, а). Аналогичная зависимость наблюдается и для энтропии процесса (рис. 3, б). Величина свободной энергии Гиббса (рис. 3, с) во всем интервале задаваемых значений ионной силы растворов является величиной отрицательной, что свидетельствует о смещении равновесия экстракции в сторону распределения йода в органическую фазу.

Поскольку

$$\Delta G^0 = -2.3RT \lg D, \quad (4)$$

$$\lg D = -\frac{\Delta H^0}{2.3RT} + \frac{\Delta S^0}{2.3R}, \quad (5)$$

представилось возможным рассчитать константу равновесия процесса K_p^{298} .

Таблица 1. Влияние скорости перемешивания фаз на экстракцию йода

Table 1. Influence of phase mixing rate on iodine extraction

Параметры	Скорость перемешивания раствора, об/мин					
	50	90	120	170	230	300
D	64,20	161,2	356,3	362,8	341,9	360,6
R, %	86,50	94,2	97,3	97,3	97,2	97,3

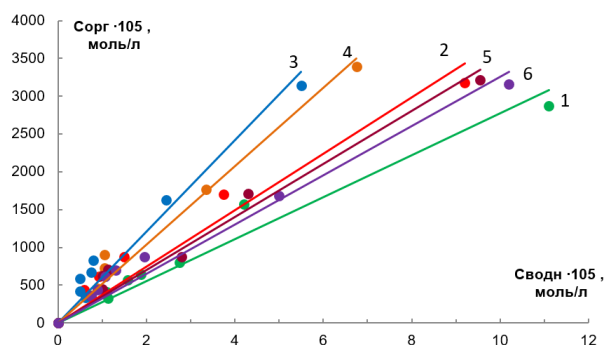


Рис. 1. Изотермы экстракции йода из водных растворов с различной фоновой минерализацией при 278 К и концентрации хлорида натрия: 1 – 0 моль/л; 2 – 0,5 моль/л; 3 – 1,0 моль/л; 4 – 2,0 моль/л; 5 – 4,0 моль/л; 6 – 5,0 моль/л

Fig. 1. Iodine extraction isotherms from aqueous solutions with different background mineralization at 278 K and sodium chloride concentration: 1 – 0 mol/l; 2 – 0,5 mol/l; 3 – 1,0 mol/l; 4 – 2,0 mol/l; 5 – 4,0 mol/l; 6 – 5,0 mol/l

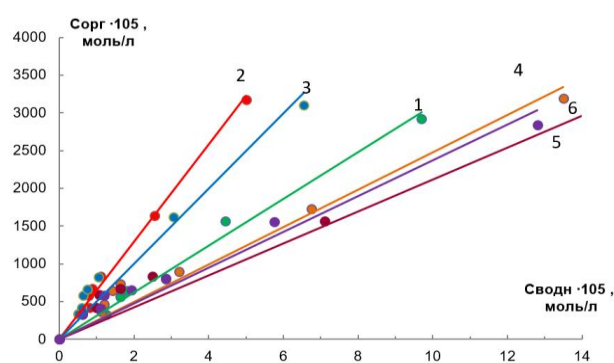


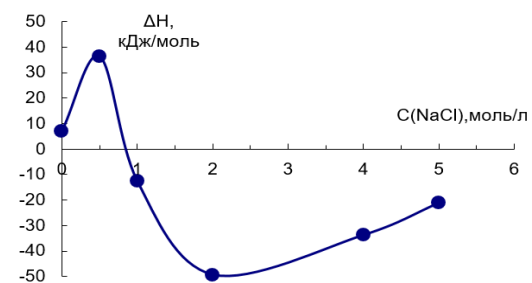
Рис. 2. Изотермы экстракции йода из водных растворов с различной фоновой минерализацией при 288 К и ионной силе: 1 – 0 моль/л; 2 – 0,5 моль/л; 3 – 1,0 моль/л; 4 – 2,0 моль/л; 5 – 4,0 моль/л; 6 – 5,0 моль/л

Fig. 2. Iodine extraction isotherms from aqueous solutions with different background mineralization at 288 K and sodium chloride concentration: 1 – 0 mol/l; 2 – 0,5 mol/l; 3 – 1,0 mol/l; 4 – 2,0 mol/l; 5 – 4,0 mol/l; 6 – 5,0 mol/l

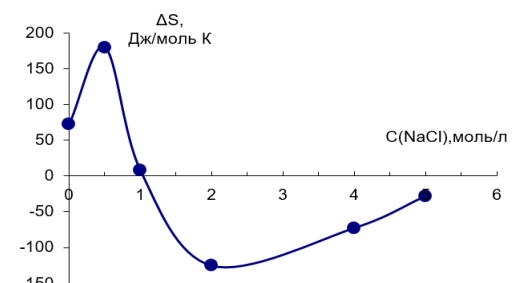
Таблица 2. Зависимость коэффициента распределения и константы равновесия процесса экстракции йода от ионной силы водной фазы

Table 2. Dependence of the distribution coefficient and the equilibrium constant of the iodine extraction on aqueous phase ionic strength

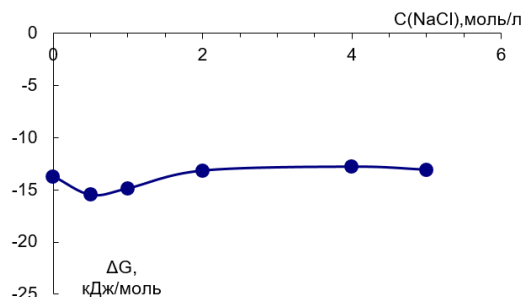
Параметр	I, моль/л					
	0	0,5	1,0	2,0	4,0	5,0
K_p^{298}	257,8	524,9	408,5	206,4	177,6	199,2
D^{278}	278,9	373,7	603,8	518,9	351,1	326,7
D^{288}	303,9	644,3	499,3	247,5	211,5	237,9



a



b



c

Рис. 3. Влияние ионной силы водной фазы на энтальпию (а), энтропию (б) и энергию Гиббса (с) процесса экстракции йода

Fig. 3. Influence of aqueous phase ionic strength on the enthalpy (a), entropy (b) and Gibbs energy (c) of the iodine extraction process

Изучение кинетики экстракции при температурах 278, 288 и 293 К позволило сделать предварительный вывод о характере процесса в неравновесных условиях. На рис. 4 и 5 представлены кинетические зависимости экстракции для различных исходных концентраций йода при ионной силе 1 и 5 моль/л соответственно.

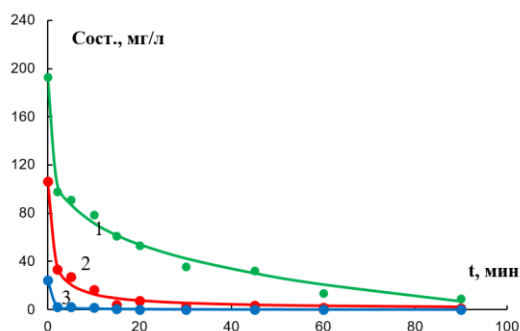


Рис. 4. Кинетические зависимости остаточной концентрации йода от времени экстракции при ионной силе раствора 1 моль/л для различных исходных концентраций извлекаемого компонента: 1 – 192,8 мг/л; 2 – 106,3 мг/л; 3 – 24,2 мг/л

Fig. 4. Kinetic dependences of the iodine residual concentration on the extraction time with ionic strength of 1 mol/l for various initial concentrations of the extracted component: 1 – 192,8 mg/l; 2 – 106,3 mg/l; 3 – 24,2 mg/l

На рис. 6 представлены зависимости скорости процесса от концентрации в логарифмических координатах, позволяющие определить временной и концентрационный порядки реакции.

Тангенс угла наклона билогарифмической зависимости скорости процесса в начальный момент времени при различной исходной концентрации извлекаемого компонента позволяет установить истинный (p_c) порядок реакции. Кажущийся (p_t) порядок реакции определяется скоростями процесса в различные моменты времени при фиксированной исходной концентрации извлекаемого компонента.

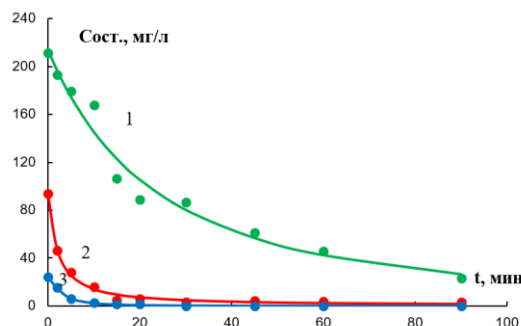
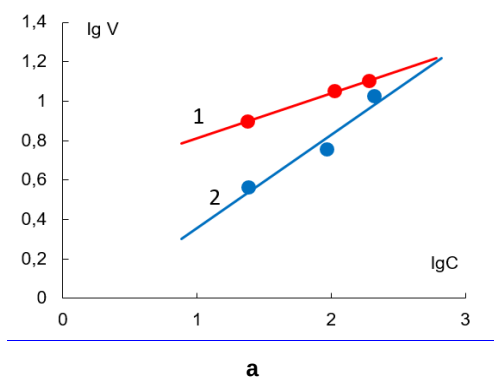


Рис. 5. Кинетические зависимости остаточной концентрации йода от времени экстракции при ионной силе раствора 5 моль/л для различных исходных концентраций извлекаемого компонента: 1 – 211,1 мг/л; 2 – 94,1 мг/л; 3 – 24,3 мг/л

Fig. 5. Kinetic dependences of the iodine residual concentration on the extraction time with ionic strength of 5 mol/l for various initial concentrations of the extracted component: 1 – 211,1 mg/l; 2 – 94,1 mg/l; 3 – 24,3 mg/l

Влияние ионной силы водных растворов на значения порядков реакции при экстракции йода представлено в табл. 3.

Для минерализованных растворов величина временного порядка реакции и значительное различие с концентрационным порядком, вероятнее всего, свидетельствует о параллельном с экстракцией сложном комплексобразовании.

Для изучения энергий активации процесса экстракции были построены кинетические зависимости при различных температурах и фиксированной исходной концентрации йода. На рис. 7 а и б представлены кинетические кривые, определенные как зависимость остаточной концентрации йода от времени контакта фаз при температурах 278, 288 и 293 К с ионной силой 1 и 5 моль/л соответственно. Полученные зависимости были трансформированы по оси времени, что в аррениусовских координатах ($\ln k \sim 1/T$) позволило определить энергию активации процесса экстракции йода.

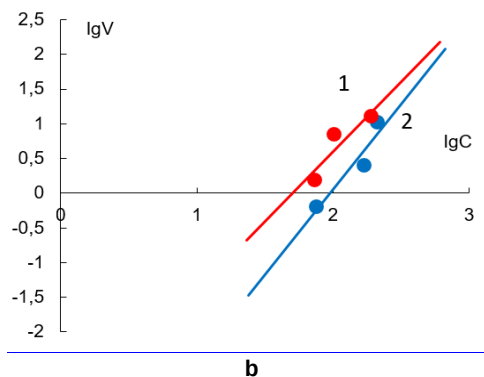


Рис. 6. Билогарифмические отношения для определения концентрационного (а) и временного (б) порядков реакции при различной ионной силе растворов: 1 – 1,0 моль/л; 2 – 5,0 моль/л

Fig. 6. Logarithmic ratios for determining concentration (a) and time orders (b) of the reaction at different ionic strength: 1 – 1,0 mol/l; 2 – 5,0 mol/l

Таблица 3. Значения порядков реакции и энергий активации экстракции йода из растворов с различной ионной силой
Table 3. Values of reaction orders and activation energies of iodine extraction from solutions with different ionic strength

I, моль/л	ρ_c	ρ_t	$E_{акт}$, кДж/моль
0	1,63	0,99	10,13
0,5	0,84	2,07	12,10
1	0,23	2,01	6,73
2	0,80	1,76	9,37
4	0,28	2,28	6,18
5	0,58	2,87	3,17

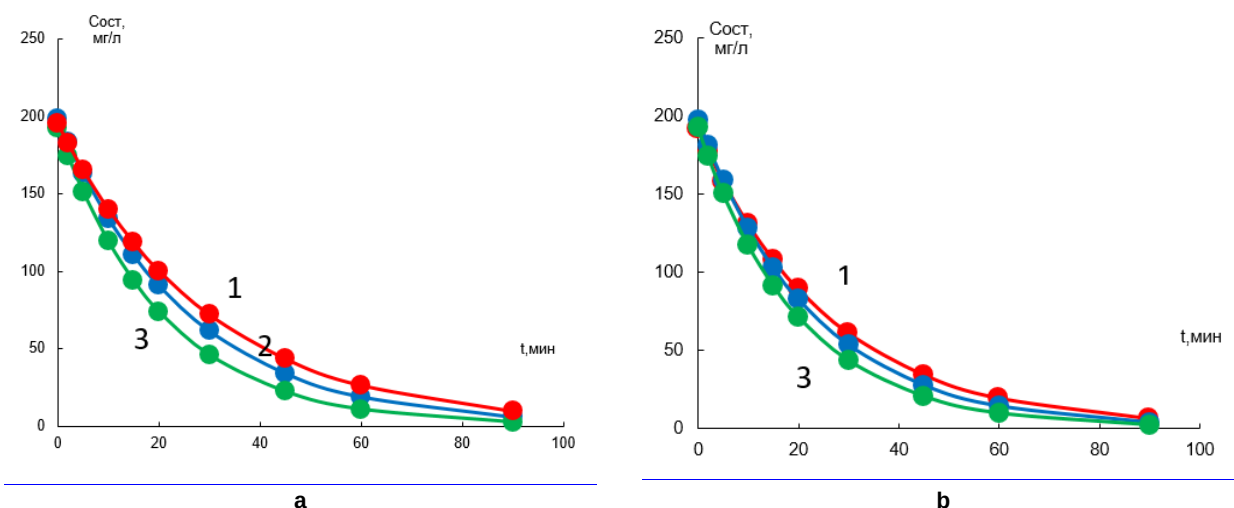


Рис. 7. Временные зависимости остаточной концентрации йода при различной ионной силе:
а – 1,0 моль/л; б – 5,0 моль/л; для температур: 1 – 278 К; 2 – 288 К; 3 – 293 К

Fig. 7. Time dependences of the iodine residual concentration at various ionic strength degrees:
а – 1,0 mol/l; б – 5,0 mol/l; for temperatures: 1 – 278 K; 2 – 288 K; 3 – 293 K

Величина энергии активации менее 40 кДж/моль и параболический характер убывания скорости остаточной концентрации свидетельствуют о диффузионной природе лимитирующей стадии.

ВЫВОДЫ

1. Степень извлечения йода из водных растворов в диапазоне скоростей перемешивания фаз от 50 до 300 об/мин составляет от 86,5 до 97,3%.
2. Коэффициент распределения йода D между водной и органической фазами не изменяется при скорости перемешивания выше 120 об/мин.
3. Изотермы процесса экстракции имеют линейный характер. Коэффициенты распределения и константы равновесия достигают наибольших значений при ионной силе растворов 0,5 и 1,0 моль/л.

4. Термодинамические параметры (энтальпия, энтропия и свободная энергия Гиббса) характеризуют процесс как самопроизвольный [19] в интервале заданных значений ионной силы растворов.

5. При ионной силе водной фазы 1 моль/л процесс из эндотермического превращается в экзотермический.

6. Анализ кинетических зависимостей экстракции йода показал, что процесс лимитируется диффузией. Различия в величинах концентрационного и временного порядков реакции свидетельствуют о наличии промежуточных стадий комплексобразования [20]. С ростом минерализации энергия активации уменьшается, а температура практически не влияет на скорость процесса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кирюхин В. К., Швец В. М. Процессы формирования йодных вод. М.: Недра, 1980. 95 с.
2. Ponomareva P. A., Salnikova E. V., Osipova E. A., Yudin A. A. Extraction of iodine from natural and technogenic waters // Trace Elements and Electrolytes. 2021. Vol. 38, no. 3. P. 153.
3. Дошарова Д. Т., Сальникова Е. В., Верева В. Н., Карева Е. Ю. Исследование термодинамических и кинетических параметров экстракции неодима

из кислых сред // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2018. Т. 8. N 2. С. 39–47. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2018-8-2-39-47>.

4. Arkhipin A. S., Nesterov A. V., Kovalenko N. A., Uspenskaya I. A. Liquid – liquid equilibria in the water – nitric acid – europium nitrate – gadolinium nitrate – tributyl phosphate system at 298.15 K // Journal of Chemical and Engineering Data. 2021. Vol. 66, no. 4. P. 1694–1702. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.1c00000>.

1021/acs.jced.0c01006.

5. Kurdakova S. V., Kovalenko N. A., Petrov V. G., Uspenskaya I. A. Liquid – liquid equilibria in multi-component systems containing o-xylene, Di-(2-ethylhexyl) phosphoric acid, water, nitric acid, and europium (gadolinium, dysprosium) nitrate at 298.15 K // *Journal of Chemical and Engineering Data*. 2017. Vol. 62, no. 12. P. 4337–4343. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.7b00696>.

6. Kurdakova S. V., Zapolskih T. V., Kovalenko N. A., Uspenskaya I. A. Volumetric properties of the D2ENPA – o-xylene – neodymium (samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium) Di(2-ethylhexyl)phosphate systems at 298.15 K // *Journal of Chemical and Engineering Data*. 2018. Vol. 63, no. 10. P. 3839–3845. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.8b00487>.

7. Пат. № 2326810, Российская Федерация, C01B 7/14, B01D11/00. Способ извлечения йода / П. А. Пономарева, Э. В. Строева, М. А. Киекпаев; заявитель и патентообладатель Оренбургский государственный университет. Заявл. 12.09.2006; опубл. 20.06.2008. Бюл. № 17.

8. Пат. № 2331576, Российская Федерация, C01B7/14, B01D11/00. Способ извлечения йода / А. С. Горяева, Ю. В. Гаврюшенко, Э. В. Строева, М. А. Киекпаев, П. А. Пономарева; заявитель и патентообладатель Оренбургский государственный университет. Заявл. 27.07.2006; опубл. 20.08.2008. Бюл. № 23.

9. Сальникова Е. В., Кван О. В., Сизенцов А. Н. Показатели качества подземных вод Оренбургской области // *Микроэлементы в медицине*. 2017. Т. 18. N 1. С. 52–56.

10. Skalny A. V., Salnikova E. V., Burtseva T. I., Skalnaya M. G., Tinkov A. A. Zinc, copper, cadmium, and lead levels in cattle tissues in relation to different metal levels in ground water and soil // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26, no. 1. P. 559–569. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3654-y>.

11. Звягина О. А., Макорина О. Г., Дошарова Д. Т., Сальникова Е. В., Каныгина О. Н. Изучение влияния ионов Fe(III) на кинетические параметры экстракции неодайма смесями экстрагентов различного состава // *Фундаментальная наука и технологии – перспективные разработки: материалы XIX Международной научно-практической*

конференции (г. Северный Чарльстон, 10–11 июня 2019 г.). Северный Чарльстон: LuluPress Inc., 2019. С. 110–114.

12. Пономарева П. А., Строева Э. В. Определение термодинамических и кинетических параметров экстракции йода ТБФ в смеси с изооктаном из бессолевых растворов // *Химическая промышленность сегодня*. 2007. N 12. С. 22–26.

13. Восков А. Л., Коваленко Н. А., Куценко И. Б., Успенская И. А. Развитие расчетных методов в лаборатории химической термодинамики химического факультета МГУ // *Журнал физической химии*. 2019. Т. 93. N 10. С. 1445–1454. <https://doi.org/10.1134/S0044453719100327>.

14. Ponomareva P. A., Yudin A. A. Thermodynamic parameters of iodine extraction by a mixture of aromatic and aliphatic extragents from aqueous solutions of various mineralization // *Chemical Physics of Molecules and Polyfunctional Materials: Proceedings of the Japanese–Russian Conference, 9–11 December 2020, Hiroshima*. Orenburg: OSU, 2021. P. 153–157.

15. Пономарева П. А. Определение равновесных параметров экстракции йода смесями экстрагентов различной природы // *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2017. N 9. С. 40–43.

16. Коренман И. М. Экстракция в анализе органических веществ. М.: Химия, 1977. 200 с.

17. Экстракция неорганических веществ / под ред. А. В. Николаева. Новосибирск: Наука, 1970. 311 с.

18. Пономарева П. А. Равновесие экстракции йода смесью индивидуальных экстрагентов ароматического и алифатического ряда // *Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Международной научно-методической конференции (г. Оренбург, 25–27 января 2021 г.)*. Оренбург: ОГУ, 2021. С. 2814–2819.

19. Сальникова Е. В., Скальный А. В., Осипова Е. А., Бурцева Т. И. Физико-химические методы исследования в анализе объектов окружающей среды (обзор) // *Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии*. 2016. Т. 19. N 8. С. 32–36.

20. Золотов Ю. А. Экстракция внутрикомплексных соединений. М.: Наука, 1968. 295 с.

REFERENCES

1. Kiryukhin V. K., Shvets V. M. *Iodine waters formation*. Moscow: Nedra; 1980. 95 p. (In Russian).

2. Ponomareva P. A., Salnikova E. V., Osipova E. A., Yudin A. A. Extraction of iodine from natural and technogenic waters. *Trace Elements and Electrolytes*. 2021;38(3):153.

3. Dosharova D. T., Salnikova E. V., Verevka V. N., Kareva E. Y. Investigation of the thermodynamic and kinetic parameters of neodymium extraction

from acid media. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2018;8(2):39-47. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2018-8-2-39-47>.

4. Arkhipin A. S., Nesterov A. V., Kovalenko N. A., Uspenskaya I. A. Liquid – liquid equilibria in the water – nitric acid – europium nitrate – gadolinium nitrate – tributyl phosphate system at 298.15 K. *Jour-*

nal of Chemical and Engineering Data. 2021;66(4):1694-1702. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.0c01006>.

5. Kurdakova S. V., Kovalenko N. A., Petrov V. G., Uspenskaya I. A. Liquid – liquid equilibria in multi-component systems containing o-xylene, Di-(2-ethylhexyl) phosphoric acid, water, nitric acid, and europium (gadolinium, dysprosium) nitrate at 298.15 K. *Journal of Chemical and Engineering Data*. 2017;62(12):4337-4343. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.7b00696>.

6. Kurdakova S. V., Zapolskih T. V., Kovalenko N. A., Uspenskaya I. A. Volumetric properties of the D2EHPA – o-xylene – neodymium (samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium) Di(2-ethylhexyl)phosphate systems at 298.15 K. *Journal of Chemical and Engineering Data*. 2018;63(10):3839-3845. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.8b00487>.

7. Ponomareva P. A., Stroeve E. V., Kiekpaev M. A. *Method of extracting iodine*. Patent RF, no. 2326810; 2008. (In Russian).

8. Gorjaeva A. S., Gavryushenko J. V., Stroeve E. V., Kiekpaev M. A., Ponomareva P. A. *Method of extraction of iodine*. Patent RF, no. 2331576; 2008. (In Russian).

9. Salnikova E. V., Kwan O. V., Sizentsov A. N. Quality indicators of underground water in Orenburg region. *Mikroelementy v meditsine = Trace Elements in Medicine*. 2017;18(1):52-56. (In Russian).

10. Skalny A. V., Salnikova E. V., Burtseva T. I., Skalnaya M. G., Tinkov A. A. Zinc, copper, cadmium, and lead levels in cattle tissues in relation to different metal levels in ground water and soil. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019;26(1):559-569. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3654-y>.

11. Zvyagina O. A., Makorina O. G., Dosharova D. T., Sal'nikova E. V., Kanygina O. N. Investigation of Fe(III) ions effect on the kinetic parameters of the neodymium extraction by extractants mixtures. In: *Fundamental'naya nauka i tekhnologii – perspektivnye razrabotki: materialy XIX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Fundamental Science and Technology – Promising Developments: Materials of the XIX International Scientific and Practical Conference*. 10–11 June 2019, North Charleston. North Charleston, 2019. P. 110-114. (In Russian).

12. Ponomareva P. A., Stroeve E. V. Determination of the thermodynamic and kinetic parameters of the iodine extraction by TBP mixtured with isooctane

from salt-free solutions. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya = Chemical Industry Today*. 2007;(12):22-26. (In Russian).

13. Voskov A. L., Kovalenko N. A., Kutsenok I. B., Uspenskaya I. A. Developing calculation methods in the laboratory of chemical thermodynamics at the chemistry department of Moscow State University. *Zhurnal Fizicheskoi Khimii = Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2019;93(10):1445-1454. <https://doi.org/10.1134/S0044453719100327>.

14. Ponomareva P. A., Yudin A. A. Thermodynamic parameters of iodine extraction by a mixture of aromatic and aliphatic extragents from aqueous solutions of various mineralization. In: *Chemical Physics of Molecules and Polyfunctional Materials: Proceedings of the Japanese–Russian Conference*. 9–11 December 2020, Hiroshima. Orenburg: OSU; 2021. P. 153-157.

15. Ponomareva P. A. Determination of equilibrium parameters of extraction of iodine by mixtures of extragents of various nature. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta = Vestnik of the Orenburg State University*. 2017;(9):40-43. (In Russian).

16. Korenman I. M. *Extraction in the analysis of organic substances*. Moscow: Khimiya; 1977. 200 p. (In Russian).

17. *Extraction of inorganic substances*. Nikolaeva A. V. (ed.). Novosibirsk: Nauka; 1970. 311 p.

18. Ponomareva P. A. Equilibrium of iodine extraction with a mixture of individual aromatic and aliphatic extractants. In: *The University Complex as a Regional Center for Education, Science and Culture: Proceedings of the International Scientific and Methodological Conference = The University Complex as a Regional Center for Education, Science and Culture: Proceedings of the International Scientific and Methodological Conference*. 25–27 January 2021, Orenburg. Orenburg: Orenburgskii Gosudarstvennyi Universitet; 2021. P. 2814-2819. (In Russian).

19. Sal'nikova E. V., Skal'nyi A. V., Osipova E. A., Burtseva T. I. Physico-chemical methods of investigation the object of analysis the environment (overview). *Voprosy biologicheskoi, meditsinskoi i farmatsevticheskoi khimii = Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*. 2016;19(8):32-36. (In Russian).

20. Zolotov Yu. A. *Extraction of chelate compounds*. Moscow: Nauka; 1968. 295 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

П. А. Пономарева,
старший преподаватель,
Оренбургский государственный университет,
460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13,
Российская Федерация,
pponomareva@narod.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2003-3390>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Polina A. Ponomareva,
Senior Lecturer,
Orenburg State University,
13, Pobedy Ave., 460018, Orenburg,
Russian Federation,
pponomareva@narod.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2003-3390>

О. Н. Каныгина,
д.ф.-м.н., профессор,
Оренбургский государственный университет,
460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13,
Российская Федерация,
onkan@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6501-900X>

Е. В. Сальникова,
д.б.н., заведующая кафедрой химии,
Оренбургский государственный университет,
460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13,
Российская Федерация,
salnikova_ev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8901-1798>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.*

Информация о статье

*Поступила в редакцию 20.05.2022.
Одобрена после рецензирования 03.06.2022.
Принята к публикации 15.06.2022.*

Olga N. Kanygina,
Dr. Sci. (Physics, Mathematics), Professor,
Orenburg State University,
13, Pobedy Ave., 460018, Orenburg,
Russian Federation,
onkan@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6501-900X>

Elena V. Salnikova,
Dr. Sci. (Biology), Head of the Department
of Chemistry,
Orenburg State University,
13, Pobedy Ave., 460018, Orenburg,
Russian Federation,
salnikova_ev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8901-1798>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

*The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.*

Information about the article

*The article was submitted 20.05.2022.
Approved after reviewing 03.06.2022.
Accepted for publication 15.06.2022.*