

ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ Np(V) КАРБОГИДРАЗИДОМ, КАТАЛИЗИРУЕМОГО Tc(VII), В ПРИСУТСТВИИ U(VI)

© 2022 г. К. Н. Двоеглазов^{а,*}, Е. Ю. Павлюкевич^а, Е. Д. Филимонова^а, В. Н. Алексеенко^б

^а *Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. акад. А.А. Бочвара, 123098, Москва, ул. Рогова, д. 5а*

^б *Горно химический комбинат, 660049, Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, д. 53*

**e-mail: KNDvoeglazov@bochvar.ru*

Поступила в редакцию 25.01.2021, после доработки 21.02.2021, принята к публикации 25.02.2021

Спектрофотометрическим методом изучена кинетика восстановления Np(V) карбогидразидом в азотнокислой среде в присутствии ионов Tc(VII) и U(VI). Восстановленная форма Np(IV) неустойчива во времени, наблюдается обратное окисление, ускоряющееся при увеличении концентрации ионов Tc(VII) и температуры. Скорость стадии восстановления существенно выше скорости обратного окисления. Найдены порядки обеих стадий реакции по всем компонентам.

Ключевые слова: нептуний, растворы, восстановление, карбогидразид, катализ, технеций, уран, кинетика, механизм.

DOI: 10.31857/S0033831122020046, **EDN:** FOBCPA

ВВЕДЕНИЕ

В ходе экстракционной переработки ОЯТ на восстановительную реэкстракцию нептуний поступает в шестивалентном состоянии. Одним из восстановителей, предлагаемых для проведения совместной реэкстракции плутония и нептуния [1], является карбогидразид (КГ), $\text{CO}(\text{N}_2\text{H}_5)_2$. При взаимодействии с карбогидразидом Np(VI) быстро восстанавливается до Np(V) [2]. Дальнейшее восстановление Np(V) до Np(IV) протекает со значительно меньшей скоростью. Скорость этой реакции изучена при 70°C в работе [3]. Ионы Pu катализируют реакцию восстановления ионов Np(V) карбогидразидом. Установлено, что скорость реакции восстановления Np(V) пропорциональна концентрации КГ в степени 0.85, азотной кислоты в степени 1.3, Np(VI) в степени 1.8.

При взаимодействии с большинством органических производных гидразина Tc(VII) восстанавливается до малоэкстрагируемых форм Tc(IV, V) [4–6], которые при реэкстракции переходят в водную фазу. В связи с тем, что данные формы Tc неустой-

чивы к воздействию азотной и азотистой кислот, они частично окисляются и тем самым оказывают каталитическое влияние как на разложение восстановителя, так и на образование восстановленных форм актинидов (Pu(III), Np(V), Np(IV)).

Каталитическое действие Tc при восстановлении Pu(IV) гидразином описано в работе [7], оксиэтилгидразином – в работе [8] и диформилгидразином – в работе [9]. Влияние Tc на восстановление Np(V) гидразином описано в работе [7]. В связи с этим нельзя исключить подобное влияние на восстановление Np(V) карбогидразидом. Определение условий возможного влияния на получение Np(IV) важно с технологической точки зрения, так как его образование может уменьшить долю реэкстракции Np и, следовательно, снизить очистку экстракта урана от нептуния.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Оборудование, реактивы, методы анализа. За изменением валентных форм нептуния следили спектрофотометрическим методом на спектрофото-

Таблица 1. Коэффициенты экстинкции (ϵ , л·моль⁻¹·см⁻¹) Np(IV) и Np(V), соответствующие длинам волн 617 и 701 нм, при 65°C и различной концентрации реагентов

[HNO ₃], моль/л	[КГ], моль/л	Np(IV)		Np(V)	
		ϵ (617 нм)	ϵ (701 нм)	ϵ (617 нм)	ϵ (701 нм)
3.0	0	1.7	28.9	11.4	0.1
3.0	0.086	1.8	29.3	–	–
2.7	0.231	2.0	29.6	–	–
2.0	0	1.6	28.6	12.3	0.5
1.95	0.086	1.8	28.8	–	–
1.85	0.231	2.0	29.1	–	–
0.95	0	2.1	28.8	13.0	0.7
0.95	0.086	2.1	28.7	–	–
0.95	0.231	2.3	28.3	–	–

метре Lambda 465 (Perkin Elmer) под управлением персонального компьютера.

Запасной раствор нептуния готовили растворением навески NpO₂ в 7 моль/л HNO₃ при кипячении. Далее проводили сорбционную очистку на анионите ВП-1 АП и упаривание полученного десорбата с целью окисления нептуния до шестивалентного состояния.

Запасной раствор пертехнетата аммония готовили растворением его навески в дистиллированной воде. Концентрацию Тс в запасном растворе определяли спектрофотометрическим методом по значению оптической плотности при длине волны 288 нм, где расположен характеристический пик ионов ТсО₄⁻.

Запасной раствор КГ готовили растворением в 1 моль/л HNO₃ навески препарата с массовой долей основного продукта 97% производства Acros Organics (США). Концентрацию КГ в запасном растворе определяли титрованием 0.1 н. раствором нитрата натрия в среде 4 моль/л HCl. Приготовленный раствор КГ хранили в темном прохладном месте и использовали на протяжении не более 14 календарных дней.

В работе использовали азотную кислоту марки ос.ч., которую дополнительно очищали дистилляцией. Концентрацию кислоты в запасном растворе устанавливали титрованием аликвоты этого раствора 0.1 н. щелочью с использованием автоматического титратора АТП-02, в рабочих растворах, содержащих уран и нептуний, – потенциометрическим титрованием в среде оксалата аммония.

Для определения концентрации валентных форм нептуния в исследуемых растворах были найдены

коэффициенты экстинкции Np(IV) и Np(V) с учетом влияния концентрации азотной кислоты и КГ. Результаты определения коэффициентов экстинкции представлены в табл. 1. Видно, что наблюдается слабая тенденция увеличения коэффициента экстинкции при росте концентрации КГ при концентрации азотной кислоты от 1.8 до 3.0 моль/л.

Расчет концентраций валентных форм производили по закону Бугера–Ламберта–Бера с учетом суперпозиции их поглощения при длинах волн 617 и 701 нм:

$$D_{\text{изм}}^{\lambda 617} = (\epsilon_{\text{Np(V)}}^{\lambda 617} \times C_{\text{Np(V)}} + \epsilon_{\text{Np(IV)}}^{\lambda 617} \times C_{\text{Np(IV)}}) \times l, \quad (1)$$

$$D_{\text{изм}}^{\lambda 701} = (\epsilon_{\text{Np(V)}}^{\lambda 701} \times C_{\text{Np(V)}} + \epsilon_{\text{Np(IV)}}^{\lambda 701} \times C_{\text{Np(IV)}}) \times l, \quad (2)$$

где ϵ – коэффициент экстинкции, C – концентрация, l – длина оптического пути, D – оптическая плотность.

Методика эксперимента. В оптическую кювету вносили последовательно все растворы, кроме восстановителя. Размещали кювету с раствором в термостатируемом кюветном отделении спектрофотометра. Выдерживали для нагревания не менее 15 мин. Добавляли аликвоту восстановителя, перемешивали не более 30 с и начинали автоматическую запись спектров в диапазоне длин волн от 350 до 1100 нм через определенные промежутки времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В связи с тем, что в нашем предыдущем исследовании [3] было показано, что при комнатной температуре восстановление Np(V) с помощью КГ происходит медленно, для наблюдения за изменением концентрации в практически приемлемое время все

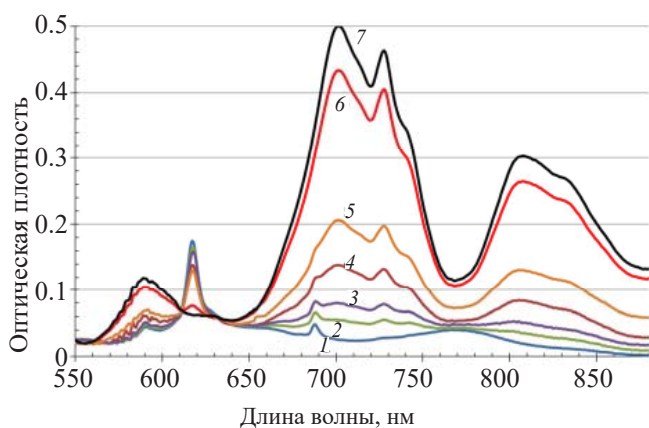


Рис. 1. Изменение спектров при $[U] = 20$ г/л, $[Np] = 0.014$ моль/л, $[HNO_3] = 3$ моль/л, $[КГ] = 0.3$ моль/л и $68^\circ C$ во времени: 1 – 10 с, 2 – 3 мин, 3 – 5 мин, 4 – 10 мин, 5 – 15 мин, 6 – 40 мин, 7 – 96 мин.

эксперименты проводили при температуре от 40 до $68^\circ C$.

При добавлении КГ к раствору Np(V) происходит изменение спектра: значения оптической плотности при 617 и 980 нм, где находятся характеристические пики Np(V), постепенно уменьшаются, а в области 650 – 850 нм появляются пики, характерные для Np(IV) (рис. 1). В связи с тем, что основной пик Np(V) при 980 нм имеет высокий коэффициент экстинкции (250 – 300), а пик Np(IV) при 701 нм имеет коэффициент экстинкции от 28 до 32 л·моль $^{-1}$ ·см $^{-1}$, то одновременно наблюдать за изменением этих пиков невозможно. Поэтому за одновременным изменением концентрации Np(V) и Np(IV) следили по изменению оптической плотности при 617 и 701 нм соответственно.

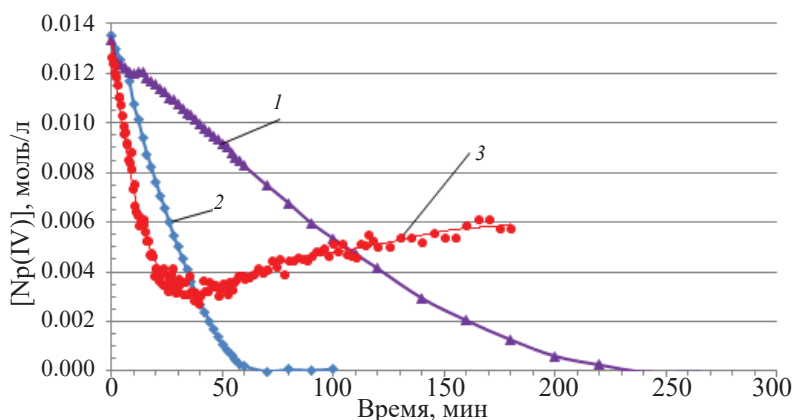


Рис. 2. Изменение концентрации Np(V) во времени при $[Np]_0 = 0.014$ моль/л, $[КГ] = 0.3$ моль/л, $[HNO_3] = 3.0$ моль/л и $68^\circ C$: 1 – без добавок, 2 – в присутствии $[U] = 30$ г/л, 3 – в присутствии $[Tc] = 100$ мг/л.

При добавлении к раствору Np(V) нитрата уранила скорость восстановления значительно возрастает, при этом наблюдается полное восстановление Np(V) до Np(IV). При внесении в раствор пертехнетата аммония до 100 мг/л (по Tc) также наблюдается ускорение реакции восстановления, но при этом восстановление проходит не до конца, а через минимум, и затем наблюдается обратное окисление Np(IV). Описанное изменение концентрации Np(V) графически представлено на рис. 2.

Восстановление Np(V) в присутствии ионов Tc сопровождается значительным газовыделением, которое проявляется на кинетических кривых в виде разброса значений концентрации Np(V) (кривая 3, рис. 2). Особенно это заметно в точке перегиба концентрации Np(V). Таким образом, можно сделать вывод, что ионы Tc(VII) и U(VI) катализируют реакцию восстановления Np(V) карбогидразидом в разной степени.

Общее поведение Np(V) в исследуемой системе похоже на его поведение в присутствии гидразина, которое изучено в работе [7]. Отличие заключается в скорости обратного окисления. В присутствии КГ обратное окисление Np(IV) значительно медленнее и не доходит до конца во всех исследованных условиях.

Рассмотрим более подробно влияние всех компонентов на скорость восстановления Np(V) карбогидразидом.

Как было уже отмечено выше, добавление ионов уранила ускоряет реакцию восстановления Np(V) карбогидразидом. Без нитрата уранила время «полуреакции» (восстановление на 50%) составляет

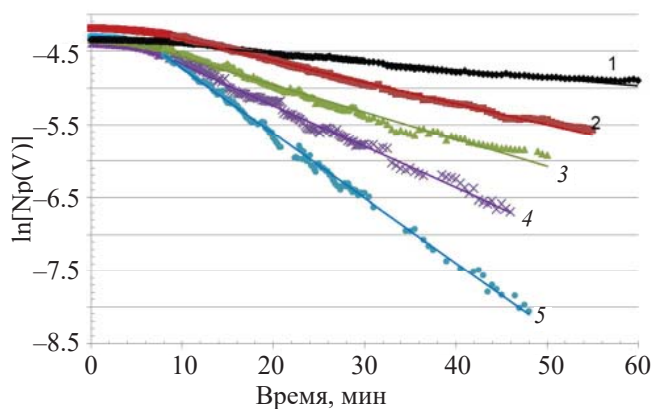


Рис. 3. Зависимость $\ln[\text{Np(V)}]$ от времени при $[\text{HNO}_3] = 1$ моль/л, $[\text{CO}(\text{N}_2\text{H}_3)_2] = 0.3$ моль/л, $[\text{U}] = 20$ г/л, 40°C и различной концентрации технеция, мг/л: 1 – 50, 2 – 100, 3 – 150, 4 – 200, 5 – 300.

80 мин (рис. 2), а в присутствии 30 гU/л – 22 мин, т.е. время «полуреакции» уменьшается почти в 4 раза. Однако, при дальнейшем изменении концентрации U(VI) от 20 до 40 г/л время «полуреакции» изменяется менее значительно, от 20 до 11 мин.

В отсутствие технеция кинетические кривые убывающей концентрации Np(V) не описываются ни уравнением нулевого порядка, ни уравнением первого порядка, наблюдается изменение порядка во времени. Начальная часть кинетической кривой, до восстановления на 30–40%, описывается линейной функцией, т.е. нулевым порядком, а остальная часть кривой описывается уравнением первого порядка вплоть до 95%-ного восстановления. Отсюда следует вывод, что восстановление происходит по двум параллельным путям с близкими скоростями.

При добавлении ионов Tc(VII) вид кинетической кривой сильно изменяется. В начальный момент времени наблюдается индукционный период, после которого скорость восстановления увеличивается. При увеличении концентрации Tc(VII) наблюдается небольшое ускорение как стадии восстановления, так и стадии окисления, однако на время индукционного периода это не влияет. Кинетические кривые как Np(V), так и Np(IV) до точки перегиба описываются уравнением первого порядка, что видно при преобразовании кривых в полупологарифмических координатах $\ln[\text{Np(V)}]$ –время (рис. 3). Из тангенса угла наклона полученных линейных зависимостей (без учета индукционного периода) находили константу первого порядка относительно нептуния. Подобным образом рассчитали констан-

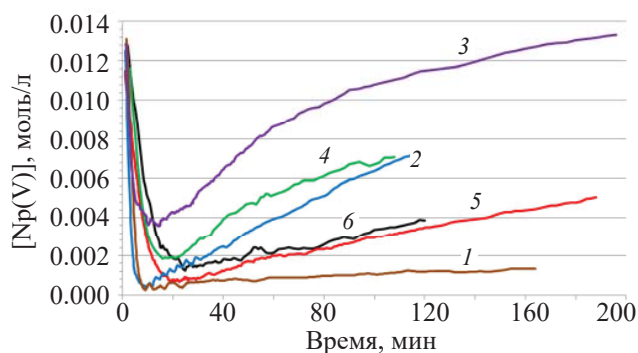


Рис. 4. Изменение концентрации $[\text{Np(V)}]$ во времени при $[\text{Np}]_0 = 0.014$ моль/л, $[\text{Tc}] = 100$ мг/л, $[\text{U}] = 20$ г/л, $[\text{KГ}] = 0.3$ моль/л, 68.0°C и различной концентрации азотной кислоты $[\text{HNO}_3]$, моль/л: 1 – 0.7, 2 – 1.0, 3 – 1.5, 4 – 2.0, 5 – 2.5, 6 – 3.0.

ты для всех выполненных экспериментов (табл. 2). Из значений констант скорости графическим путем определен порядок реакции по всем компонентам. Порядок реакции для константы скорости восстановления (k_1) по Tc оказался равен 0.35.

При уменьшении концентрации азотной кислоты наблюдается более продолжительный индукционный период в появлении Np(IV), а скорость восстановления уменьшается (рис. 4). Скорость стадии обратного окисления изменяется по более сложной зависимости. При увеличении концентрации кислоты от 0.7 до 1.5 моль/л скорость увеличивается, а затем замедляется. Наиболее вероятно это связано с образованием менее реакционноспособных комплексов Np^{4+} с нитрат-ионами [10]. Второй причиной может быть уменьшение доли гидролизованых ионов $\text{Np}(\text{OH})^{3+}$, которые являются более реакционноспособными по сравнению с акваионом Np^{4+} [11].

Из рис. 5 видно, что порядок реакции для k_1 по азотной кислоте изменяется в исследованном диапазоне. При $[\text{HNO}_3]$ от 1.0 до 1.5 моль/л порядок реакции равен -2.3 , в диапазоне от 1.5 до 3.0 моль/л порядок равен -1 . Это возможно при изменении механизма реакции или при существенном изменении скорости одной из параллельных реакций в зависимости от концентрации кислоты.

При увеличении концентрации карбогидразида скорость восстановления увеличивается, наблюдаемая скорость обратного окисления остается постоянной, что видно из наклонов кинетических кривых. Это приводит к выводу, что на этой стадии

Таблица 2. Условия экспериментов и рассчитанные значения констант скорости

[Np], моль/л	[КГ], моль/л	[U], г/л	[Tc], мг/л	[HNO ₃], моль/л	T, °C	k ₁ , мин ⁻¹	k ₂ , мин ⁻¹
0.014	0.3	20	0	3	58.6	–	–
0.014	0.3	25	0	3	68	0.0453	–
0.014	0.3	35	0	3	68	0.0569	–
0.014	0.3	40	0	3	68	0.063	–
0.014	0.3	20	0	3	68	0.0378	–
0.014	0.3	20	50	3	68	0.0831	0.00117
0.014	0.3	20	100	3	68	0.116	0.0101
0.014	0.3	20	74	3	68	0.0952	0.00103
0.014	0.3	0	100	3	68	0.0582	0.00245
0.014	0.4	20	100	3	68	0.195	0.00215
0.014	0.2	20	100	3	68	0.0901	0.00187
0.014	0.1	20	100	3	68	0.0338	0.00183
0.014	0.3	20	100	2	68	0.185	0.00783
0.014	0.3	20	100	1.5	68	0.249	0.0167
0.014	0.3	20	100	2.5	68	0.169	0.00295
0.014	0.15	20	100	3	68	0.0568	0.0017
0.014	0.25	20	100	3	68	0.105	0.00172
0.014	0.3	20	30	3	68	0.0751	0.0002
0.0105	0.3	20	100	1	68	0.528	0.00741
0.014	0.3	20	100	1	68	0.526	0.0077
0.014	0.3	20	100	1.2	68	0.45	0.00744
0.014	0.3	20	100	1	60	0.282	0.00188
0.014	0.3	20	100	1	55	0.2	0.000888
0.014	0.3	20	100	1	50	0.1079	–
0.014	0.3	20	100	1	40	0.0284	–
0.014	0.3	20	300	1	40	0.0917	–
0.014	0.3	20	200	1	40	0.0548	–
0.014	0.3	20	50	1	40	0.0116	–
0.014	0.3	20	150	1	40	0.029	–
0.014	0.3	60	100	1	40	0.0604	–
0.014	0.3	40	100	1	40	0.041	–

либо карбогидразид не участвует в реакциях, либо его влияние несущественно. Порядок реакции стадии восстановления Np(V) не меняется во всем исследованном диапазоне и равен 1.2.

Зависимость скорости реакции от концентрации урана определяли при температуре 40°C и концентрации азотной кислоты 1 моль/л. Из табл. 2 видно, что с увеличением концентрации ионов урана(VI) константа скорости k_1 увеличивается. Порядок по урану для k_1 оказался равным 0.67.

Для уточнения влияния технеция на скорость реакции восстановления Np(V) проведена дополнительная серия экспериментов при 40°C и $[HNO_3] = 1$ моль/л. Результаты расчета констант скорости k_2 представлены в табл. 2. Видно, что влияние Tc при этих условиях более сильное, чем при концентрации азотной кислоты 3 моль/л. Порядок реакции по Tc оказался равен 1.

В соответствии с полученными порядками уравнение скорости стадии восстановления

Np(V) в исследованной системе запишется в виде

$$-\frac{d[\text{Np(V)}]}{dt} = k_{\text{восст}} \frac{[\text{Np(V)}][\text{Tc(VII)}][\text{U(VI)}]^{0.67} [\text{CO(N}_2\text{H}_3)_2]^{1.2}}{[\text{HNO}_3]^{2.3}}, \quad (3)$$

где $k_{\text{восст}} = (1.06 \pm 0.24) \times 10^4 \text{ л}^{0.57}/(\text{мин} \cdot \text{моль}^{0.57})$ при 68°C в диапазоне концентрации кислоты от 1 до 1.5 моль/л,

$$-\frac{d[\text{Np(V)}]}{dt} = k_{\text{восст2}} \frac{[\text{Np(V)}][\text{Tc(VI)}]^{0.35} [\text{CO(N}_2\text{H}_3)_2]^{1.2}}{[\text{HNO}_3]}, \quad (4)$$

где $k_{\text{восст2}} = (17.8 \pm 1.8) \text{ моль}^{0.55}/(\text{л}^{0.55} \cdot \text{мин})$ при 68°C , $[\text{U(VI)}] = 20 \text{ г/л}$ в диапазоне концентрации кислоты от 1.5 до 3.0 моль/л.

Энергию активации определяли графическим путем в координатах $\ln k_1 - 1/T$. Из тангенса угла наклона прямой рассчитывали энергию активации, которая для стадии восстановления равна 87.8 кДж/моль .

В связи с тем, что стадия обратного окисления Np(IV) в некоторых экспериментах проходит с низкой скоростью, не во всех экспериментах возможно достоверно определить константу скорости. Расчет константы скорости k_2 проводили графическим путем в координатах $\ln([\text{Np}]_0 - [\text{Np(V)}]_t) - \text{время}$. Для расчета учитывали только часть кинетической кривой после стабильного роста концентрации Np(V). Результаты расчета представлены в табл. 2. Порядки реакции по компонентам рассчитывали аналогично рассчитанным для k_1 . В результате получено, что порядок реакции окисления Np(IV) по технецию равен 3. Скорость реакции восстановления не зависит от изменения концентрации карбогидраза. Константа скорости окисления k_2 сложным образом зависит от концентрации азотной кислоты. Зависимость $\ln k_2 - \ln[\text{HNO}_3]$ не является линейной. В соответствии с полученными зависимостями уравнение, отвечающее за скорость окисления Np(IV) в присутствии КГ и ионов технеция, в общем виде можно записать так:

$$\frac{d[\text{Np(IV)}]}{dt} = k_{\text{окисл}} [\text{Np(V)}][\text{Tc(VII)}]^3 [\text{HNO}_3]^m, \quad (5)$$

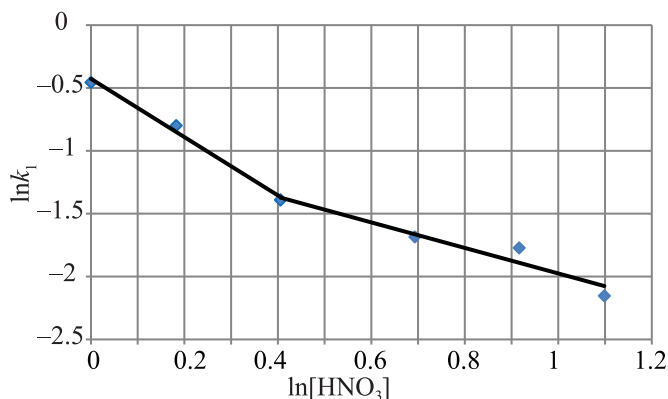


Рис. 5. Зависимость $\ln k_1$ от $\ln[\text{HNO}_3]$ при $[\text{КГ}] = 0.3 \text{ моль/л}$, $[\text{U}] = 20 \text{ г/л}$, $[\text{Tc(VII)}] = 100 \text{ мг/л}$ и 68°C .

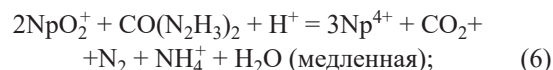
где $k_{\text{окисл}}$ – обобщенная константа скорости окисления Np(V). Энергия активации оценена равной 155 кДж/моль .

ОБСУЖДЕНИЕ

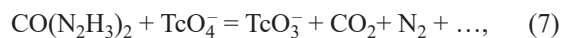
Как видно из полученных зависимостей, реакция каталитического восстановления Np(V) и последующего окисления Np(IV) характеризуется сложным поведением. Следовательно, в системе имеется несколько скорость-определяющих реакций, на которые разнонаправлено влияют изменяемые параметры, прежде всего концентрация азотной кислоты и технеция.

На стадии восстановления Np(V) наиболее вероятные следующие реакции:

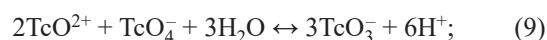
прямое восстановление Np(V) КГ



восстановление Tc(VII) посредством КГ [4]



параллельная реакция получения Tc(V) [12]

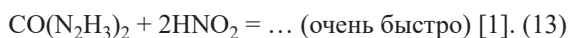
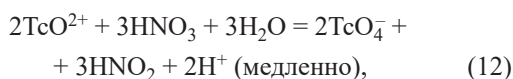


параллельная реакция восстановления Np(V) [7]



В ходе второй части реакции – окисления Np(IV) – наиболее важными являются реакции:





При составлении возможных химических реакций, протекающих в исследуемой системе, сознательно не учитывались реакции окисления валентных форм нептуния и технеция азотистой кислотой. Это сделано из условия, что азотистая кислота очень быстро будет израсходована в соответствии с реакцией (13).

Часть из представленных реакций (6)–(12) уже изучена и описана в виде кинетических уравнений.

В соответствии с представленными уравнениями можно записать систему дифференциальных уравнений (изменением концентрации азотной кислоты на этом этапе расчета пренебрегаем, считаем, что это изменение мало)

$$-d[\text{Np(V)}]/dt = k_1[\text{Np(V)}][\text{CO}(\text{N}_2\text{H}_3)_2] + k_2[\text{Np(V)}][\text{Tc(V)}] - k_3[\text{Np(IV)}][\text{Tc(VII)}], \quad (14)$$

$$-d[\text{Tc(VII)}]/dt = k_4[\text{Tc(VII)}][\text{CO}(\text{N}_2\text{H}_3)_2] + k_5[\text{Tc(VII)}][\text{Tc(IV)}] + k_3[\text{Np(IV)}][\text{Tc(VII)}] - 0k_6[\text{Tc(IV)}][\text{HNO}_3]. \quad (15)$$

Проведена попытка решить систему дифференциальных уравнений (14)–(15) путем подбора неизвестных констант реакций из условия получения кинетических кривых расходования Np(V) и получения Np(IV), наиболее близко описываемых экспериментально полученными кинетическими зависимостями. Однако такой методический подход не привел к желаемому результату.

Подбор возможных окислительно-восстановительных реакций, наиболее адекватно описывающих найденные зависимости, следует продолжить.

С точки зрения применения полученных данных в технологии переработки ОЯТ следует обратить внимание на следующие факты. Скорость окисления Np(IV) во всех исследованных условиях, кроме $[\text{HNO}_3] = 1.5$ моль/л, довольно низкая. На операции восстановительной реэкстракции, предлагаемой для МП ОДЭЖ, рекомендован раствор восстановителя состава $[\text{КГ}] = 0.5$ моль/л и $[\text{HNO}_3] = 0.5$ моль/л. Температура раствора при реэкстракции 40°C. Продолжительность пребывания раствора в экстракционной колонне составляет ориентировочно 1 ч, а концентрация урана – в сред-

нем 60 г/л. Следовательно, вторая часть процесса – окисление Np(IV) – будет происходить с низкой скоростью и этой стадией можно пренебречь как при выборе режима проведения операции совместной реэкстракции плутония и нептуния, так и при ее описании в математической модели экстракционного процесса в целом.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев В.Н.* Карбогидразид: Свойства и применение в водно-экстракционной технологии переработки облученного ядерного топлива: Автореф. дис. ... к.х.н. М., 2013. 15 с.
2. *Завалина О.А., Двоеглазов К.Н., Павлюкевич Е.Ю., Степанов С.И.* // Радиохимия. 2017. Т. 59, № 5. С. 397–401.
3. *Двоеглазов К.Н., Завалина О.А., Павлюкевич Е.Ю., Зверев Д.В., Алексеев В.Н.* // Хим. технология. 2020. Т. 21, № 6. С. 275–281.
4. *Zavalina O., Dvoeglazov K.* // Book of Abstracts. Third Int. Conf. on Radiation and Applications in Various Fields of Research, RAD 2015, Budva, Montenegro June 8–12, 2015. Электронный ресурс <http://rad-conference.org/bookAbstracts.php>
5. *Garraway J., Wilson P.D.* // J. Less-Common Met. 1984. Vol. 97, N 2. P. 191–203.
6. *Колтунов В.С., Журавлева Г.И., Шаповалов М.П.* // Радиохимия. 1993. Т. 35, № 6. С. 43–48.
7. *Марченко В.И., Журавлева Г.И., Двоеглазов К.Н., Савилова О.А.* // Хим. технология. 2008. Т. 9, № 2. С. 61–67.
8. *Баранов С.М., Колтунов В.С.* // Радиохимия. 1991. Т. 33, № 4. С. 58–66.
9. *Volk V., Pavlyukevich E., Dvoeglazov K., Podrezova L., Veselov S.* // Book of Abstracts. 9th Int. Conference on the Chemistry and Physics of the Actinide Elements ACTINIDES 2013. Karlsruhe, Germany, July 21–26, 2013. P. 1–72.
10. *Zhou X., Ye G., Zhang H., Li L., Luo F., Meng Z.* // Radiochim. Acta. 2014. Vol. 102, N1/2. P. 111–116.
11. *Колтунов В.С., Тейлор Р., Марченко В.И., Савилова О.А., Двоеглазов К.Н., Журавлева Г.И.* // Радиохимия. 2005. Т. 47, № 3. С. 228–233.
12. *Zelverte A.* // Rapp. CEA-R-5443. France, 1988. 142 p.