

УДК 544.653.22

**АНОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ УРАНОВЫХ СПЛАВОВ, СОДЕРЖАЩИХ
ПАЛЛАДИЙ И НЕОДИМ В РАСПЛАВАХ $3\text{LiCl}-2\text{KCl}-\text{UCl}_3$** **© 2023 г. Д. И. Никитин^а, *, И. Б. Половов^а, О. И. Ребрин^а,
А. В. Щетинский^а, А. С. Дедюхин^а**^аУральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

*e-mail: house.freshone@ya.ru

Поступила в редакцию 06.12.2022 г.

После доработки 19.12.2022 г.

Принята к публикации 16.01.2023 г.

На модуле переработки площадки опытно-демонстрационного энергетического комплекса Сибирского химического комбината поэтапно реализуется комбинированная технологическая схема переработки смешанного нитридного уран-плутониевого отработавшего топлива, состоящая из пирохимических операций, гидрометаллургического аффинажа урана, плутония и нептуния. Согласно данной схеме, целевые продукты пирохимической переработки, очищенные от основной массы продуктов деления с содержанием актиноидов не менее 99.9 мас. %, направляются на гидрометаллургический передел. Для пирохимической переработки необходимо разработать технологию электрорафинирования металлизированного отработавшего ядерного топлива. Для проведения электролитического рафинирования необходимо определить процессы и режимы анодного растворения сплавов, моделирующих продукт этой головной операции “металлизации”. В настоящей работе представлены результаты исследования процессов анодного растворения модельных сплавов U–Pd и U–Pd–Nd с различными концентрациями палладия и неодима в расплавах на основе $3\text{LiCl}-2\text{KCl}-\text{UCl}_3$ (10.1 мас. % UCl_3) при 550°C с использованием различных методов. Урановые сплавы, содержащие палладий и неодим, были приготовлены прямым сплавлением металлического урана и порошков металлического палладия марки ПдАП-1, и металлического неодима (99.99%) в среде высокочистого аргона (99.998%). Электрохимические измерения проводили с использованием потенциостата/гальваностата Autolab 302N, оснащенного высокоточным модулем Booster 20A. Кривые анодной поляризации состоят только из одной волны окисления, которую отнесли к растворению металлического урана. Увеличение содержания палладия в сплаве с 1.5 до 10.0 мас. %, не влияет на форму поляризационных кривых. Увеличение содержания неодима в сплаве с 1.0 до 10.0 мас. % также не влияет на форму поляризационных кривых. Определены параметры электрорафинирования урановых сплавов, содержащих палладий и неодим. Предельная плотность тока выделения урана из урановых сплавов, содержащих палладий и неодим в электролите $3\text{LiCl}-2\text{KCl}-\text{UCl}_3$ (10.1 мас. % UCl_3) при 550°C, составила 0.4 А/см². Показано, что в результате анодного растворения палладий в расплав не переходит, а неодим накапливается в электролите только при рафинировании сплава с содержанием 10.0 мас. % неодима, что существенно выше будущих реальных концентраций компонентов электрорафинируемого уранового сплава в технологической цепочке переработки отработавшего ядерного топлива.

Ключевые слова: анодное растворение, урановые сплавы, поляризация, гальваностатическое растворение, переработка ОЯТ, электрорафинирование

DOI: 10.31857/S0235010623020081, EDN: MHPPRR

ВВЕДЕНИЕ

Электролитическое рафинирование металлизированного отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в расплавленных солевых электролитах является одним из перспективных этапов пирохимической переработки ОЯТ. Целью рафинирующего электролиза является получение катодного осадка делящихся материалов (например, урана), в то время как электроположительные продукты деления (например, палладий) сохраняются в материале анода, а электроотрицательные продукты деления (например, неодим) остаются в расплаве. Расплавленные соли на основе $3\text{LiCl}-2\text{KCl}$ имеют относительно низкую температуру плавления и могут использоваться в качестве рабочей среды для электроочистки ОЯТ.

Элементный состав ОЯТ зависит от множества факторов, а также изменяется во времени. В работе [1] показано, что при переходе от водных реакторов к реакторам на быстрых нейтронах наблюдается резкий рост выхода благородных металлов в ОЯТ. Среди продуктов деления одним из основных благородных металлов является палладий, образующийся с высоким выходом [2–4]. На текущий момент довольно широко исследованы фундаментальные термодинамические свойства интерметаллических соединений типа U_xPd_y [6–9]. Авторы подробно рассмотрели вопросы теплофизики и выполнили расчеты энергии Гиббса интерметаллидов UPd_3 , UPd_4 , $\text{U}_{0.15}\text{Pd}_{0.85}$. Также изучены различные параметры растворения интерметаллидов состава UPd_x [10–11]. В литературе представлены диаграммы состояния систем $\text{U}-\text{Pd}$, $\text{U}-\text{Pd}-\text{Nd}$ [12, 13], соответственно. В настоящее время в литературе отсутствуют данные о процессах анодного растворения сплавов $\text{U}-\text{Pd}$ и $\text{U}-\text{Pd}-\text{PЗМ}$, исследованных в расплавах на основе $3\text{LiCl}-2\text{KCl}$.

Задачей настоящей работы было изучение особенностей анодного растворения урановых сплавов, содержащих палладий и неодим в электролите $3\text{LiCl}-2\text{KCl}-\text{UCl}_3$ (10.1 мас. % UCl_3) при 550°C .

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве рабочих солей-растворителей в экспериментах использовались хлорид калия (99.8%) и хлорид лития (99.0%). Отдельные хлориды щелочных металлов сушили в вакууме при 300°C в течение 3–5 ч. После этого соли расплавляли и продували смесью хлора и хлористого водорода в течение 5 ч. Дальнейшая обработка заключалась в продувке аргоном высокой чистоты (99.999%) для удаления растворенных хлорирующих агентов. Затем расплавленные соли заливали в алуновы тигли и охлаждали в эксикаторе. Полученные таким образом соли хранили в инертном сухом боксе, заполненном высокочистым аргоном (с контролем влаги и кислорода <10 ppm). Смеси хлоридов лития, калия и урана требуемого состава готовили в боксе с инертной атмосферой путем тщательного перемешивания очищенных индивидуальных солей непосредственно перед экспериментами.

Урановые сплавы, содержащие палладий и неодим, были синтезированы в печи резистивного нагрева прямым сплавлением металлического урана в виде брусков, порошка металлического палладия марки ПдАП-1, порошка металлического неодима (99.99%) в цилиндрическом тигле из оксида бериллия в среде высокочистого аргона (99.998%). Полученный слиток отделяли от тигля и перемещали в перчаточный бокс с инертной атмосферой, в котором слитки из уранового сплава приваривали аргонодуговой сваркой к токоподводу из молибдена марки МЧ. Рабочая поверхность электрода была экранирована трубкой из оксида бериллия, таким образом, торец электрода выполнял роль рабочей поверхности. Фотография уранового сплава с приваренным токоподводом и готовый электрод показаны на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид электродной сборки: *а* – рабочая часть, *б* – с трубой из оксида бериллия.

Рабочие части электродов были прикреплены к молибденовым проволокам, а точка контакта располагалась над расплавом, чтобы предотвратить процессы переноса без тока. Рабочий электролит выдерживали в стеклоуглеродном тигле. Стеклоуглеродный тигель также служил противоэлектродом. Все измерения выполнены с использованием хлорного электрода сравнения. Эксперименты проводили в специально сконструированной реторте с водяным охлаждением из нержавеющей стали, подробно описанной в [14–15], (рис. 2) при температуре 550°C в атмосфере высокочистого аргона.

Во время экспериментов по гальваностатическому растворению сплавов в качестве катода использовался отдельный катодный узел. Узел представлял из себя молибденовый электрод, погруженный в расплав хлорида свинца в чехле из кварца и отделенный от остального расплава диафрагмой из асбеста (рис. 3).

Такое конструктивное решение катодного узла было использовано для того, чтобы исключить выделение щелочного металла в катодной зоне, в начальный момент электролиза, и для аналитической оценки процесса накопления урана в расплаве. Контроль температуры в рабочей зоне осуществлялся с помощью кабельной термопары типа хромель–алюмель. Электрохимические измерения проводили с использованием потенциостата/гальваностата Autolab 302N, оснащенного сильноточным модулем Booster 20A.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Урановые сплавы, содержащие палладий

Для определения величины электродного потенциала растворения в данной работе гальваностатическим коммутаторным и хронопотенциометрическими методами изучены процессы анодной поляризации уран-палладиевых сплавов. Все эксперименты проводили в расплавах $3\text{LiCl}-2\text{KCl}-\text{UCl}_3$ (10.1 мас. % UCl_3) при температуре 550°C. Полученные хронопотенциограммы показаны на рис. 4.

При плотностях тока менее 0.94 А/см² присутствие палладия в материале электрода не отражается на характере кривых “потенциал–время” анодного растворения урановых сплавов. Каких-либо перегибов на кривых включения, связанных с наложением

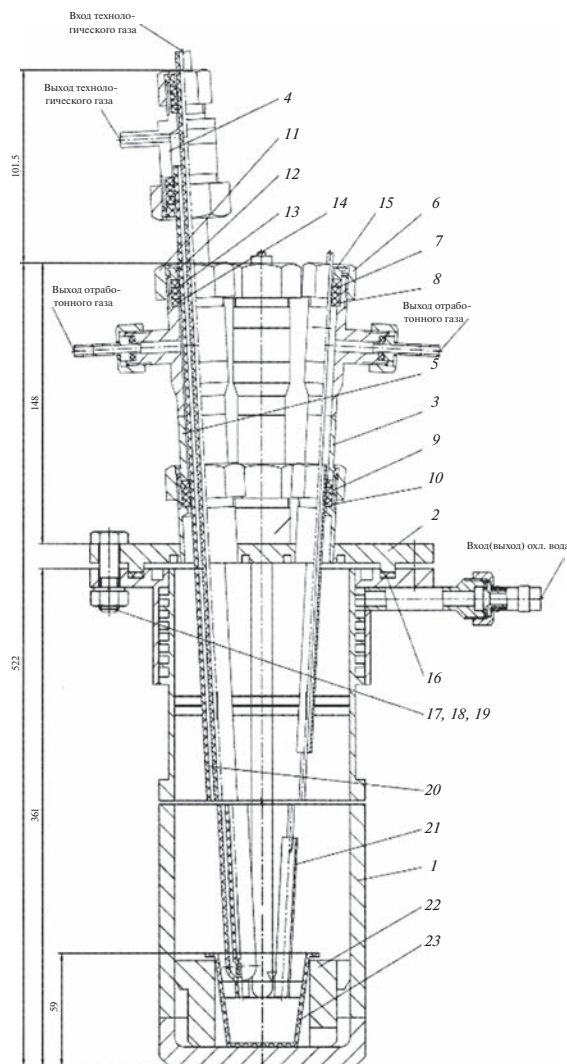


Рис. 2. Конструкция электрохимической ячейки.

электродных процессов при низких плотностях тока (ниже 0.94 А/см^2) обнаружить не удалось.

Вместе с тем в сплаве с содержанием палладия 10.0 мас. % при плотностях тока выше 1.0 А/см^2 на хронопотенциограммах появляется перегиб, сопровождающийся ростом потенциала, что может быть обусловлено достижением потенциала растворения интерметаллида UPd_3 [11, 12] или формированием в приэлектродном слое непроводящей солевой фазы. При растворении сплава с содержанием палладия 1.5 мас. % даже при максимальных для использованного прибора токах (1.20 А/см^2) подобных перегибов не наблюдается.

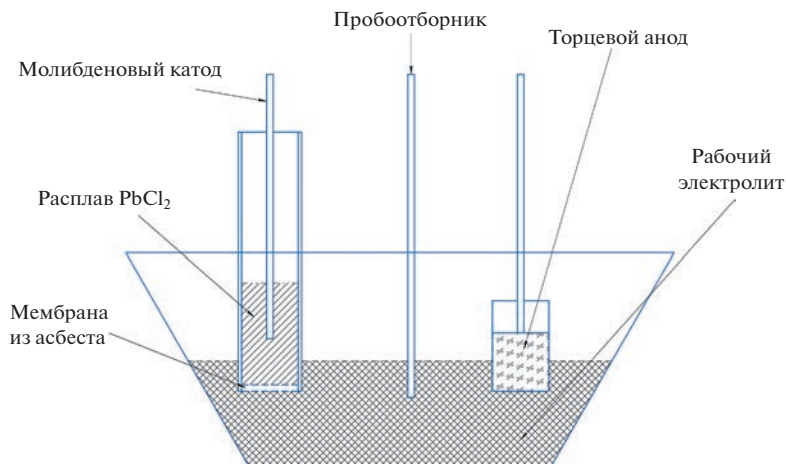


Рис. 3. Схема конструкции ячейки для изучения процесса анодного растворения сплавов.

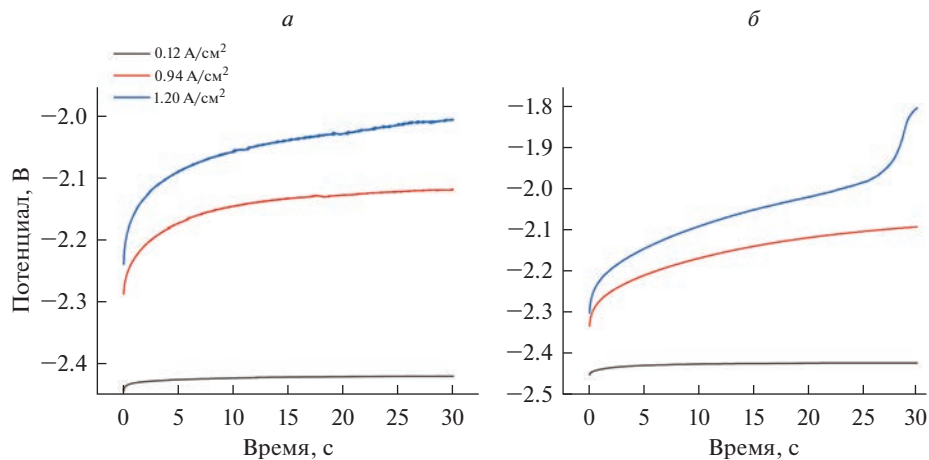


Рис. 4. Зависимости “потенциал–время”, зафиксированные в процессе анодного растворения сплава в расплаве $3\text{LiCl}-2\text{KCl}-\text{UCl}_3$ (10.1 мас. % UCl_3) при 550°C , плотностях тока $0.12\text{--}1.20\text{ А/см}^2$: а – U-Pd (1.5 мас. %), б – U-Pd (10.0 мас. %).

Вывод об отсутствии влияния на характер растворения, увеличение концентрации палладия в материале электрода, подтверждается сравнением поляризационных кривых (рис. 5) для сплавов с 1.5 и 10.0 мас. % палладия.

Увеличение плотности анодного тока до $0.4\text{--}0.5\text{ А/см}^2$ приводит к значительной поляризации, что может привести к ионизации примесных компонентов, растворению интерметаллидов палладия или инициированию перезарядки урана $\text{U(III)} \rightarrow \text{U(IV)}$.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что повышение плотности анодного тока выше 0.4 А/см^2 нежелательно.

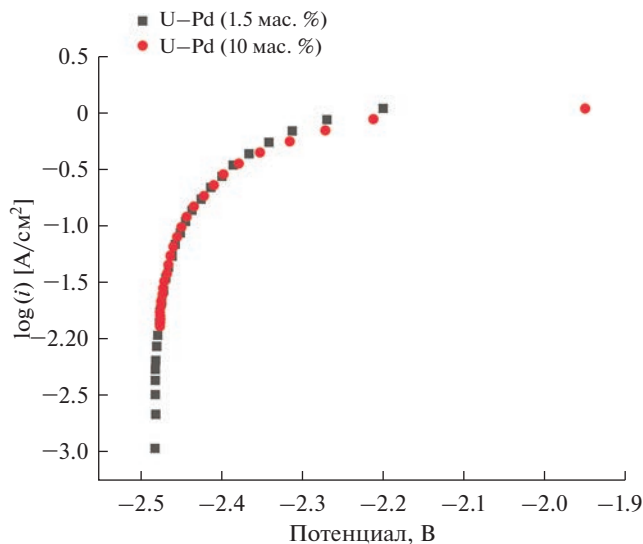


Рис. 5. Сравнение анодной поляризации сплавов U–Pd в расплаве $3LiCl-2KCl-UCl_3$ (10.1 мас. % UCl_3) при $550^\circ C$.

Была проведена серия экспериментов по гальваностатическому анодному растворению U–Pd сплава при плотностях тока $0.35 A/cm^2$ (для 10.0 мас. % палладия в сплаве). В эксперименте использовали катодный узел, показанный на рис. 3. Электролиз проводили поэтапно с интервалом в 3 ч. После окончания каждого цикла электролиза отбирали пробу электролита для химического анализа на содержание урана и палладия. Пробоотбор проводили кварцевым капилляром. Изменение содержания урана в солевом расплаве в процессе анодного растворения сплавов уран–палладий представлено на рис. 5.

Из данных представленных на рис. 6 видно, что процесс анодного растворения переходит в режим насыщения, при этом концентрация урана в расплаве практически перестает изменяться. Данное насыщение может быть связано с превышением растворимости трихлорида урана в электролите при заданных условиях и выпадением в твердую фазу соединения K_2UCl_5 [16]. В результате проведенных экспериментов и полученных данных о процессе анодного растворения сплавов урана с палладием можно сделать вывод, что при плотностях тока до $0.35 A/cm^2$ не происходит растворения палладия и перехода его из металлической фазы в солевую.

Урановые сплавы, содержащие палладий и неодим

Для определения величины сдвига электродного потенциала сплава U–Pd–Nd в данной работе гальваностатическим коммутаторным и хронопотенциометрическим методами изучены процессы анодной поляризации урановых сплавов, содержащих палладий и неодим. Все эксперименты проводились в расплавах $3LiCl-2KCl-UCl_3$ (10.1 мас. % UCl_3) при температуре $550^\circ C$. Полученные хронопотенциограммы показаны на рис. 7.

При плотностях тока до $1.20 A/cm^2$ присутствие заданных концентраций палладия и неодима в материале электрода не отражается на характере кривых “потенциал–время”

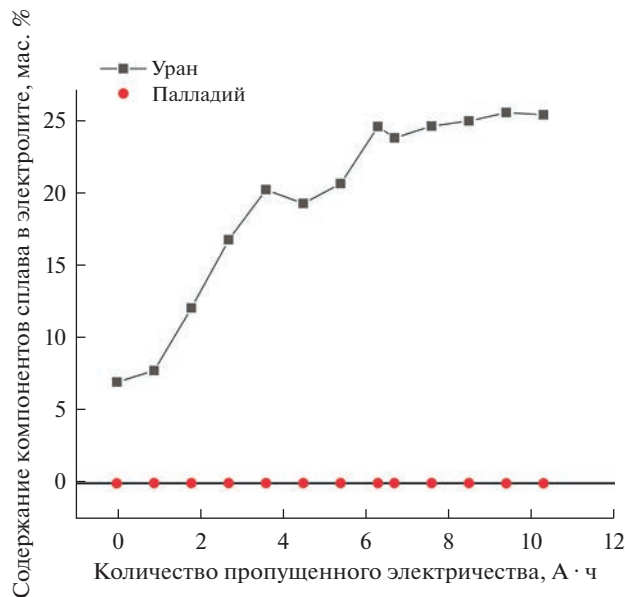


Рис. 6. Содержание урана и палладия в электролите при анодном растворении сплава U–Pd (10.0 мас. %) в расплаве $3\text{LiCl}-2\text{KCl}-\text{UCl}_3$ (10.1 мас. % UCl_3) при 550°C .

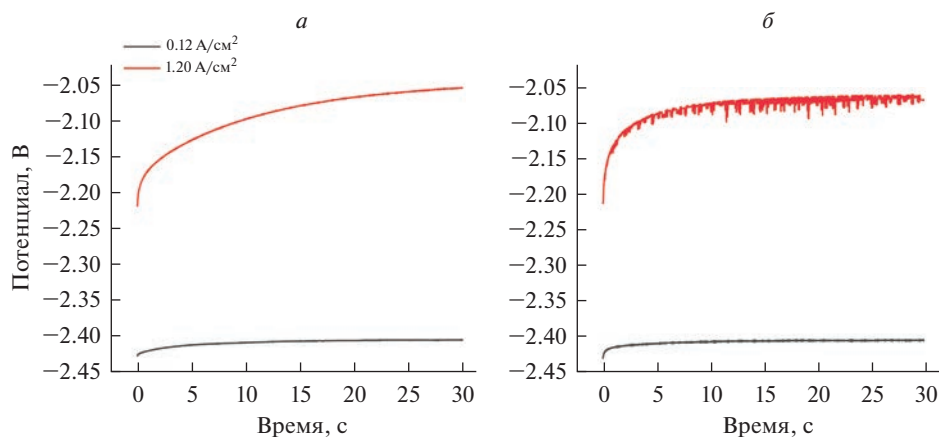


Рис. 7. Зависимости “потенциал–время”, зафиксированные в процессе анодного растворения сплава в расплаве $3\text{LiCl}-2\text{KCl}-\text{UCl}_3$ (10.1 мас. % UCl_3) при 550°C , плотностях тока $0.12-1.20 \text{ A/cm}^2$: а – U–Pd (1.5 мас. %)–Nd (1.0 мас. %), б – U–Pd (1.5 мас. %)–Nd (10.0 мас. %).

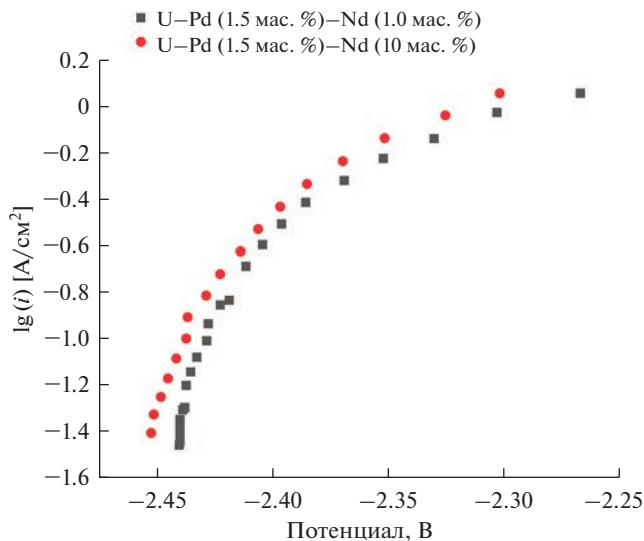


Рис. 8. Сравнение анодной поляризации сплавов U–Pd–Nd в расплаве 3LiCl–2KCl–UCl₃ (10.1 мас. % UCl₃) при 550°C.

анодного растворения урановых сплавов. Каких-либо перегибов на кривых включения, связанных с наложением электродных процессов при плотностях тока до 1.20 А/см² обнаружить не удалось.

Вместе с тем в сплаве с высоким содержанием неодима (10.0 мас. %) при плотностях тока 1.20 А/см² на хронопотенциограммах отмечена нестабильность, что может быть обусловлено разрушением поверхности анода или осыпанием интерметаллида UPd₃.

Вывод об отсутствии влияния на характер растворения увеличения концентрации палладия и неодима в материале электрода подтверждается сравнением поляризационных кривых (рис. 8) для сплавов с 1.5 мас. % палладия и от 1.0 до 10.0 мас. % неодима.

Как и в случае с изучением U–Pd сплавов была проведена серия экспериментов по гальваностатическому анодному растворению U–Pd–Nd сплава при плотности тока 0.35 А/см² (для 10.0 мас. % неодима в сплаве). Электролиз проводили аналогичным, ранее описанным образом, с интервалом в 3 ч. После окончания каждого цикла электролиза отбирали пробу электролита для анализа расплава на содержание урана, палладия и неодима. Изменение содержания компонентов сплава в солевом расплаве в процессе анодного растворения электрода представлено на рис. 9.

Полученные данные о ходе растворения U–Pd–Nd сплава в электролите (рис. 7 и 8) показали, что палладий, входящий в анодный материал не переходит в электролит. Неодим накапливается в электролите в количестве существенно меньшем, чем уран. Накопление урана приходит в режим насыщения при концентрации в электролите около 25.0 мас. %, что определяется фазовой диаграммой состояний [16], которая накладывает ограничение по растворимости UCl₃ в 3LiCl–2KCl, что приводит к образованию твердой фазы-соединения K₂UCl₅.

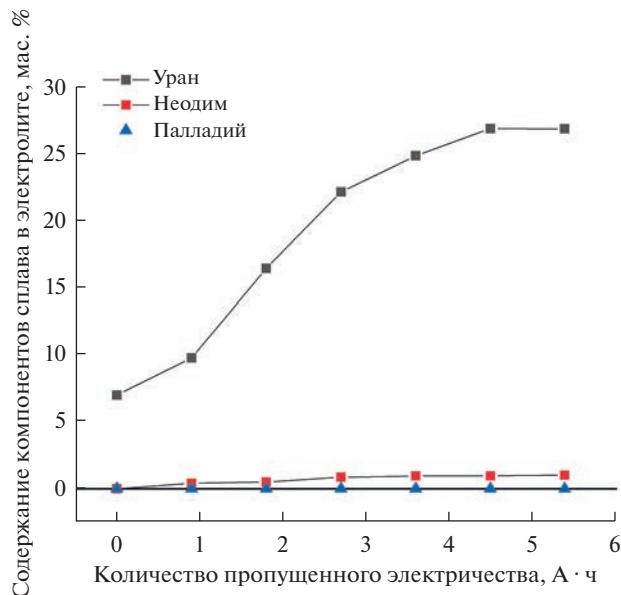


Рис. 9. Содержание урана, палладия и неодима в электролите при анодном растворении сплава U–Pd (1.5 мас. %)–Nd (10.0 мас. %) в расплаве $3\text{LiCl}-2\text{KCl}-\text{UCl}_3$ (10.1 мас. % UCl_3) при 550°C .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процессы анодного растворения урановых сплавов, содержащих палладий и неодим с различным содержанием компонентов были подробно изучены гальваностатическим коммутаторным и хронопотенциометрическим методами. В дополнение к стационарным и нестационарным электрокинетическим методам исследования использовался метод аналитического контроля содержания палладия в расплавах на основе $3\text{LiCl}-2\text{KCl}$ при электролизе с заданной плотностью анодного тока. Кривые анодной поляризации состоят только из одной волны окисления, которую можно отнести к растворению металлического урана. Увеличение содержания палладия в сплаве с 1.5 до 10.0 мас. %, не влияет на форму поляризационных кривых. Увеличение содержания неодима в сплаве с 1.0 до 10.0 мас. % также не влияет на форму поляризационных кривых. Также были изучены предельные токи выделения урана из урановых сплавов, содержащих палладий и неодим. В электролите $3\text{LiCl}-2\text{KCl}-\text{UCl}_3$ (10.1 мас. % UCl_3) при 550°C , предельная анодная плотность тока составила $0.4 \text{ A}/\text{cm}^2$.

При плотности тока $0.35 \text{ A}/\text{cm}^2$, даже при длительном растворении сплава ($10 \text{ A} \cdot \text{ч}$) палладий в расплав не переходит, а ионы неодима накапливаются в электролите только при рафинировании сплава с его содержанием 10.0 мас. %

Реальная концентрация компонентов сплава в технологической цепочке переработки отработавшего ядерного топлива будет значительно ниже, чем 10 мас. %, соответственно, замедлится и нежелательный процесс перехода неодима в расплав. В процессе электрорафинирования не будет достигаться и предельное содержание ионов урана в расплаве в следствии его постоянного выделения на катоде.

Работа была выполнена при финансовой поддержке АО «Прорыв».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Imoto S. Chemical state of fission products in irradiated UO_2 // *Nuclear Materials*. 1986. **140**. № 1. P. 19–27.
2. Bush R.P., Recovery of platinum group metals from high level radioactive waste. Possibilities of separation and use re-evaluated // *Platinum Metals Reviews*. 1991. **35**. № 4. P. 202–208.
3. Любимов Д.Ю., Дерябин И.А., Булатов Г.С., Гедговд К.Н., Термодинамическое моделирование фазового состава смешанного уранплутониевого моноснитрида с примесью кислорода при облучении до выгорания 140 ГВт сут/т и температуре 900–1400 К // *Атомная энергия*. 2015. **118**. № 1. С. 24–19.
4. Булатов Г.С., Гедговд К.Н., Любимов Д.Ю., Термодинамический анализ химического и фазового составов облученного быстрыми нейтронами уран-плутониевого нитрида в зависимости от температуры и выгорания // *Материаловедение*. 2009. **1**. С. 2–7.
5. Kleykamp H. The chemical state of the fission products in oxide fuels // *Nuclear Materials*. 1985. **131**. № 2–3. P. 221–246.
6. Middlemas S.C., Craig M.M., Adkins C.A., Lemma F.D., Tolman K.R., Benson M.T., Hin C.J. Effects of intermetallic compounds on the thermophysical properties of uranium–palladium alloys // *Alloys and Compounds*. 2021.
7. Prasad R., Dash S., Parida S.C., Singh Z., Venugopal V.J. Gibbs energy of formation of $\text{UPd}_3(\text{s})$ // *Nuclear Materials*. 2000. **277**. № 1. P. 45–48.
8. Kleykamp H. Highlights of experimental thermodynamics in the field of nuclear fuel development // *Nuclear Materials*. 2005. **344**. № 1–3. P. 1–7.
9. Cordfunke E.H.P., Muis R.P., Wijbenga G., Burriel R., Zainel H., To M., Westrum. E.F.Jr., Thermodynamics of uranium intermetallic compounds. I. Heat capacity of UPd_3 from 5 to 850 K // *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 1988. **20**. P. 815–823.
10. Кесикопулос В.А., Потапов А.М., Дедюхин А.Е., Зайков Ю.П. Изготовление интерметаллида UPd_3 и исследование его термодинамических характеристик // Сборник трудов семинара “Электрохимия в распределенной и атомной энергетике”. Нальчик. Ажур. 2022. С. 224–226.
11. Strepetov K.E., Osipenko A.A., Volkovich V.A. Electrochemical behavior of uranium–palladium alloys in molten eutectic mixture of lithium, potassium and cesium chlorides // *AIP Conference Proceedings* 2022. **2466**. № 1. P. 050033.
12. Okamoto H. Pd–U (Palladium–Uranium) // *Journal of Phase Equilibria*. 1992. **13**. № 2. P. 222–223.
13. Parnell D.G., Brett N.H., Haines H.R., Potter P.E. Phase relationships in the ternary system U–Nd–Pd // *J. Less Common Metals*. 1986. **118**. № 1. P. 141–152.
14. Zolotarev D.A., Nikitin D.I., Polovov I.B. Electrode processes in $3\text{LiCl}-2\text{KCl}-\text{UCl}_3$ melts: Investigation of temperature and uranium concentration influence // *AIP Conference Proceedings* 2019. **2174**. P. 020276.
15. Никитин Д.И., Половов И.Б., Щетинский А.В., Дедюхин А.С., Волкович В.А., Ребрин О.И. Процессы анодного растворения сплавов U–Pd в расплавах $3\text{LiCl}-2\text{KCl}-\text{UCl}_3$ // Сборник трудов семинара “Электрохимия в распределенной и атомной энергетике”. Нальчик. Ажур. 2022. С. 294–297.
16. Hames A.L., Paulenova A., Willit J.L., Williamson M.A. Phase Equilibria Studies of the $\text{LiCl}-\text{KCl}-\text{UCl}_3$ System // *Journal Nuclear Technology*. 2018. **203**. № 3. P. 272–281.

ANODIC PROCESSES OF URANIUM ALLOYS CONTAINING PALLADIUM AND NEODYMIUM IN $3\text{LiCl}-2\text{KCl}-\text{UCl}_3$ MELTS

D. I. Nikitin¹, I. B. Polovov¹, O. I. Rebrin¹, A. V. Shchetinsky¹, A. S. Dedyukhin¹

¹*Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia*

At the reprocessing module of the pilot demonstration power complex site of the Siberian Chemical Combine, a combined technological scheme for the reprocessing of mixed nitride uranium-plutonium spent fuel consisting of pyrochemical operations, hydrometallurgical refining of uranium, plutonium and neptunium is implemented step by step. According to this scheme, the target pyrochemical reprocessing products, purified from the main mass of

fission products with actinoid content not less than 99.9%, are sent for hydrometallurgical reprocessing. For pyrochemical reprocessing it is necessary to develop a technology of electrorefining of metallised spent nuclear fuel. To carry out electrolytic refining it is necessary to define processes and regimes of anodic dissolution of alloys simulating product of this head operation "metallization". In the present work the results of investigations of processes of anodic dissolution of U–Pd and U–Pd–Nd model alloys with different concentrations of palladium and neodymium in melts based on 3LiCl–2KCl–UCl₃ (10.1 wt % UCl₃) at 550°C using different methods are presented. Uranium alloys containing palladium and neodymium were prepared by direct alloying of uranium metal and palladium metal powders of PdAP-1 grade, and neodymium metal (99.99%) in high-purity argon medium (99.998%). Electrochemical measurements were performed using an Autolab 302N potentiostat/halvanostat equipped with a Booster 20A high-current module. The anodic polarization curves consist of only one oxidation wave which was attributed to the dissolution of uranium metal. Increasing the palladium content in the alloy from 1.5 to 10.0 wt %, does not affect the shape of the polarisation curves. The increase of neodymium content in the alloy from 1.0 to 10.0 wt % also does not affect the shape of polarization curves. Electrorefining parameters of uranium alloys containing palladium and neodymium were determined. The limiting current density of uranium evolution from uranium alloys containing palladium and neodymium in the electrolyte 3LiCl–2KCl–UCl₃ (10.1 wt % UCl₃) at 550°C was 0.4 A/cm². It was shown that palladium does not diffuse into the melt as a result of anodic dissolution and neodymium accumulates in the electrolyte only when the alloy is refined with 10.0 wt % neodymium, which is much higher than the future real concentrations of electrotreated uranium alloy components in the technological chain of spent nuclear fuel processing.

Keywords: anodic dissolution, uranium alloys, polarization, galvanostatic dissolution, spent fuel processing, electrofining

REFERENCES

1. Imoto S. Chemical state of fission products in irradiated UO₂ // *Journal Nuclear Materials*. 1986. **140**. № 1. P. 19–27.
2. Bush R.P., Recovery of platinum group metals from high level radioactive waste. Possibilities of separation and use re-evaluated // *Platinum Metals Reviews*. 1991. **35**. № 4. P. 202–208.
3. Lyubimov D.Yu., Deryabin I.A., Bulatov G.S., Gedgovd K.N., Termodinamicheskoe modelirovanie fazovogo sostava smeshannogo uranplutoniyevo mononitrida s primes'yu kisloroda pri obluchenii do vygoraniya 140 GVt · sut/t i temperature 900–1400 K [Thermodynamic modeling of the phase composition of mixed uranium-plutonium mononitride with an admixture of oxygen under irradiation to a burnup of 140 GW · day/t and a temperature of 900–1400 K] // *Atomnaya energiya*. 2015. **118**. № 1. P. 24–19. [In Russian].
4. Bulatov G.S., Gedgovd K.N., Lyubimov D.YU., Termodinamicheskij analiz himicheskogo i fazovogo sostavov obluchennogo bystryimi nejtronami uran-plutoniyevo nitrida v zavisimosti ot temperatury i vygoraniya [Thermodynamic analysis of the chemical and phase compositions of uranium-plutonium nitride irradiated with fast neutrons depending on temperature and burnup] // *Materialovedenie*. 2009. **1**. P. 2–7. [In Russian].
5. Kleykamp H., The chemical state of the fission products in oxide fuels // *Journal Nuclear Materials*. 1985. **131**. № 2–3. P. 221–246.
6. Middlemas S.C., Craig M.M., Adkins C.A., Lemma F.D., Tolman K.R., Benson M.T., Hin C.J. Effects of intermetallic compounds on the thermophysical properties of uranium–palladium alloys // *Alloys and Compounds*. 2021.
7. Prasad R., Dash S., Parida S.C., Singh Z., Venugopal V.J., Gibbs energy of formation of UPd₃(s) // *Journal Nuclear Materials*. 2000. **277**. № 1. P. 45–48.
8. Kleykamp H., Highlights of experimental thermodynamics in the field of nuclear fuel development // *Journal Nuclear Materials*. 2005. **344**. № 1–3. P. 1–7.
9. Cordfunke E.H.P., Muis R.P., Wijbenga G., Burriel R., Zainel H., To M., Westrum. E.F. Jr. Thermodynamics of uranium intermetallic compounds. I. Heat capacity of UPd₃ from 5 to 850 K // *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 1988. **20**. P. 815–823.

10. Kesikopoulos V.A., Potapov A.M., Dedyuhin A.E., Zajkov Y.P. Izgotovlenie intermetallida UPd_3 i issledovanie ego termodinamicheskikh harakteristik [Production of UPd_3 intermetallic compound and study of its thermodynamic characteristics] // Sbornik trudov seminarov "Elektrokhimiya v raspredelennoj i atomnoj energetike". Nalchik. Azhur. 2022. P. 224–226. [In Russian].
11. Strepetov K.E., Osipenko A.A., Volkovich V.A., Electrochemical behavior of uranium–palladium alloys in molten eutectic mixture of lithium, potassium and cesium chlorides // AIP Conference Proceedings 2022. **2466**. № 1. P. 050033.
12. Okamoto H., Pd–U (Palladium–Uranium) // Journal of Phase Equilibria. 1992. **13**. № 2. P. 222–223.
13. Parnell D.G., Brett N.H., Haines H.R., Potter P.E. Phase relationships in the ternary system U–Nd–Pd // Journal of the Less Common Metals. 1986. **118**. № 1. P. 141–152.
14. Zolotarev D.A., Nikitin D.I., Polovov I.B., Electrode processes in $3LiCl-2KCl-UCl_3$ melts: Investigation of temperature and uranium concentration influence // AIP Conference Proceedings 2019. **2174**. № 1. P. 020276.
15. D.I. Nikitin, I.B. Polovov, A.V. Shchetinskij, A.S. Dedyuhin, V.A. Volkovich, Rebrin O.I. Processy anodnogo rastvoreniya splavov U–Pd v rasplavah $3LiCl-2KCl-UCl_3$ [Processes of anodic dissolution of U–Pd alloys in $3LiCl-2KCl-UCl_3$ melts] // Sbornik trudov seminarov "Elektrokhimiya v raspredelennoj i atomnoj energetike". Nalchik. Azhur. 2022. P. 294–297. [In Russian].
16. Hames A.L., Paulenova A., Willit J.L., Williamson M.A. Phase Equilibria Studies of the $LiCl-KCl-UCl_3$ System // Journal Nuclear Technology. 2018. **203**. № 3. P. 272–281.