

УДК 546.795+542.78

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.10

СВЕРХКРИТИЧЕСКАЯ ФЛЮИДНАЯ CO₂ ЭКСТРАКЦИЯ ТОРИЯ ИЗ "ЧЕРНЫХ" ПЕСКОВ АЗОВСКОГО МОРЯ

В. И. ТКАЧЕНКО^{1,2}, С. Ф. СКОРОМНАЯ¹, Ю. Г. КАЗАРИНОВ^{1,3*}

¹ НПК «ВИЭРТ», ННЦ «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины, Харьков, УКРАИНА

² ФЭФ, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков, УКРАИНА

³ ФТФ, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков, УКРАИНА

*email: yu.kazarinov@karazin.ua

АННОТАЦИЯ Представлены результаты исследования непосредственной экстракции сверхкритическим углекислым газом тория из "черных" песков Азовского моря. За один цикл экстракции при использовании в качестве комплексообразователей ацетилацетона и бензола достигнута эффективность извлечения тория на уровне 24%. Данный метод позволяет снизить радиоактивное загрязнение отдельно взятых территорий, а также получить сырьё для изготовления ториевого топлива для АЭС при минимальном количестве отходов.

Ключевые слова: торий; сверхкритическая флюидная экстракция; ТБФ; бензол; «черный» песок Азовского моря.

SUPERCRITICAL FLUID CO₂ EXTRACTION OF THORIUM FROM "BLACK" SANDS OF THE AZOV SEA

V. TKACHENKO^{1,2}, S. SKOROMNAYA¹, YU. KAZARINOV^{1,3}

¹ NSC "Kharkov Institute of Physics and Technology" NASU, Kharkiv, UKRAINE

² School of Physics and Energy, V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, UKRAINE

³ School of Physics and Technology, V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Natural emissions of black sands on the coast of the Azov Sea contain more than 0.1% of thorium. This has a negative radiation impact on humans and at the same time is a source of thorium, capable of replacing uranium as fuel for both water-water nuclear reactors and prospective types of reactors. Supercritical carbon dioxide fluid extraction of thorium from sand is a promising and not expensive method of solving the environmental problem and obtaining raw nuclear materials. Due to the simple scaling of the method of supercritical fluid extraction and reasonable efficiency even at moderate fluid parameters (20 MPa and 40°C) it is possible to use mobile units on the shore excluding the transport of sand. Extremely small quantities of reagents and process waste, carbon dioxide recovery and ecological compatibility of the technology make it possible to return the cleaned sand directly to the shore. Determination of thorium in sand before and after extraction was performed by spectrophotometric method using arsenazo-3 dye. To calibrate the measurement, a thorium solution with a reextraction to tributyl phosphate from nitric acid was prepared. This made it possible to separate thorium from other elements that give a color reaction with arsenazo-3. The optimum total amount of reagents during extraction was 350 µl per 1 gram of sand. The maximum extraction efficiency of thorium in 24% or 300 µg was achieved by using benzene as an additional reagent.

Keywords: Thorium; Supercritical fluid extraction; TBP; benzen; Azov sea black sands.

Введение

Атомные станции обеспечивают около 11% мирового потребления электроэнергии, реакторами с общей электрической мощностью более 390 ГВт [1]. В Украине атомная энергетика является основой энергосистемы, обеспечивая более половины потребностей в электричестве [2]. И в ближайшие 10-15 лет не планируется заменять 13.8 ГВт электрических мощностей АЭС на другие источники. При этом все действующие энергетические реакторы в Украине являются реакторами, работающими на уране с обогащением изотопом ²³⁵ порядка 4%. Разведанные запасы урана в Украине со стоимостью добычи 80 \$/кг в 42000

тонн, при текущем потреблении урана на 15 действующих реакторах в 2480 тонн в год, исчерпаются через 15-16 лет. Можно рассчитывать на дополнительные 26000 тонн урана идентифицированных запасов, а также запасы со стоимостью добычи 130 и более \$/кг. Кроме того, изготовление уранового топлива для АЭС в Украине до сих не реализовано, а собственная добыча составляет около 1000 тонн урана в год, что не покрывает и половины текущих потребностей [3].

Альтернативой урану в качестве реакторного топлива является торий. Исследования ториевого топливного цикла продолжаются уже более 60 лет, и его использование дает перечисленные ниже преимущества [4]:

1) в процессе деления тория образуется изотоп U-233 с ядерными характеристиками сходными с U-235 и Pu-239. То есть U-233 возможно использовать как топливо в практически любом действующем типе энергетических реакторов. Возможно использование тория как топлива в реакторах типа ВВЭР [5], и Канадских реакторах CANDU [6]. Кроме того, ториевое топливо позволяет повысить уровень его выгорания до 30% тяжёлых атомов, по сравнению с 4.2% для уранового [7];

2) в ториевом топливном цикле образуется меньшее количество долгоживущих актинидов, по сравнению с топливными циклами на основе урана и плутония;

3) благодаря низкому уровню наработки Pu-239, ториевые реакторы практически соответствуют режиму нераспространения ядерного оружия и существенно снижают риск ядерного терроризма.

4) меньшая на 20-30% стоимость топлива, особенно из-за отсутствия процедуры изотопического обогащения для тория.

5) реакторы на тории можно использовать для «полезной утилизации» оружейного урана и плутония.

Содержание тория в Земной коре в 3-5 раз превышает содержание урана. Разведанные мировые запасы тория составляют $6.3 \cdot 10^6$ тонн, что более чем в 3 раза меньше, чем запасы урана. Однако из общего количества разведанного урана только для $3.5 \cdot 10^6$ тонн стоимость добычи составит менее 80 \$/кг [3].

Большая часть тория ископаемого тория представляет собой россыпи монацитовых песков, содержащих в среднем до 2.5% тория, хотя встречаются пески с концентрацией в 20%. Монациты растворяют в гидроксиде натрия или серной кислоте и из раствора органическими экстрагентами извлекают необходимые элементы [8].

Кроме жидкостных методов экстракции для разделения и извлечения РЗЭ и актиноидов применяется метод Сверхкритической Флюидной Экстракции (СФЭ) углекислым газом [9,10]. Однако извлечение тория методом СФЭ пока проводится на уровне лабораторных проб из растворов, нанесённых на фильтровальную бумагу [11,12] либо экстракцией следовых количеств его оксидов [13].

В данной работе представлены результаты экстракции методом СФЭ тория из "черного" песка Азовского моря, содержащего торий без предварительной обработки кислотами или щелочами, для минимизации количества жидких отходов.

Эксперимент

2.1. Материалы и химикаты

Образец содержащего торий песка («черный» песок) был отобран на побережье Азовского моря вблизи Бердянска. В Таблице 1 приведены

литературные данные по эффективной активности и концентрации естественных радионуклидов в образце «черного» песка из «пятен» [14].

Для дальнейших исследований песок была измельчён на вибрационной мельнице до размеров частиц не более 50 мкм.

Для приготовления калибровочных и рабочих растворов использовался 5.48 н раствор HCl и HNO₃ с концентрацией 70%. Трибутилфосфат (ТБФ) производства Fluka, чистотой >97% применялся для получения калибровочных растворов тория. Все использованные реагенты имели чистоту не ниже ХЧ. В качестве добавок при СКЭ применялись ацетилацетон (АА), гексан и бензол.

Таблица 1 – Эффективная активность и концентрации естественных радионуклидов «черного» песка [14]

| Изотоп | ²²⁶ Ra | ²³² Th |
|---------------------|-------------------|-------------------|
| Активность, Бк/кг | 136 ± 20 | 1333 ± 130 |
| Концентрация, мкг/г | 47±7% | 1400±136 |

Определение концентрации тория выполнялось на спектрофотометре СФ-2000 с использованием органического красителя арсеназо-III, формирующего специфическую полосу оптического поглощения при наличии тория. Арсеназо-III не является специфическим реагентом для тория и применяется для определения более 25 элементов [15]. Комплекс арсеназо- III с торием имеет спектр поглощения отличающийся от спектра поглощения чистого реагента, но для эффективного определения тория, растворы арсеназо-III должны иметь значительную кислотность (1-10 н. HCl). Кроме того, при кислотности более 3 н подавляется формирование комплекса с ураном. Поэтому, для исследований был выбран раствор 10⁻⁴% арсеназо-III в 5,48 н растворе HCl.

2.2. Процедура калибровки

Для калибровки измерительного раствора арсеназо-III был приготовлен очищенный раствор тория в ТБФ. Порошок, содержащий торий, растворялся в азотной кислоте с последующим разведением дистиллированной водой до требуемой концентрации. 5 мл. водного раствора смешивались с 1 мл. 33% раствором ТБФ в керосине и периодически взбалтывался. После разделения водной и органической фаз, содержащий торий раствор ТБФ добавлялся в приготовленный раствор арсеназо-III. После расслоения растворов проводилось измерение спектров поглощения. На Рис. 1 показаны спектры поглощения 10⁻⁴% растворов арсеназо-III в 5,48 н растворе HCl при добавлении указанного количества

ТБФ с торием, измеренные относительно исходного раствора арсеназо-III.

Полученное значение молярного коэффициента поглощения в максимуме поглощения 662 нм составляет $\varepsilon=1,6 \cdot 10^7$ моль⁻¹ [15], что даёт при оптической плотности 0,1 минимально измеренную концентрацию тория в растворе порядка 1 мкг/мл с точностью 10%.

Такая процедура получения раствора тория неизбежно сопровождается потерями, однако она позволяет свести к минимуму влияние других химических элементов, которые могут присутствовать в исходном порошке и также давать цветовые реакции с арсеназо-III. Использование в растворе значительного количества соляной кислоты позволило отстроиться от урана, который в таких условиях не дает интенсивной окраски и растворять торий содержащий порошок непосредственно в растворе арсеназо.

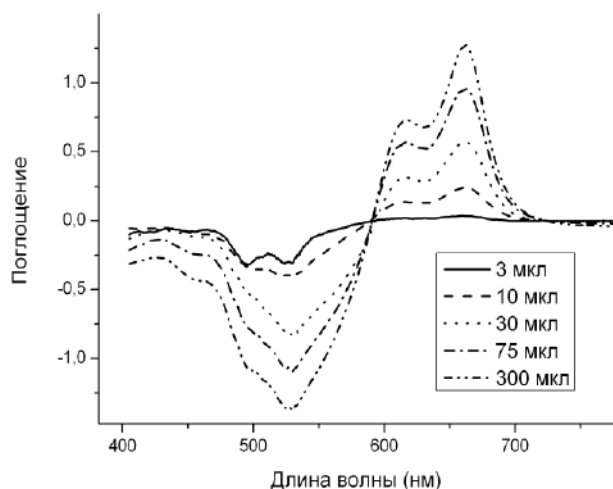


Рис. 1 – Спектры поглощения $10^{-4}\%$ растворов арсеназо-III в 5,48 н растворе HCl с экстрактом тория в ТБФ

Измерение концентраций содержащий тория в растворах и порошке после растворения в азотной кислоте позволило определить концентрацию тория в ТБФ: 400 мкг/мл. Значения коэффициента поглощения в максимуме 662 нм в зависимости от концентрации тория показаны на рис. 2.

В диапазоне от 0 до 15 мкг/мл поглощение возрастает линейно (прямая на Рис. 2) с увеличением концентрации. При больших концентрациях тория, по-видимому, отклонение от линейной зависимости вызвано поглощением красителя керосином и ТБФ, а также, исчерпание всего количества арсеназо-III для образования комплекса с торием.

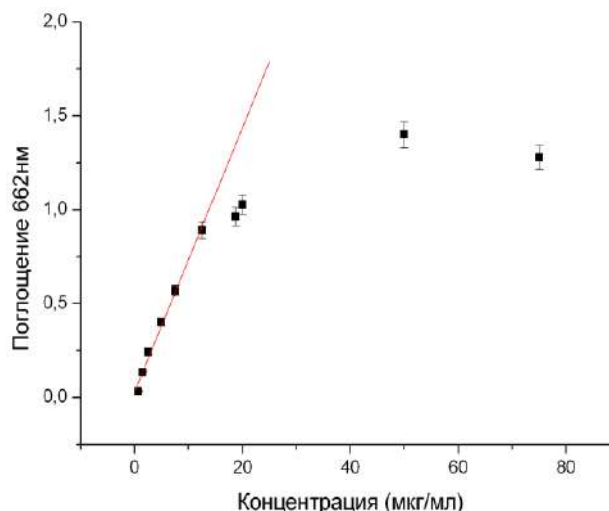


Рис. 2 – Зависимость поглощения $10^{-4}\%$ растворов арсеназо-III в 5,48 н растворе HCl на длине волны 662 нм от концентрации тория в растворе

Поскольку коэффициент поглощения в максимуме исходного раствора арсеназо-III составляет превышающую 2 величину, то предельное значение концентрации тория, определяемое в таком растворе, составляет около 20 мкг/мл, а минимальное 1 мкг/мл.

Полученные спектры поглощения и концентрационная зависимость (Рис. 1, 2) были использованы для оценки содержания тория в исходных растворах, и в растворах, которые были получены после СФЭ-СО₂.

2.3. Экстракция тория

Подробное описание установки представлено в работе [10]. Объем экстракционной камеры составляет 50 см³, максимальное давление 20 МПа при температуре до 50°C.

Для экспериментов по экстракции использовался порошок песка, содержащего торий, без предварительной химической подготовки. Навеска порошка в количестве 1 г упаковывалась в пакет из фильтровальной бумаги, и помещалась в реактор. Закрытый пакет пропитывался реагентами, состав которых перечислен в Таблице 2. Проводилась статическая экстракция при давлении 19 МПа и температуре 50°C в течение 30 минут. После выдержки проводился сброс экстракта в течение 5 минут, с постоянной подачей углекислого газа для поддержания давления на уровне 10 МПа. После сброса давления до атмосферного, из реактора изымался пакет с порошком, и проводилось измерение остаточной концентрации тория в порошке.

Для этого 40 мг порошка заливались 2 мл $10^{-3}\%$ раствора арсеназо-III в 5,48 н растворе HCl. Объем раствора и масса порошка выбирались из условия получения оптического поглощения в

максимуме 662 нм не более 1 для исходного порошка, что соответствует линейному участку калибровочной зависимости на Рис. 2. После формирования окраски, порошок отфильтровывался, и фильтрат измерялся на спектрофотометре. Совпадение положения максимума и формы спектров со спектрами, полученными при исследовании растворов ТБФ с арсеназо-III, позволяют утверждать, что данные изменения относятся именно к изменению концентрации тория. Погрешность в определении эффективности экстракции составляет около 10% от полученной величины, и определяется как двойная погрешность в определении концентрации тория в порошке.

Результаты и обсуждение

Спектры поглощения полученных растворов показаны на Рис. 3. Наряду со спектрами поглощения порошков после экстракции, на рисунке показан спектр, полученный после растворения исходного порошка, не подвергавшегося экстракции. Эффективность экстракции определялась как отношение убыли содержания тория к исходному содержанию и представлена в Таблице 2.

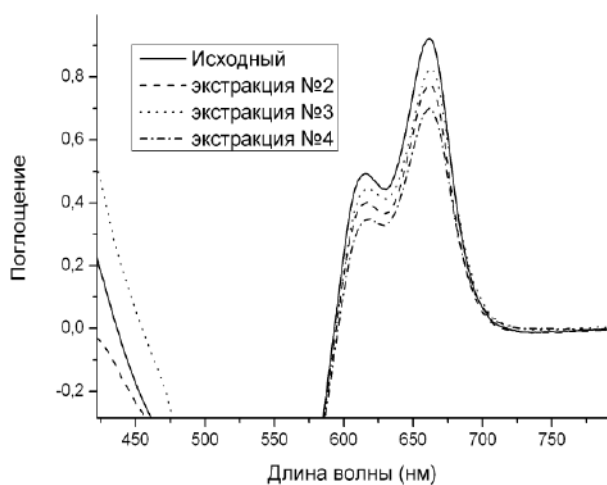


Рис. 3 – Спектры поглощения 2 мл 10⁻⁴% растворов арсеназо-III в 5,48 н растворе HCl с добавлением 40 мг содержащего торий порошка после СФЭ

Исходный набор комплексообразователей был выбран на основе работы [16], однако ГФА был заменен на АА. Как и для извлечения оксида тория, набор ТБФ+АА+вода (экстракция №1) оказался не эффективным для экстракции тория из «черного песка». Добавление 0,1 мл гексана (экстракция №2) позволило извлечь 16% тория за одну экстракцию. Увеличение количества всех реагентов вдвое (экстракция №3) снизило эффективность на 5%. Наиболее вероятной причиной такого снижения может быть превышение количества добавленной

воды над пределом растворимости воды в СК углекислом газе при давлении 19 МПа и 50°C [10]. Наибольшее значение эффективности в 24% была получена при замена гексана на бензол (экстракция №4). Это значение соответствует около 300 мкг экстрагированного тория для экстракции без применения химической обработки и использования фторсодержащих β-дикетонов.

Таблица 2 – Состав и количество комплексообразователей и добавок при экстракции тория из порошка.

| № | Количество реагентов, мкл | | | | Эффективность экстракции |
|---|---------------------------|-----|------|-------------|--------------------------|
| | ТБФ | АА | вода | добавка | |
| 1 | 100 | 100 | 53 | - | 0% |
| 2 | 100 | 100 | 53 | Гексан, 100 | 16 % |
| 3 | 200 | 200 | 100 | Гексан, 200 | 11 % |
| 4 | 100 | 100 | 53 | Бензол, 100 | 24 % |

В целом, можно надеяться, что практически полное извлечение тория может быть достигнуто при четырехкратной статической СФЭ, а также при более высоких температурах и давлениях, в сочетании с другими комплексообразователями.

Выводы

В работе показана принципиальная возможность экстракции тория из материалов без предварительной химической подготовки образцов. Использование ацетилацетона и бензола при СФЭ позволило извлечь 24% тория. Применение многократной статической экстракции, более высоких температур и давлений в сочетании с другими комплексообразователями, может повысить эффективность СФЭ до практически полного извлечения тория. Технология СФЭ тория является малоотходной и экологически чистой. Ее можно использовать для снижения радиационного загрязнения отдельно взятых территорий, а также получения сырья для изготовления альтернативного ядерного топлива для АЭС.

Список литературы

1. WEC. *World Energy Resources 2016*. – 2016. – vol. 1. URL: http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete_WER_2013_Survey.pdf.
2. **Khalatov, A. A.** Energy sector of Ukraine: modern state and nearest prospects / **A. A. Khalatov** // *Visn Nac Acad Nauk*

- Ukraini*. – 2016. – 6. – P. 53–61. – doi: 10.15407/vism2016.06.053.
3. *Uranium 2016: Resources, Production and Demand*. Vienna, Austria. – 2016. URL: <https://www.oecd-neo.org/ndd/pubs/2016/7301-uranium-2016.pdf>.
 4. **Ůnak, T.** What is the potential use of thorium in the future energy production technology? / **T. Ůnak** // *Prog Nucl Energy*. – 2000. – vol. 37, 1–4. – P. 137–44. – doi: 10.1016/S0149-1970(00)00038-X.
 5. **Galperin, A.** Thorium Fuel for Light Water Reactors — Reducing Proliferation Potential of Nuclear Power Fuel Cycle / **A. Galperin, P. Reichert, A. Radkowsky** // *Sci Glob Secur*. – 1997. – vol. 6. – P. 265–90. – doi: 10.1080/08929889708426440.
 6. **Ŗahin, S.** Investigation of CANDU reactors as a thorium burner / **S. Ŗahin, K. Yildiz, H. M. Ŗahin, A. Acir** // *Energy Convers Manag.* – 2006. – vol. 47, 13–14. – P. 1661–75. – doi: 10.1016/j.enconman.2005.10.013.
 7. **Шмелев, А. Н.** Гибридный реактор синтеза-деления с ториевым blanketом. О его потенциале в топливном цикле ядерных реакторов / **А. Н. Шмелев, Г. Г. Куликов, В. А. Курнаев, Г. Х. Салахутдинов, Е. Г. Куликов, В. А. Апсэ** // *ВАНТ. Сер.: Термоядерный синтез*. – 2014. – Том. 37, № 2. – С. 3–16.
 8. **Schaffer, M. B.** Abundant thorium as an alternative nuclear fuel Important waste disposal and weapon proliferation advantages / **M. B. Schaffer** // *Energy Policy*. – 2013. – vol. 60. – P. 4–12. – doi: 10.1016/j.enpol.2013.04.062.
 9. **Murzin, A. A.** Deactivation in Sub- and Supercritical Carbon Dioxide / **A. A. Murzin, V. A. Babain, A. Y. Shadrin, et al.** // *Radiochemistry*. – 2002. – vol. 44, no. 4. – P. 410–415. – doi: 10.1023/A:1020641431291.
 10. **Борц, Б. В.** Влияние воды на эффективность сверхкритической CO₂ экстракции урана из природных минералов / **Б. В. Борц, Ю. Г. Казаринов, С. А. Сиренко, С. Ф. Скоромная, В. И. Ткаченко** // *Вестник ХНУ им. В.Н. Каразина. Серия: Ядра, частицы, поля*. – 2012. – №1001, вып. 2(54). – С. 125 – 134.
 11. **Kumar, P.** Supercritical fluid extraction of uranium and thorium from solid matrices / **P. Kumar, A. Pal, M. K. Saxena, K. L. Ramakumar** // *Desalination*. – 2008. – vol. 232, no. 1–3. – P. 71–9. – doi: 10.1016/j.desal.2007.08.022.
 12. **Lin, Y.** Supercritical fluid extraction of thorium and uranium ions from solid and liquid materials with fluorinated β -diketones and tributyl phosphate / **Y. Lin, C. M. Wai, F. M. Jean, R. D. Brauer** // *Environ Sci Technol*. – 1994. – vol. 28, no. 6. – P. 1190–1193. – doi: 10.1021/es00055a034.
 13. **Samsonov, M. D.** Recovery of rare earth elements, uranium, and thorium from monazite concentrate by supercritical fluid extraction / **M. D. Samsonov, T. I. Trofimov, Y. M. Kulyako, et al.** // *Radiochemistry*. – 2015. – vol. 57, no. 4. – P. 343–347. – doi: 10.1134/S1066362215040025.
 14. **Zlobenko, B.** State of the art of the problems of NORM in Ukraine / **B. Zlobenko** // *Proc. fifth Int. Symp. Nat. Occur. Radioact. Mater. (NORM V)*. Seville, Spain: IAEA. – 2008. – p. 1.5.
 15. **Саввин, С. Б.** Органические реагенты группы арсеназо-III / **С. Б. Саввин**. – М.: Атомиздат, 1971. – 352 с.
 16. **Мясоедов, Б. Ф.** Сверхкритическая флюидная экстракция радионуклидов / **Б. Ф. Мясоедов, Ю. М. Куляко, А. Ю. Шадрин, М. Д. Самсонов** // *Сверхкритические флюиды: теория и практика*. – 2007. – том. 2, № 3. – С. 5–24.
- Bibliography (transliterated)**
1. WEC. *World Energy Resources 2016*, 2016, **1**. Available at: http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete_WER_2013_Survey.pdf.
 2. **Khalatov, A. A.** Energy sector of ukraine: modern state and nearest prospects. *Visn Nac Acad Nauk Ukraini*, 2016, **6**, 53–61, doi: 10.15407/vism2016.06.053.
 3. *Uranium 2016: Resources, Production and Demand*. Vienna, Austria. 2016. Available at: <https://www.oecd-neo.org/ndd/pubs/2016/7301-uranium-2016.pdf>.
 4. **Ůnak, T.** What is the potential use of thorium in the future energy production technology? *Prog Nucl Energy*, 2000, **37**, no. 1–4, 137–44, doi: 10.1016/S0149-1970(00)00038-X.
 5. **Galperin, A., Reichert, P., Radkowsky, A.** Thorium Fuel for Light Water Reactors — Reducing Proliferation Potential of Nuclear Power Fuel Cycle. *Sci Glob Secur*, 1997, **6**, 265–90, doi: 10.1080/08929889708426440.
 6. **Ŗahin, S., Yildiz, K., Ŗahin, H. M., Acir, A.** Investigation of CANDU reactors as a thorium burner. *Energy Convers Manag.*, 2006, **47**, no. 13–14, 1661–75, doi: 10.1016/j.enconman.2005.10.013.
 7. **Shmelev, A. N., Kulikov, G. G., Kurnaev, V. A., Salahutdinov, G. H., Kulikov, E. G., Apse, V. A.** Fusion hybrid with thorium blanket: on its innovative potential in fuel cycle of nuclear reactors. *Probl At Sci Technol Ser Thermonucl Fusion.*, 2014, **37**, no. 2, 3–16.
 8. **Schaffer, M. B.** Abundant thorium as an alternative nuclear fuel Important waste disposal and weapon proliferation advantages. *Energy Policy*, 2013, **60**, 4–12, doi: 10.1016/j.enpol.2013.04.062.
 9. **Murzin, A. A., Babain, V. A., Shadrin, A. Y., et al.** Deactivation in Sub- and Supercritical Carbon Dioxide. *Radiochemistry*, 2002, **44**, no. 4, 410–415, doi: 10.1023/A:1020641431291.
 10. **Borts, B. V., Kazarinov, Y. G., Sirenko, S. A., Skoromnaya, S. F., Tkachenko, V. I.** An effect of water on the uranium supercritical CO₂ extraction effectiveness from natural minerals. *J. Kharkiv Univ. Phys. Ser. Nuclei, Part, Fields*, 2012, **1001**, no. 2, 125–134.
 11. **Kumar, P., Pal, A., Saxena, M. K., Ramakumar, K. L.** Supercritical fluid extraction of uranium and thorium from solid matrices. *Desalination*, 2008, **232**, no. 1–3, 71–9, doi: 10.1016/j.desal.2007.08.022.
 12. **Lin, Y., Wai, C. M., Jean, F. M., Brauer, R. D.** Supercritical fluid extraction of thorium and uranium ions from solid and liquid materials with fluorinated β -diketones and tributyl phosphate. *Environ Sci Technol.*, 1994, **28**, no. 6, 1190–1193, doi: 10.1021/es00055a034.
 13. **Samsonov, M. D., Trofimov, T. I., Kulyako, Y. M., et al.** Recovery of rare earth elements, uranium, and thorium from monazite concentrate by supercritical fluid extraction. *Radiochemistry*, 2015, **57**, no. 4, 343–347, doi: 10.1134/S1066362215040025.
 14. **Zlobenko, B.** State of the art of the problems of NORM in Ukraine. *Proc. fifth Int. Symp. Nat. Occur. Radioact. Mater. (NORM V)*. Seville, Spain: IAEA, 2008, 1.5.
 15. **Savvin, S. B.** *Organicheskie reagenty gruppy arsenazo-III / Organic reagents of arsenazo-III group [in Russian]*. Moskow: Atomizdat, 1971, 352.
 16. **Myasoedov, B. F., Kulyako, Y. M., Shadrin, A. Y., Samsonov, M. D.** Supercritical Fluid Extraction of Radionuclides. *Supercrit Fluids Theory Pract.*, 2007, **2**, no. 3, 5–24.

Сведения об авторах (About authors)

Ткаченко Виктор Иванович – доктор физ.-мат наук, профессор, директор НПК «ВИЭРТ», ННЦ «Харьковский физико-технический институт»; Физико - энергетический факультет, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, зав. кафедрой Нетрадиционных энерготехнологий и экологии, г. Харьков, Украина; e-mail: tkachenko@kipt.kharkov.ua.

Viktor Tkachenko – Doctor of Science, Professor, Director of SPE RESST, NSC “Kharkiv Institute of Physics and Technology”; Head of the Department of Physics of Innovation Energy and Technology and Ecology, School of Physics and Energy, V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine; e-mail: tkachenko@kipt.kharkov.ua.

Скоромная Стелла Фёдоровна – кандидат тех. наук, НПК «ВИЭРТ», ННЦ «Харьковский физико-технический институт», старший научный сотрудник, г. Харьков, Украина; e-mail: scoraya09@gmail.com.

Stella Skoromnaya – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior researcher of SPE RESST, NSC “Kharkiv Institute of Physics and Technology”; Kharkiv, Ukraine; e-mail: scoraya09@gmail.com.

Казаринов Юрий Геннадиевич – кандидат физ.-мат. наук, НПК «ВИЭРТ», ННЦ «Харьковский физико-технический институт», научный сотрудник; Физико - технический факультет, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, научный сотрудник кафедры прикладной физики и физики плазмы, г. Харьков, Украина; e-mail: yu.kazarinov@karazin.ua.

Yuri Kazarinov – Candidate of Physics and Mathematics Sciences (Ph. D.), researcher of SPE RESST, NSC “Kharkiv Institute of Physics and Technology”; researcher at Department of Applied Physics and Plasma Physics, School of Physics and Technology, V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine; e-mail: e-mail: yu.kazarinov@karazin.ua.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Ткаченко, В. И. Сверхкритическая флюидная CO₂ экстракция тория из "черных" песков Азовского моря / **В. И. Ткаченко, С. Ф. Скоромная, Ю. Г. Казаринов** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 70-75. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.10.

Please cite this article as:

Tkachenko, V., Skoromnaya, S., Kazarinov, Yu. Supercritical fluid CO₂ extraction of thorium from "black" sands of the Azov sea. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 70-75, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.10.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Ткаченко, В. І. Надкритична флюїдна CO₂ екстракція торію з "чорних" пісків Азовського моря / **В. І. Ткаченко, С. Ф. Скоромна, Ю. Г. Казарінов** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018 – № 16 (1292). – С. 70-75. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.10.

АНОТАЦІЯ Представлені результати дослідження безпосередньої екстракції надкритичних вуглекислим газом торію з "чорних" пісків Азовського моря. За один цикл екстракції при використанні в якості комплексоутворювачів суміші води, ацетилацетону і бензолу досягнута ефективність вилучення торію на рівні 24%. Даний метод дозволяє зменшити радіоактивне забруднення окремо взятих територій, а також отримати сировину для виготовлення торієвого палива для АЕС при мінімальній кількості радіоактивних відходів.

Ключові слова: торій; надкритична флюїдна екстракція; ТБФ; бензол; «чорний» пісок Азовського моря

Поступила (received) 27.04.2018