

Б. В. Борц¹, И. Л. Колябина², Г. В. Лисиченко²,
С. Ф. Скоромная¹, В. И. Ткаченко^{1,3}

¹Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», г. Харьков, Украина

²Государственное учреждение «Институт геохимии окружающей среды Национальной академии наук Украины», г. Киев, Украина

³Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, г. Харьков, Украина

Расчет себестоимости получения комплексов урана сверхкритической экстракцией диоксидом углерода

Представлен обзор содержания урана в рудах различных месторождений мира и указана ориентировочная себестоимость его производства в Украине. Обсуждены количественные характеристики содержания урана в материалах хвостохранилищ бывшего предприятия по переработке урана — ПО «Приднепровский химический завод» г. Днепродзержинск (с 2016 г. — г. Каменское). Предложено использование метода сверхкритической флюидной экстракции диоксидом углерода (СФЭ-СО₂) комплексов урансодержащих соединений для извлечения урана из хвостов. Даны перечень материалов и реактивов для СФЭ-СО₂ из комплексов урансодержащих соединений, описание процедур и их последовательность для подготовки проб, расчет себестоимости извлечения урана методом СФЭ-СО₂ из хвостохранилищ ПХЗ. Установлено, что себестоимость производства комплексов урана может составлять от 13,77 USD/кг до 18,28 USD/кг (при курсе НБУ 25,0054 грн/USD на 28.01.2016).

Ключевые слова: ресурсы урана, урансодержащие соединения, извлечение урана, себестоимость производства, метод сверхкритической флюидной экстракции.

Б. В. Борц, И. Л. Колябина, Г. В. Лисиченко, С. Ф. Скоромная, В. И. Ткаченко

Розрахунок собівартості отримання комплексів урану надкритичною екстракцією діоксидом вуглецю

Надано огляд вмісту урану в рудах різних родовищ світу і орієнтовну собівартість його виробництва в Україні. Обговорено кількісні характеристики вмісту урану в матеріалах хвостосховищ колишнього підприємства з переробки урану — ВО «Придніпровський хімічний завод» м. Дніпродзержинськ (з 2016 р. — м. Кам'янське). Запропоновано використання методу надкритичної флюїдної екстракції діоксидом вуглецю (НФЕ-СО₂) комплексів урановмісних сполук для вилучення урану з хвостів. Наведено перелік матеріалів і реактивів для НФЕ-СО₂ з комплексів урановмісних сполук, опис процедур та їх послідовність для підготовки проб, розрахунок собівартості вилучення урану методом НФЕ-СО₂ з хвостосховищ ВО «ПХЗ». Встановлено, що собівартість виробництва комплексів урану може складати від 13,77 USD/кг до 18,28 USD/кг (за курсом НБУ 25,0054 грн/USD на 28.01.2016).

Ключові слова: ресурси урану, урановмісні сполуки, вилучення урану, собівартість виробництва, метод надкритичної флюїдної екстракції.

© Б. В. Борц, И. Л. Колябина, Г. В. Лисиченко, С. Ф. Скоромная, В. И. Ткаченко, 2017

Согласно данным информационной системы энергетических реакторов (PRIS), разработанной и поддерживаемой МАГАТЭ, в настоящее время 31 страна мира получает энергию со 192 атомных электростанций. На этих АЭС по состоянию на 2016 год эксплуатируется 447 атомных энергоблоков с установленной мощностью 389051 МВт [1]. Два реактора находятся в режиме длительного отключения. Список атомных энергетических лидеров возглавляют США, последующие места занимают Франция и Япония. По количеству вырабатываемой электроэнергии на АЭС Россия занимает 8-е место, а Украина — 10-е.

В ряде стран ведется интенсивное сооружение новых энергоблоков АЭС (62). Лидеры строительства: Китай — 28, Россия — 10, Индия — 6, США — 5, Южная Корея — 5, остальные страны — по одному-два блока.

По данным Всемирной ядерной ассоциации (WNA), к настоящему времени суммарные запасы отработанного ядерного топлива (ОЯТ), накопленные в мире, превышают 240 тыс. т [2]. За 45 лет существования радиохимического завода по переработке ОЯТ только в одном Хенфорде (США) накоплено 1,6·10⁹ м³ жидких и 1,4·10⁴ м³ твердых радиоактивных отходов [3]. В мире на цели обращения с ОЯТ резервируются большие суммы. Так, в американском фонде ядерных отходов (Nuclear Waste Fund) по состоянию на 30.09.2014 было аккумулировано 39,8 млрд долл. В Европе на эти же цели собран 51 млрд долл. При этом в среднем за год в мире перерабатывается порядка 10 тыс. т ОЯТ.

Таким образом, переработка ОЯТ является актуальной и дорогостоящей задачей настоящего и ближайшего будущего. Наряду с этим в мире существует не менее важная и актуальная задача — переработка отходов предприятий по производству урана гидрометаллургическим методом. В Украине отходы таких производств накоплены и продолжают накапливаться в хвостохранилищах, которые образуют техногенные месторождения с большим содержанием радиоактивных и химически опасных веществ — урана и продуктов его распада. Аналогичная ситуация наблюдается и в уранодобывающих странах, использующих гидрометаллургический метод получения урана из урановых руд [4].

Отходы от переработки урановой руды гидрометаллургическим методом оказывают вредное воздействие на человека и окружающую среду [5]. При обычной концентрации урана 0,2 % для получения 2 т урана необходимо переработать 1000 т урановой руды. В отходы направляются 998 т породы, содержащей около 85 % радиоактивности первоначальной руды, а также химически токсичные вещества и тяжелые металлы, образующиеся в результате воздействия использованных во время переработки реагентов, таких как серная кислота и хлорид аммония.

Поскольку традиционные гидрометаллургические методы извлечения урана из урановых руд не обеспечивают его полного изъятия, поиск новых малоотходных методов извлечения урана из урановых руд или отходов хвостохранилищ уранодобывающих предприятий является актуальной задачей атомной промышленности Украины и других государств, использующих атомную энергетику.

Ресурсы урана в Украине, особенности их извлечения. Поиск месторождений урана в Украине начался в 1944 году. Уже в 1945-м было обнаружено Первомайское, а в 1946-м — Желтореченское месторождения урановых руд. Тогда ставились преимущественно военные цели, и эти работы осуществлялись в условиях секретности без соблюдения требований экологической безопасности. С годами уран стал необходимым сырьем для эффективной работы АЭС.

За прошедший период разведан целый ряд крупных месторождений, обнаружено несколько сотен рудопроявлений урана. По данным МАГАТЭ [6], предварительно оцененные и разведанные запасы урановой руды в Украине составляют около 350 тыс. т.

Прогнозные ресурсы урана в Украине в значительных объемах сосредоточены в эндогенных урановых месторождениях традиционного метасоматитового типа — урановых рудах в альбитах Украинского щита [8]. Основные запасы (76—80 %) сосредоточены в Кировоградском рудном районе и связаны с докембрийскими структурами Украинского кристаллического щита. Они могут обеспечить потребности действующих АЭС государства почти на 100 лет [7].

По данным Минэнергоугля Украины, для освоения эндогенных месторождений намечено 35 перспективных участков в пределах двух рудных узлов — Кировоградского и Новокозантиновского.

Кировоградский рудный узел охватывает площадь около 30 км² вдоль восточной окраины Кировограда (с 2016 года — г. Кропивницкий), на которой размещены Мичуринское, Центральное (восточная и западная зоны), Северинское, Щорсовское и Подгайцевское месторождения. Суммарные запасы урановой руды этих месторождений в пересчете на эквивалент произведенного топлива могут обеспечить существующую потребность в природном уране украинских АЭС в течение 45 лет.

На территории Новокозантиновского рудного узла на площади 35 км² размещены Новокозантиновское, Докучаевское, Лесное и Апрельское месторождения урана. Суммарные запасы урановой руды этих месторождений в пересчете на эквивалент произведенного топлива могут покрыть существующую потребность в природном уране украинских АЭС в течение 55 лет. Новокозантиновское месторождение по разведанным запасам уранового сырья является крупнейшим в Европе. Его добываемые запасы оцениваются в 100—150 тыс. т урана в расчете на обогащенное сырье.

В Побужском районе, недалеко от г. Первомайска (Николаевская обл.), известны Южное, Лозоватское и Калиновское месторождения. Все они локализованы в докембрийских гнейсах и мигматитах, прорванных гранитоидными интрузиями.

Извлечение урановых руд из указанных разведанных месторождений планируется осуществлять подземным (шахтным) способом, в том числе с использованием новых технологических решений (кучное выщелачивание, блочное выщелачивание и др.).

При оценке рентабельности эндогенных урановых месторождений Украины необходимо учитывать их геологическую специфику — это крупные месторождения относительно бедных урановых руд. Содержание урана в рудах существенно ниже, чем в месторождениях стран — основных производителей урана, а это существенно сказывается на себестоимости получения извлекаемого сырья. Вместе с тем, ряд позитивных свойств украинских месторождений обеспечивает конкурентную способность производимого уранового концентрата, а именно:

крупные размеры урановых залежей позволяют внедрять высокопроизводительные системы их разработки;

высокие прочностные свойства руд и вмещающих пород обеспечивают прохождение горных выработок без крепления, а также способствуют созданию очистных блоков больших размеров;

низкие водопритоки в горные выработки дают возможность минимизировать затраты на их осушение и водоотлив;

низкое содержание урана в рудах минимизирует затраты на поддержание нормальной радиационной обстановки на рабочих местах для персонала шахт без применения специальных методов защиты;

монометальный характер руд позволяет использовать достаточно простые технологические схемы для переработки руды и получения высококачественного уранового концентрата.

Важными факторами повышения рентабельности украинских месторождений также являются расположенность месторождений на хорошо освоенной территории, с развитой сетью транспортных магистралей, налаженными системами энергоснабжения, благоприятным климатом и высокой обеспеченностью рабочей силой.

Экзогенные инфильтрационные (гидрогенные) месторождения неоген-четвертичной эпохи уранового рудобразования в осадочном чехле на территории Украинского щита составляют основной промышленный тип месторождений урана, которые могут разрабатываться методом подземного скважинного выщелачивания. Их часто называют месторождениями урана песчаникового типа. Они относительно небольшие по запасам содержания урана (1—3 тыс. т), но весьма рентабельны для добычи благодаря горно-технологическим особенностям, а также комплексности вмещающих руд. Спутниками урана в этих рудах являются стратегически важные редкие элементы молибден (Mo), скандий (Sc), рений (Re), редкоземельные элементы (РЗЭ), добыча которых может осуществляться одновременно с добычей урана тем же методом подземного скважинного выщелачивания. Установлено, что технология извлечения ²³⁸U из вмещающих руд идентична для Sc и РЗЭ, при этом извлекается 72—74 % урана и 12—14 % Sc и РЗЭ.

Указанный тип месторождений характерен в основном для песчано-углистых отложений палеогенового возраста (бучакский ярус). Месторождения этого типа, как правило, формируются в палеодолинах на поверхности кристаллического фундамента. Глубина вреза палеодолин, содержащих урановые оруденения, в фундамент и кору выветривания — до 70...90 м, протяженность — 30...100 км. Мощность морских перекрывающих отложений (эоцена и олигоцена) или прибрежно-морских (миоцена) — 30...60 м, максимум — 100 м. Палеодолины образованы реками, которые стекали с Украинского щита на север (в морской бассейн Днепровско-Донецкой впадины) или на юг (в морской бассейн Тетиса). Месторождения приурочены преимущественно к речным отложениям, которые или полностью заполняют палеодолины, или залегают в основании осадочного чехла под лагунно-лиманными либо озерно-болотными отложениями. Известны также случаи, когда значительная часть оруденений (90 % общего объема ураноносных пород) содержится в коре выветривания во вторичных каолинах.

Сейчас в Украине разведано 13 перспективных месторождений такого типа (Сафоновское, Садовое, Новогурьевское, Сурское и др.), расположенных преимущественно в Днепро-Бугской металлогенической зоне. Разведанные запасы урана для месторождений этого типа оцениваются на уровне 70 тыс. т. — около 7 % общих разведанных запасов урана в Украине. Для данного типа месторождений добывать уран целесообразно

высокоэффективным методом скважинного подземного выщелачивания. При этом себестоимость извлекаемого сырья значительно ниже, чем для эндогенных месторождений альбититового типа. Однако для промышленного освоения необходимо детальное геолого-экономическое изучение с составлением ТЭО постоянных кондиций и защитой запасов в Государственной комиссии Украины по запасам полезных ископаемых.

В последние годы в результате анализа и переоценки накопленной геолого-геофизической информации определены довольно высокие перспективы выявления новых типов месторождений, богатых урановыми рудами, на территории Украины [8]. Среди месторождений урана других типов можно выделить месторождения в пегматитах (около 11 % разведанных запасов), а также месторождения других типов — несогласий, конгломератов, битуминозных и пр. Их промышленное освоение пока не предусматривается Минэнергоугля Украины.

Таким образом, в Украине главные запасы для экономически выгодной добычи природного урана сосредоточены преимущественно в двух типах месторождений:

метасоматическом типе монометаллических руд, пригодном для подземной добычи с содержанием урана в руде около 0,1—0,2 %;

песчаниковом типе с содержанием урана 0,02—0,06 %, где в дополнение к урану встречаются Sc, Mo, Re, РЗЭ группы лантаноидов.

Наличие в Украине значительных запасов урановых руд и конъюнктура мирового рынка урана обуславливают необходимость развития отечественного уранового производства. Приведем краткую характеристику основных уранодобывающих и ураноперерабатывающих мощностей Украины.

Одним из первых в СССР предприятий по переработке уранового сырья, введенным в эксплуатацию в 1947 году, было Производственное объединение «Приднепровский химический завод» (ПО «ПХЗ») в г. Днепропетровской обл. В 1991 году, с развалом СССР, ПО «ПХЗ» прекратило основную деятельность по производству урана, после чего остался ряд хвостохранилищ отходов уранового производства: на территории завода — «Западное», «Центральный Яр» и «Юго-Восточное»; за пределами территории — «Днепровское», «Сухачевское» с секциями 1 и 2, а также хранилище «База С». При ликвидации завода ряд опасных сооружений, загрязненных радиацией, разрушен, разграблен и частично демонтирован, а все хвостохранилища не были приведены в экологически безопасное состояние в соответствии с действующими нормативно-законодательными требованиями по репрофилированию бывших урановых производств.

Согласно предварительной оценке [7], в указанных хвостохранилищах накоплено до 42 млн т отходов переработки урановых руд общей активностью $3,2 \cdot 10^{15}$ Бк (средняя удельная активность — 76 кБк/кг). В хранилищах отходов уранового производства «ДП-6» и «База С» накоплено до 0,2 млн т отходов уранового производства общей активностью $4,4 \cdot 10^{14}$ Бк (средняя удельная активность — 2,3 МБк/кг). Общая площадь хвостохранилищ — 2,77 млн м². Мощность экспозиционной дозы варьирует в пределах от 10 до 35000 мкР/ч [7].

В 2009—2015 годах Государственным учреждением «Институт геохимии окружающей среды» (ИГОС) проведено определение содержания микроэлементов в минеральной части отходов хвостохранилищ ПО «ПХЗ».

Для анализа были отобраны образцы керна с разных глубин скважин, расположенных в различных частях хвостохранилищ «Днепровское», «Западное», «Центральный Яр» и «Сухачевское» (секции 1 и 2).

Превышение содержания отдельных ценных микроэлементов по сравнению с их кларковыми числами в земной коре (по Тейлору [10]) обнаружено:

в отходах хвостохранилища «Западное»: ванадия — в 2...7 раз (в среднем 4,26); циркония — в 2...28 раз (в среднем 12,5); гафния — в 33 раза; церия — в 6...8 раз (в среднем 7,5); лантана — в 6...12 раз (в среднем 9,2); иттербия — в 3...17 раз (в среднем 12,5);

в отходах хвостохранилища «Сухачевское» (секция 1): церия — в 2...10 раз (в среднем 6); лантана — в 2...17 раз (в среднем 9); иттрия — в 2...9 раз (в среднем 6); иттербия — в 2...10 раз (в среднем 6);

в образцах, отобранных на песчаном пляже хвостохранилища «Сухачевское» (секция 2): церия — в 17 раз; лантана — в 33 раза; иттрия — в 33 раза; иттербия — в 3 раза.

В образцах отходов других хвостохранилищ содержание микроэлементов находится в пределах кларковых чисел.

Полученные результаты позволяют предположить возможность значительных концентраций определенных элементов, в том числе РЗЭ, в отходах хвостохранилищ «Сухачевское» и «Западное». Для более корректных и обоснованных выводов нужны более систематические и масштабные исследования.

Основная добыча урановой руды с украинских месторождений и производство из нее оксидного концентрата осуществляются с 1951 года Государственным предприятием «Восточный горно-обогатительный комбинат» (ГП «ВостГОК»), размещенным в г. Желтые Воды. Первую руду шахта «Новая» комбината выдала в 1956 году, первый килограмм концентрата урана получили в 1959-м. Сейчас ГП «ВостГОК» — единственное в Украине предприятие, осуществляющее полный цикл работ по добыче и переработке урановых руд. Оно входит в первую десятку уранодобывающих центров мира, а также является крупнейшим в Европе. За годы работы ВостГОКом полностью отработано четыре месторождения: Первомайское (1945—1957) и Желтореченское (1946—1965) — извлечение урановой руды подземным способом; Девладовское (1955—1965) и Братское (1962—1970) — извлечение способом скважинного подземного выщелачивания.

В настоящее время работа ВостГОКа обеспечивается урановой рудой, извлекаемой из шахты Ингульской (с двумя площадками — Мичуринской и Центральной) Мичуринского месторождения и шахты Смолинская Ватутинского месторождения, расположенных в Кировоградской обл. С 2011 года ВостГОК начал шахтную добычу руд на крупнейшем в Европе Новокопачевском месторождении. В планах комбината — начать с 2020 года освоение Сафоново-Степановского месторождения способом скважинного подземного выщелачивания.

Переработка урановых руд и получение уранового концентрата (U_3O_8) осуществляются на гидрометаллургическом заводе (ГЗМ), входящем в структуру ВостГОКа, в г. Желтые Воды. В процессе переработки урановых руд на ГЗМ образуются отходы (хвосты) с повышенным содержанием радионуклидов природного происхождения. Отходы уранового производства с помощью пульпопровода подаются в специально оборудованное хвостохранилище «Балка Щербаковская» в пяти километрах от г. Желтые Воды, в котором по состоянию на конец 2015 года накоплено

более 40 млн т отходов уранового производства. Это хвостохранилище представляет значительную экологическую опасность для населения города, являясь очагом загрязнения водоносных горизонтов, используемых для водоснабжения. Однако данные о специальных исследованиях по геохимии отходов этого хвостохранилища отсутствуют.

Ориентировочная себестоимость концентрата урана на мировом рынке. Стоимость 1 кг обогащенной закиси-оксида урана U_3O_8 возросла от 22 USD/кг в 2003 году до пиковых 220 USD/кг в середине 2007 года [9]. В дальнейшем стоимость снизилась и в настоящее время колеблется между 90 USD/кг и 130 USD/кг с тенденцией к росту (рис. 1). Отметим, что на рис. 1 указаны условные цены из-за отсутствия открытого мирового рынка урана в отличие, например, от рынка золота.

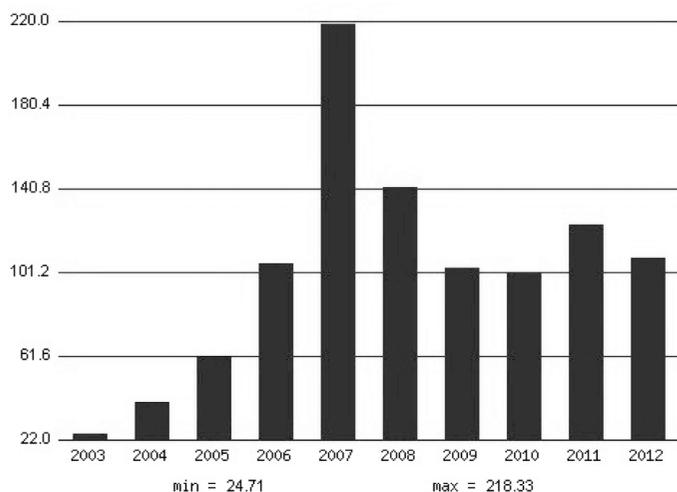


Рис. 1. Диаграмма динамики цен на уран, USD/кг

Разработка урановых руд рентабельна при цене на уран в районе 80 USD/кг. По состоянию на июнь 2016 года спотовые цены на концентрат урана варьировали в пределах 58,8–62 USD/кг [11], однако существующие прогнозы свидетельствуют об их росте. Это объясняется тем, что к 2030 году будут полностью отработаны крупные и доступные месторождения с себестоимостью производства до 80 USD/кг и в освоение начнут вовлекаться труднодоступные месторождения с себестоимостью 130 USD/кг и более.

Перечень стран с наибольшей добычей урана, а также показатели по добыче и себестоимости урана приведены на рис. 2. Заметим, что некоторые страны сознательно не сообщают оценку стоимости и величину ресурсной базы из соображений коммерческой тайны.

Согласно данным, приведенным на рис. 2, Украина входит в список 14 стран с крупнейшими достоверно разведанными ресурсами урана.

Запасы урана себестоимостью меньше 80 USD/кг во всем мире быстро сокращаются, и в перспективе

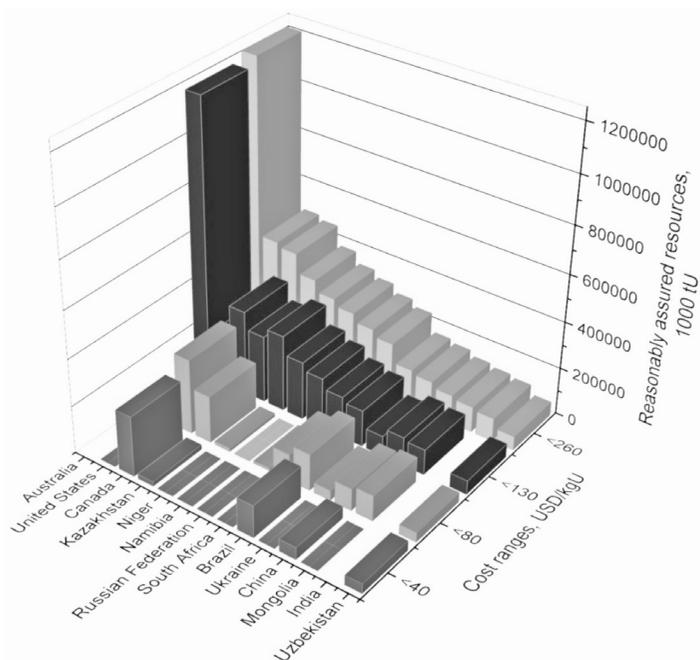


Рис. 2. Перечень стран с крупнейшими достоверно разведанными ресурсами и указанием ориентировочной себестоимости урана

в Украине также ожидается повышение себестоимости получения уранового концентрата за счет усложнения условий добычи и переработки исходного рудного сырья.

По данным МАГАТЭ [6], Украина занимает 11-е место в мире по разведанным запасам урана (117 700 т) в ценовой категории менее 130 USD/кг. Выявленная ресурсная база урана, которая может быть получена по цене менее 260 USD/кг, составляет 222 700 т, а стоимостью до 80 USD/кг — 59 642 т. Стоимость добычи и переработки входят в эти цифры.

Содержание урана в отходах хвостохранилищ ПО «ПХЗ». Степень извлечения урана из руды, как правило, велика: 95–98 % в РФ, 93–94 % в Украине, 72–88 % в Австралии. Это означает, что в отходы урановых производств направляется большое количество урана, себестоимость добычи которого гидрометаллургическим методом достаточно высокая, иногда она превышает 260 USD/кг U. При этом в Украине среднее содержание урана в отходах хвостохранилищ может достигать 0,007–0,014 % [6].

В лаборатории Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины (ННЦ ХФТИ) исследованы образцы материала хвостохранилищ ПО «ПХЗ» из г. Днепропетровска для оценки остаточного количества содержания урана в отходах. На примере этих образцов далее будет описана методика извлечения урана из отходов хвостохранилищ и рассчитана себестоимость применения предлагаемой технологии.

Из данных ННЦ ХФТИ, приведенных в табл. 1, следует, что в исходных образцах № 1 и № 2 содержание

Таблица 1. Параметры образцов из отходов хвостохранилища ПО «ПХЗ»

| № образца | Название образца | Активность ^{235}U , Бк/кг | Содержание урана, %, по данным ННЦ ХФТИ | Масса, г | Фазовое состояние |
|-----------|------------------|------------------------------|---|----------|-------------------|
| 1 | 09-2Ц 9–9,5 м | <230 | 0,07 | 64 | Порошок |
| 2 | 09-2Ц 16–16,5 м | 220 | 0,06...0,07 | 63 | Порошок |

урана почти равное — 0,06...0,07 % — и соответствует содержанию урана в песчаниках, расположенных в Днепро-Бугской металлогенической зоне с содержанием урана в руде от 0,02 % до 0,06 % по металлическому урану.

Поэтому для привлечения урановых отходов хвостохранилищ в урановый баланс Украины необходимо найти методы его экономически выгодного извлечения. Для решения этой задачи, на наш взгляд, целесообразно использовать хорошо зарекомендовавший себя метод экстракции комплексов урана из материалов хвостохранилищ сверхкритическим диоксидом углерода [12].

Расчет себестоимости СФЭ-СО₂ комплексов урана из отходов хвостохранилищ ПО «ПХЗ». Себестоимость СФЭ-СО₂ комплексов урана из отходов хвостохранилища ПО «ПХЗ» рассчитывалась на основании опубликованных в [12, 13] сведений об используемых материалах и реактивах, а также процедурах пробоподготовки и проведения СФЭ-СО₂. Согласно полученным в указанных работах данным, эффективность извлечения комплексов урана из ураносодержащих образцов составляет порядка 95 %, что соответствует эффективности извлечения гидрометаллургическими технологиями.

Для расчета себестоимости СФЭ-СО₂ извлечения комплексов урана из отходов хвостохранилищ ПО «ПХЗ» необходимо определить оптимальные объемы материалов и реактивов, а также соответствующую им электрическую мощность устройств установки СФЭ-У.

В процессах СФЭ-СО₂ задействованы электрические устройства (электрическая мощность компрессора установки — 570 Вт, электрическая мощность нагревателя установки — 150 Вт, стоимость электроэнергии для предприятия на 01.01.2016 за 1 кВт·ч — 1,81 грн), а также материалы и реагенты:

| Материалы и реагенты | Стоимость |
|---|--------------------------|
| Кислота азотная, г. Днепродзержинск, 98,6 % (ГОСТ 701—89) | 1,27 грн/л |
| Вода дистиллированная | 4,0 грн/л |
| Вода водопроводная | 8,892 грн/м ³ |
| ТБФ Волжский (производство РФ) | 41,22 грн/л |
| Уайт-спирит | 14,80 грн/л |
| Бумага фильтровальная | 57,5 грн/кг |
| СО ₂ при давлении 50 атм | 60 грн/10 л |

Наряду с указанными составляющими, необходимыми для определения себестоимости СФЭ-СО₂ извлечения комплексов урана, нужно добавить расходы на оплату труда персонала. Для обслуживания установки производительностью 10,0 кг комплекса U/мес (2,6 кг U/мес) нужно использовать труд двух операторов в три смены, т. е. привлечь к работе шесть человек со средней зарплатой 1500 грн, что составляет 9000 грн в месяц.

Приведем пример оценки себестоимости получения комплексов урана (табл. 2). Для оценки себестоимости СФЭ-СО₂ извлечения комплексов урана из отходов хвостохранилищ предложен перечень процедур, который апробирован экспериментально [12].

Указанная стоимость расходного материала и операционные затраты дают оценку показателя эффективности СФЭ-СО₂ экстракции:

себестоимость 1 мг комплекса U (данные строки 10 табл. 2 разделить на данные строки 9) — 0,00036707571 грн;

себестоимость 1 кг комплекса U — 367,08 грн (14,68 USD);

Таблица 2. Расходы на извлечение комплекса урана при его содержании в порошке 0,7 мг U/г

| № п/п | Статья расходов | Расход материала | Стоимость, грн |
|-------|---|-----------------------------|--------------------------|
| 1 | Порошок ураносодержащий* | 10 г | 0 |
| 2 | Кислота азотная, 3,0 моль/л | 5 мл | 0,79375·10 ⁻³ |
| 3 | Вода водопроводная** | 5 мл | 4,446·10 ⁻⁵ |
| 4 | ТБФ*** | 9,0 мл | 0,00074196 |
| 5 | Уайт-спирит*** | 1,0 мл | 2,96·10 ⁻⁵ |
| 6 | Бумага фильтровальная (сброс экстракта в емкость с уайт-спиритом) | Не используется | — |
| 7 | Газообразный СО ₂ | Рекуперация СО ₂ | — |
| 8 | Электроэнергия (компрессор + нагреватель установки)**** | (0,43+0,225) = 0,655 кВт·ч | 0,00023711 |
| 9 | Всего изъято комплекса урана | | 7 мг |
| 10 | Эффективность извлечения | Около 100 % | Сумма: 0,00256953 |

*10 г исходного порошка с насыпной плотностью 3,3 г/см³ и содержанием урана 0,7 мгU/г растворяется в 5 мл 3,0 моль/л азотной кислоты. Полученный раствор уранилнитрата отделяется от осадка. Полученный осадок промывается 5 мл водопроводной воды или 5 мл 3,0 моль/л азотной кислоты.

**Для промывания осадка используется кислота, приведенная в п. 2, или водопроводная вода, приведенная в п. 3.

***Использована 500-кратная экстракция в 10 мл раствор ТБФ. При этом накопленная концентрация комплекса урана в растворе ТБФ будет составлять около 70 мг/мл, что не превышает его предельно допустимую концентрацию 400 мг/мл [13, 14].

****Для проведения СФЭ-СО₂ экстракции используется объем раствора, который состоит из 10 порций раствора ТБФ по 10 мл каждая.

себестоимость 1 кг комплекса U с учетом заработной платы персонала (при условии 10 %-й занятости в обеспечении работы установки) — 457,08 грн (18,28 USD).

При составлении табл. 2 параметры, указанные в пп. 2, 4, 5, выбирались таким образом, чтобы коэффициент распределения урана в органической фазе двухфазной системы (раствор уранилнитрата + 90 % раствор ТБФ в уайт-спирите) был достаточно большим [13]. Согласно данным, приведенным на рис. 3, его значение находится на уровне 100, что означает практически полное извлечение урана из 3 M раствора азотной кислоты.

Если себестоимость производства 1 кг комплекса урана из материала отходов хвостохранилища ПО «ПХЗ» составляет 457,08 грн (18,28 USD), то себестоимость производства 1 кг чистого урана будет больше — 1758 грн (70,32 USD).

Если для промывания осадка использовать водопроводную воду, себестоимость производства 1 кг комплекса урана уменьшится до 344,32 грн (13,77 USD), а в пересчете на чистый металл — 1324,31 грн (59,97 USD).

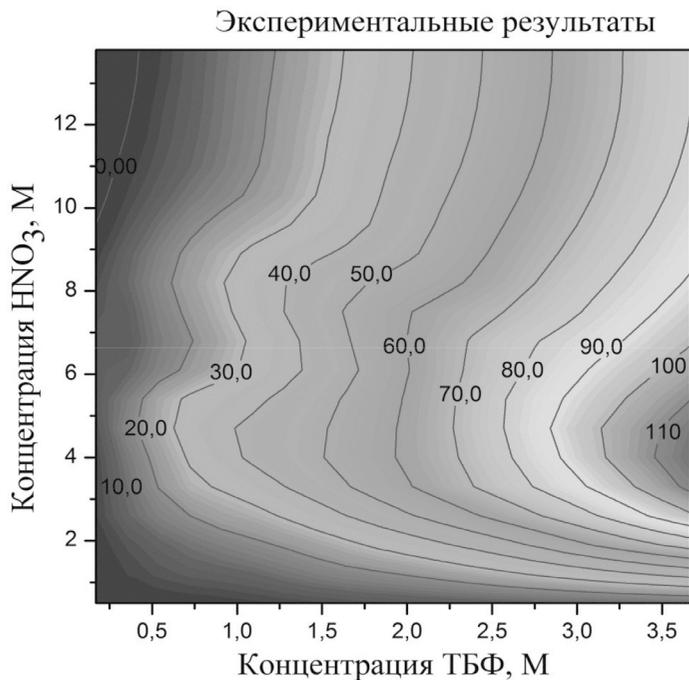


Рис. 3. Коэффициент распределения урана в органической фазе в зависимости от концентрации азотной кислоты и концентрации ТБФ в керосине [14]

Таким образом, на основании экспериментальных данных определены материалы и реактивы, их количество, а также последовательность этапов проведения процесса СФЭ-СО₂ комплексов урана из материала отходов хвостохранилища ПО «ПХЗ».

Дополнительными преимуществами извлечения комплексов урана из материала хвостохранилищ с применением указанной технологии являются отсутствие этапов работ на извлечение сырья из недр; сопутствующее извлечение ценных микроэлементов; экологический эффект для населения г. Днепропетровска.

Выводы

В Украине главные запасы экономически выгодно извлечения урана сосредоточены преимущественно в двух типах месторождений: метасоматитового монометаллического и песчаникового с содержанием урана в руде около 0,1–0,2 % и 0,02–0,06 % соответственно.

Украина входит в перечень 14 стран мира с крупнейшими достоверно разведанными ресурсами урана. Она занимает 11-е место в мире по разведанным запасам урана в ценовой категории до 130 USD/кг, что составляет 117700 т. Выявленная ресурсная база урана, которая может быть получена по цене менее 260 USD/кг, составляет 222700 т, а стоимостью менее 80 USD/кг — 59642 т урана. Однако запасы с наименьшей себестоимостью получения уранового концентрата постоянно сокращаются.

В образцах отвалов хвостохранилищ ПО «ПХЗ» содержание урана составляет 0,06–0,07 %, что эквивалентно содержанию урана в песчаниках Днепро-Бугской металлогенической зоны.

На основе экспериментальных исследований предложено использование методики СФЭ-СО₂ извлечения

комплексов урана из материалов хвостохранилищ, эффективность которой (95 %) соответствует показателям гидрометаллургических технологий развитых стран.

Определены материалы и реактивы, последовательность этапов проведения процесса СФЭ-СО₂ комплексов урана из материалов хвостохранилищ ПХЗ г. Днепропетровска, себестоимость производства 1 кг которых равна 344,32 грн (13,77 USD) при промывании осадка водой и 457,08 грн (18,28 USD) при промывании разбавленной азотной кислотой.

На основании изложенного целесообразно провести радиогеохимическое обследование отходов всех хвостохранилищ урановой промышленности Украины с целью определения перспективных участков для извлечения урана и сопутствующих ценных микроэлементов, а также дать обоснование наиболее выгодных способов их реабилитации для улучшения экологической обстановки в зонах их воздействия.

Опытный образец установки сверхкритической экстракции комплексов урана внедрен в ИГОС.

Список использованной литературы

- Бойцов А. В. Устойчивое развитие мировой урановой промышленности: вызов времени. *Международный форум АТОМЭКСПО*. 2010. 16 с.
- Запасы ОЯТ в мире превышают 240 тысяч тонн. URL: <http://www.atomic-energy.ru/news/2015/09/28/60054> (дата обращения 05.08.2016).
- Steele K. D. Hanford: American's nuclear graveyard. *The Bulletin of atomic scientists*. 1989. Pp. 15–23.
- Лисиченко Г. В., Ковач В. Е. Мировой опыт реабилитации бывших урановых производств. *Зб. наук. праць «Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист»*. 2013. № 6. С. 4–12.
- Брукс Р., Сет А. Урановое бремя. *Энергетика и безопасность*. № 4. 1997. С. 3.
- Uranium 2014: Resources, Production and Demand. OECD 2014, NEA No. 7209, Nuclear Energy Agency Organization for Economic Cooperation and Development, 2014. 506 p.
- Лисиченко Г. В., Мельник Ю. П., Лисенко О. Ю., Дудар Т. В., Никитина Н. В. Урановые руды Украины / Под ред. Г. В. Лисиченко. К. : Наук. думка, 2010. 214 с.
- Верховцев В. Г., Лисиченко Г. В., Забулонов Ю. Л., Возняк Д. К., Діденко П. І. Перспективи розвитку уранової сировинної бази ядерної енергетики України. / Под ред. Г. В. Лисиченко, В. Г. Верховцева. К. : Наук. думка, 2014. 356 с.
- Мировой рынок урана. URL: <http://www.cmmarket.ru/markets/unworld.htm/> (дата обращения 05.08.2016)
- Taylor, S. R. Abundance of chemical elements in the continental crust; a new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 28(8), 1964: 1,273–1,285. doi: 10.1016/0016-7037(64)90129–2.
- Спотовые цены на уран за неделю снизились на 6,6 %. URL: <http://www.atomic-energy.ru/news/2016/06/23/66968> (дата обращения 05.08.2016)
- Борц Б. В., Іванова С. Ф., Колябіна И. Л., Лисиченко Г. В., Ткаченко В. І. Надкритична екстракція діоксидом карбону урану з рудних концентратів та низькозбагачених руд хвостосховищ. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2016. № 2(70). С. 56–60.
- Борц Б. В., Гончаров И. Г., Мазилев А. В., Скоромная С. Ф., Ткаченко В. И. Материалы и пробоподготовка для моделирования сверхкритической флюидной экстракции урана в среде диоксида углерода. *Вестник ХНУ*. 2012. № 1025. Серия: физическая «Ядра, частицы, поля». Вып. 4/56. С. 69–76.
- Экстракция. Теория, применение, аппаратура (Сборник статей). Вып. II / Под ред. А. П. Зефирова и М. М. Сенявина. М. : Гос. изд-во лит-ры в области атомной науки и техники, 1962. 380 с.

References

1. *Boistsov, A. V.* (2010), "Sustainable Development of the World Uranium Industry: Challenge of the Time" [Ustoichivoie razvitiie mirovoi uranovoi promyshlennosti: vyzov vremeni], *International Forum Atomekspo*, 16 p. (Rus)
2. SFP Reserves in the World Exceed 240 Thousand Tons [Zapasy OYaT v mire prevyshaiut 240 tysiach tonn], available at: <http://www.atomic-energy.ru/news/2015/09/28/60054> (application date 05 August 2016). (Rus)
3. *Steele, K. D.* "Hanford American's Nuclear Graveyard", *Bulletin of Atomic Scientists*, 1989, pp. 15–23.
4. *Lysychenko, G. V., Kovach, V. E.* (2013), "World Experience in Remediation of Uranium Facilities" [Mirovoi opyt reabilitatsii byvshykh uranovykh proizvodstv], *Technogenic and Environmental Safety and Civil Protection*, No. 6, pp. 4–12. (Rus)
5. *Bruks, R., Set, A.* (1997), "Uranium Burden" [Uranovoie bremia], *Energy and Safety*, No. 4, p. 3. (Rus)
6. *Uranium 2014: Resources, Production and Demand*, OECD 2014, NEA No. 7209, Nuclear Energy Agency Organization for Economic Cooperation and Development, 2014, 506 p.
7. *Lysychenko, G. V., Melnik, Yu. P., Lysenko, O. Yu., Dudar, T. V., Nikitina, N. V.* (2010), "Uranium Ores in Ukraine" [Uranovyie rudy Ukrainy], Kyiv, Naukova Dumka, 214 p. (Rus)
8. *Verkhovtsev, V. G., Lysychenko, G. V., Zabulonov, Yu. L., Vozniak, D. K., Didenko, P. I.* (2014), "Prospects for the Development of Uranium Raw Material Base of Nuclear Energy in Ukraine" [Perspektyvy rozvytku uranovoi syrovynnoi bazy yadernoi enerhetyky Ukrainy], Kyiv, Naukova Dumka, 356 p. (Ukr)
9. World Uranium Market [Mirovoi rynek urana], available at: <http://www.cmmarket.ru/markets/unworld.htm/> (application date 05 August 2016) (Rus)
10. *Taylor, S. R.* (1964), "Abundance of Chemical Elements in the Continental Crust, a New Table. *Geochimica et Cosmochimica Acta*", 1, 273–1, 285, doi: 10.1016/0016-7037(64)90129-2.
11. Spot Uranium Prices for the Week Decreased by 6,6% [Spotovyye tseny na uran za nedeliu snizilis na 6.6%], available at: <http://www.atomic-energy.ru/news/2016/06/23/66968> (application date 05 August 2016) (Rus)
12. *Borts, B., Ivanova, S. F., Koliabina, I. L., Lysychenko, G. V., Tkachenko, V. I.* (2016), "Supercritical Extraction by Carbon Dioxide of Uranium from Ore Concentrates and Low-Enriched Ores of Tailing" [Nadkrytychna ekstraktsiia dioksidom karbonu uranu z rudnykh konsentrativ ta nyzkozbahachenykh rud khvostoskhovyshch], *Nuclear and Radiation Safety Journal*, No. 2 (70), pp. 56–60. (Ukr)
13. *Borts, B. V., Honcharov, I. H., Mazilov, A. V., Skoromnaia, S. F., Tkachenko, V. I.* (2012), "Materials and Sample Preparation for Modeling of Supercritical Fluid Extraction of Uranium in Carbon Dioxide Environment" [Materialy i probopodgotovka dlia modelirovaniia sverkhkriticheskoi fluidnoi ekstraktsii uranu v srede dioksida ugleroda], *Journal of Kharkiv National University*, No. 1025, Series "Nucleus, Particles, Fields", No. 4/56, pp. 69–76. (Rus)
14. *Zefirova, A. P., Seniavina, M. M.* (1962), "Extraction. Theory, Application, Devices (Collection of Articles)" [Ekstraktsiia. Teoriia, primeniie, apparatura (Sbornik statei)], No. II, Moscow, State Publishing House for Nuclear Science and Engineering, 380 p. (Rus)

Получено 05.08.2016.