

Б. В. Борц¹, С. Ф. Іванова¹, І. Л. Колябіна²,
Г. В. Лисиченко², В. І. Ткаченко^{1, 3}

¹ ННЦ "Харківський фізико-технічний інститут",
м. Харків, Україна

² Державна установа «Інститут геохімії навколишнього
середовища Національної академії наук України»,
м. Київ, Україна

³ Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
м. Харків, Україна

Надкритична екстракція діоксидом карбону урану з рудних концентратів та низькозбагачених руд хвостосховищ

Видобуток і переробка уранових руд в Україні призвели до накопичення великих об'ємів відходів. Старі технології непридатні для вилучення урану з таких відходів, тому потрібен пошук нових, більш ефективних методів вилучення з відходів залишків корисних речовин і поліпшення екологічного стану забруднених територій. В якості такої методу запропоновано надкритичну флюїдну екстракцію діоксидом вуглецю (НФЕ - CO₂), яка самостійно, а також як остання ступінь прийнятого на Східному гірничо-збагачувальному комбінаті методу кислотного вилуговування, може бути використана для вилучення урану. Показано, що ефективність НФЕ-CO₂ урану може досягати 98 %.

Ключові слова: надкритична екстракція, діоксид карбону, уран, рудний концентрат, низькозбагачена руда, хвостосховище, ефективність екстракції.

**Б. В. Борц, С. Ф. Іванова, І. Л. Колябіна, Г. В. Лисиченко,
В. І. Ткаченко**

Сверхкритическая экстракция диоксидом углерода урана из рудных концентратов и низкообогатенных руд хвостохранилищ

Добыча и переработка урановых руд в Украине привела к накоплению больших объемов отходов. Старые технологии неприменимы для извлечения урана из таких отходов, поэтому необходим поиск новых, более эффективных методов извлечения из отходов остатков полезных веществ и улучшения экологического состояния загрязненных территорий. В качестве такого метода предложена сверхкритическая флюидная экстракция диоксидом углерода (СФЭ-CO₂), которая самостоятельно, а также как последняя ступень принятого на ВостокГЭК метода кислотного выщелачивания, может быть использована для извлечения урана. Показано, что эффективность СФЭ-CO₂ урана может достигать 98 %.

Ключевые слова: сверхкритическая экстракция, диоксид углерода, уран, рудный концентрат, низкообогатенная руда, хвостохранилище, эффективность экстракции.

© Б. В. Борц, С. Ф. Іванова, І. Л. Колябіна, Г. В. Лисиченко,
В. І. Ткаченко, 2016

Внаслідок розпочатого 1944 року в Україні видобутку уранової руди та виділення з неї урану накопичено величезну кількість відходів уранового виробництва з урановмісними елементами, що не виділяються традиційними технологіями й сконцентровані в техногенних родовищах у вигляді відвалів [1, 2].

На даний час в Україні видобуток уранової руди, в основному, проводиться шахтним способом на трьох виробничих майданчиках: Інгульському і Смолінському рудниках [2], а з 2011 року — і на Новокостянтинівському руднику (Кіровоградська обл.). Тут видобувають руду зі скельних порід підземним способом на глибинах від 300—500 м, де максимальна масова концентрація урану становить близько 0,1 %.

Видобуток урану створює екологічно небезпечні ризики через потрапляння до навколишнього середовища радіоізоотопів урану і торію (²³⁸U, ²³⁵U, ²³²T) у вигляді аерозолів або пилу. Радіаційна безпека таких викидів обумовлена більшою мірою ²³⁸U [2]. Радіоактивні елементи в атмосфері завдають внутрішніх або зовнішніх радіаційних пошкоджень, що створює життєві ризики для працівників рудників і населення прилеглих територій.

Крім підприємств з видобутку уранової руди на території України, в м. Жовті Води розташовано гідрометалургійний завод з переробки урану. Гідрометалургійна технологія добування урану з руд передбачає процеси, засновані на тому, що майже весь уран з руди можна перевести в рідкий розчин методом підземного вилуговування або вилуговування доставленої на поверхню уранової руди.

Під час здійснення гідрометалургійних процесів (виділення урану при луженні, сорбції або хімічному осадженні) на кінцевій стадії отримання готової продукції в навколишнє середовище виділяється радон або радіоактивні аерозолі. Однак дозові навантаження на персонал, а також радіоактивне забруднення довкілля від гідрометалургійних процесів виділення урану з руди істотно менші, ніж при його видобутку.

Зазначені ризики для життя працівників урановидобувних підприємств і населення, що проживає поблизу цих територій, утворилися внаслідок використання традиційних технологій. У процесі переробки уранових руд основна частина урану (до 90 % [2]) вилучається для подальшої переробки, а залишок накопичується у хвостосховищах, або техногенних родовищах, розташованих на територіях поблизу переробних підприємств. Разом з ураном до хвостосховищ потрапляє невелика частина інших радіоактивних елементів та супутні важкі метали, які також несуть екологічну загрозу.

В Україні існує проблема, пов'язана з накопиченням великої кількості низькозбагаченої уранової руди у хвостосховищах. Вирішити її можна тільки завдяки використанню нових, екологічно чистих, безводних або маловодних, високоефективних технологій вилучення урану з матеріалів різного походження. До таких технологій належить надкритична флюїдна екстракція актинідів діоксидом карбону (НФЕ-CO₂) — розчинення та екстракційний витяг з різних матриць актинідів діоксидом карбону при температурах і тисках, вищих за критичні. Технологія НФЕ-CO₂ характеризується високою ефективністю вилучення актинідів. Відомо, що майже стовідсоткова ефективність вилучення за технологією НФЕ-CO₂ залишків урану з модельного відпрацьованого палива була досягнута забезпеченням у камері-реакторі, де відбувається процес надкритичної екстракції, високих тисків (до 30 МПа), а також використанням коштовних реагентів і модифікаторів [3].

Виходячи з високих фізичних показників ефективності вилучення урану за цією технологією (від 96 % [4] до 100 % [3]) та з економічних міркувань перевага має бути надана процесам, що проводяться при значно нижчих тисках (до 20 МПа) і з використанням дешевих реагентів та модифікаторів.

Запропонована технологія НФЕ-СО₂ може бути використана, наприклад, на Новокостянтинівському руднику. Для цього в технологічній схемі до процесу змішування з цементом отриманих пісків та кеку необхідно провести вилучення урану методом НФЕ-СО₂.

Мета статті — дослідження ефективності екстракційного витягу урану надкритичним діоксидом карбону з уранових концентратів або з низькозбагачених руд хвостосховищ залежно від присутності супутніх важких металів.

Хімічні реагенти для пробопідготовки та аналітична апаратура. Вихідні матеріали для екстракції урану надкритичним діоксидом карбону треба перевести в такий стан, коли вони вступають у реакції з необхідними реагентами і розчиняються в надкритичному діоксиді карбону. Наведемо перелік реагентів, які використовувалися в процесах пробопідготовки.

Діоксид карбону (СО₂). Хімічна сполука, характеристики якої задовольняють вимогам ДСТУ 4817: 2007.

Азотна кислота (HNO₃). Нерозчинена (чиста) азотна кислота є безбарвною рідиною з їдким запахом, густина якої дорівнює 1,52 г/см³. Змішується з водою в будь-яких співвідношеннях. Діє майже на всі метали, перетворюючи їх на нітрати, а деякі метали — на оксиди [5].

Трибутилфосфат (ТБФ). Застосовується як екстрагент для екстракційного очищення хімічних концентратів урану [5]. Безбарвна органічна рідина, що є складним ефіром — (С₄Н₉О)₃РО. Густина близька до густини води (0,973 г/см³), в'язкість (3,3·10³ Па·с) перевищує в'язкість води (0,6560·10⁻³ Па·с при температурі 40 °С), що ускладнює розділення органічної та водної фаз. Для зниження в'язкості ТБФ розчиняють у нейтральній органічній рідині, наприклад добре очищеному гасі (синтині), уайт-спіриті. Зазвичай для екстракційних процесів застосовується 20...40 %-ний розчин ТБФ.

Уайт-спірит — бензин прямої перегонки малосіркових нафт. Основні експлуатаційні характеристики: швидко розчиняє органічні сполуки, швидко випаровується, корозійно агресивний.

Ацетілацетон (СН₃-СО-СН₂-СО-СН₃). — пахуча рідина, розчинна у воді. Є сумішшю дікетону (23,6 %) та ізомерною до нього ненасиченого кетонспирту — енолу (76,4 %). Екстракційне виділення урану можна вести молекулярними сполуками уранілнітрату UO₂(NO₃)₂ з екстрагентами (наприклад, трибутилфосфат, етілацетат), у вигляді циклічних і внутрішньокмплесних солей (екстракційне виділення із застосуванням ацетілацетону).

Таким чином, у пробопідготовці вихідних матеріалів для НФЕ-СО₂ використовуються: діоксид карбону (СО₂) як органічний розчинник, азотна кислота (HNO₃) та трибутилфосфат (ТБФ) як хімічні речовини для утворення комплексів урану; уайт-спірит, ацетілацетон та вода для модифікації властивостей розчинів комплексів урану.

Вміст урану у вихідних зразках та екстрактах визначається з використанням рентгенівського аналізатора КРАБ-ЗУМ.

Вихідні урановмісні матеріали, їх стан, активність та склад. До лабораторії РДтаОНС (лабораторія радіаційних досліджень та охорони навколишнього середовища) ННЦ ХФТІ НАН України були передані за актом передавання зразки

(табл. 1) урановмісних матеріалів, отримані від Інституту геохімії навколишнього середовища НАН України (ІГНС НАН України) для аналізу на вміст урану.

Таблиця 1. Параметри вихідних зразків урановмісних матеріалів

№ з/п	Назва зразка	Активність ²³⁵ U, Бк/кг	Вміст урану, %	Маса, г
<i>Зразки рудних концентратів</i>				
1	URV-16.12.2011	1288	0,22	489
2	URV-01.04.2012	1515	0,26	521
3	URV-25.01.2012	1239	0,21	510
4	URV-25.04.2012	1413	0,24	481
<i>Зразки матеріалів хвостосховища ПХЗ, м. Дніпродзержинськ</i>				
5	09-2Ц 9—9,5 м	<230	<0,039	64
6	09-2Ц 16—16,5 м	220	0,037	63

Для контрольного вимірювання вмісту урану у вихідних зразках в лабораторії РДтаОНС ННЦ ХФТІ НАН України використовувалося менше половини маси зразків 1—4 і повна маса зразків 5 та 6. Зменшення маси зразків 1—4 порівняно з наведеною в табл. 1 обумовлено малим об'ємом гамма-спектрометра, що заповнюється досліджуваними зразками. Фазовий стан вихідних зразків — порошок дисперсності менше ніж 50 мкм з невеликою кількістю твердої фракції лінійними розмірами від кількох міліметрів і менше.

Результати вимірів у лабораторії РДтаОНС ННЦ ХФТІ НАН України наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Результати вимірювання зразків урановмісних матеріалів в лабораторії РДтаОНС

№ з/п	Назва зразка	Маса зразка, г	Активність ²³⁸ U, Бк/кг	Вміст урану, %
<i>Зразки рудних концентратів</i>				
1	URV-16.12.2011	206	11199	9,00·10 ⁻²
2	URV-01.04.2012	200	11050	8,88·10 ⁻²
3	URV-25.01.2012	200	10966	8,82·10 ⁻²
4	URV-25.04.2012	206	11875	9,55·10 ⁻²
<i>Зразки матеріалів хвостосховища ПХЗ, м. Дніпродзержинськ</i>				
5	09-2Ц 9—9,5 м	64	—	—
6	09-2Ц 16—16,5 м	63	7485	6,02·10 ⁻²

Для визначення вмісту урану у вихідних зразках були отримані їх апаратурні гамма-спектри на гамма-спектрометрі СЕГ-50(П), зібраному на базі напівпровідникового

германій-літєвого дифузійно-дрейфового детектора ДГДК-60В, оточеного 5-сантиметровим свинцевим захистом і шаром міді 0,1 мм завтовшки для зменшення природного гамма-фону. У спектрометрі застосовані одноплатний аналізатор SBS-75 і програми набору та аналізу спектрів фірми «Грін Стар» (м. Москва). У спектрах виявлено гамма-лінії сімейств природних рядів нуклідів (ПРН): уран-радієвого (починається з ^{238}U) і уран-актинієвого (починається з ^{235}U).

Активність ^{238}U визначалася по лінії 1001 кеВ дочірнього нукліда $\text{Ra}^{234\text{m}}$, який на момент вимірювання перебуває в динамічній рівновазі з ^{238}U .

Для обчислення активності ^{235}U використовувалася лінія 163,3 кеВ з квантовим виходом 5,08 %. Використання ліній 185,7 кеВ (вихід 57,2 %) і 143,8 кеВ (вихід 10,9 %) неможливе через значно близько розташовані до них лінії 186,2 кеВ ^{226}Ra і 144,2 кеВ ^{223}Ra відповідно.

Виходячи з результатів контрольного вимірювання вмісту урану в наданих урановмісних матеріалах можна зробити такі висновки:

1. Активність вихідних зразків 1–4 за актом передавання становить від 1239 Бк/кг до 1515 Бк/кг, а вміст урану — від 0,21 % до 0,26 %.

2. Активність вихідних зразків 1–4 згідно з вимірюванням на гамма-спектрометрі СЭГ-50(П) становить від 10966 Бк/кг до 11875 Бк/кг, а вміст урану — від 0,0882 % до 0,095 %.

Отже, за даними лабораторії РДтаОНС ННЦ ХФТІ НАН України, вміст урану у вихідних зразках приблизно в два рази менший, ніж за даними ІГНС НАН України.

Утворення комплексів урану. Порошок зразка 4 урановмісного матеріалу масою 10 г заливався 20 мл 40 % азотної кислоти і витримувався певний час. Отриманий розчин очищався через фільтрувальний папір. Осадок знову промивався 20 мл дистильованої води і піддавався фільтруванню для максимального видалення уранілнітрату. В отриманий після двох фільтрувань розчин додавалося до 6 мл 30 % розчину трибутилфосфату (ТБФ) в уайт-спіриті; отримана суміш ретельно збовтувалася. Після збовтування розчин відстоювався до утворення шарів органічної фази (верхній шар) і водної фази (нижній шар). Після цього органічна фаза (верхній шар) масою 5,1 мл фільтрувалася через паперовий фільтр.

Зазначимо, що в отриманих органічних фазах уран існує в формі комплексу $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{ТБФ}$ [6–8].

Після проведених процедур можна визначити вміст урану в органічній фазі. Наприклад, для зразка 4 урановмісного матеріалу, якщо припустити 100 %-ну ефективність розчинення урану в азотній кислоті, в 1 мл органічної фази повинно міститися не більше, ніж $9,55 \text{ мг}/5,1 = 1,87 \text{ мг}$ урану.

Аналогічним процедурам утворення комплексів урану та розрахункам піддавалися зразки й інших урановмісних матеріалів.

Аналіз екстракту на вміст урану та супутніх металів. Для забезпечення достатньої точності вимірювання вмісту урану треба знати елементний склад вихідного урановмісного матеріалу, щоб виявити супутні елементи (метали), які добре взаємодіють з азотною кислотою, утворюючи нітрати металів. Мала кількість нітратів зв'язуватиме невелику кількість ТБФ, велика — призводитиме до зменшення об'єму ТБФ, необхідного для утворення цільового комплексу урану — $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{ТБФ}$.

Результати дослідження елементного складу вихідних зразків до проведення НФЕ- CO_2 на рентгенівському аналізаторі КРАБ-ЗУМ на каналах, налаштованих на визначення вмісту Mn, Cr, Cu, Fe, Nb, U, наведено в табл. 3.

Таблиця 3. Хімічний склад вихідних зразків до проведення НФЕ- CO_2

№ зразка	Хімічний елемент (кількість відліків)					
	Mn	Cr	Cu	Fe	Nb	U_{in}^*
1	33355	60	19463	3301	11226	7606
2	32370	83	21174	3197	10163	6931
3	33983	157	19120	3280	10289	7260
4	21041	102	27326	3326	9704	8607
5	23143	194	29213	3185	9967	7754
6	23576	71	31213	3246	9977	8041

* U_{in} — вміст урану у вихідних зразках до проведення НФЕ- CO_2 .

Визначення вмісту урану в екстрактах на рентгенівському аналізаторі КРАБ-ЗУМ. Вміст урану у вихідних урановмісних пробах та в екстрактах на рентгенівському аналізаторі КРАБ-ЗУМ визначався порівнянням кількості відліків на урановому каналі аналізатора до проведення надкритичної флюїдної екстракції та після неї. Разом з цим аналізувався вплив металів, присутніх у вихідних зразках (табл. 4).

Таблиця 4. Вміст урану в зразках до і після проведення НФЕ- CO_2

№ зразка	Хімічний елемент (кількість відліків)						Результат НФЕ- CO_2 екстракції U_{ext}^*	
	Mn	Cr	Cu	Fe	Nb	U_{in}	Кількість відліків	%
1	3355	60	19463	3301	11226	7606	7302	96
2	2370	83	21174	3197	10163	6931	6723	97
3	3983	157	19120	3280	10289	7260	6534	90
4	1041	102	27326	3326	9704	8607	8435	98
5	23143	194	29213	3185	9967	7754	7134	92
6	23576	71	31213	3246	9977	8041	7639	95

* U_{ext} — вміст урану в зразках після проведення НФЕ- CO_2 .

Дані, наведені в табл. 4, показують високу (більш як 90 %) ефективність надкритичної флюїдної екстракції комплексів урану. Проаналізуємо вміст кожного з супутніх елементів у зразках, щоб визначити, як саме вони впливають на цей показник.

Як бачимо з табл. 4, до складу всіх зразків входять Fe і Nb з майже незмінною концентрацією. Вихідний вміст

урану змінюється теж незначно — в межах 0,1 %. А от вміст інших металів (Mn, Cr, Cu) в зразках змінюється помітно. Графічна залежність ефективності екстракції урану (у відносних одиницях) від вмісту Mn, Cr, Cu у вихідних зразках наведена на рис. 1.

Присутні у вихідних зразках урановмісних матеріалів елементи (U, Mn, Cr, Cu, Fe, Nb), взаємодіючи з азотною кислотою, утворюють нітрати цих металів, внаслідок чого зменшується кількість азотної кислоти, потрібної для утворення уранілнітрату, який потім, під дією ТБФ, утворюватиме розчинний у надкритичному діоксиді карбону комплекс. Тому, вимірюючи на рентгенівському аналізаторі КРАБ-ЗУМ вміст комплексів урану, треба проводити аналіз наявності супутніх металів.

Експериментами визначено тиск і температуру процесу НФЕ-СО₂ урану з рудних концентратів та низькозбагачених руд хвостосховищ, які становлять 16,0 МПа та 40 °С відповідно.

З рис. 1 випливає, що збільшення вмісту Cr та Mn у вихідних зразках знижує ефективність його екстракції до 90 % та 92 % для зразків 3 та 5 відповідно. Водночас, із зменшенням кількості цих елементів (зразок 4) підвищується ефективність надкритичної флюїдної екстракції урану до 98 %.

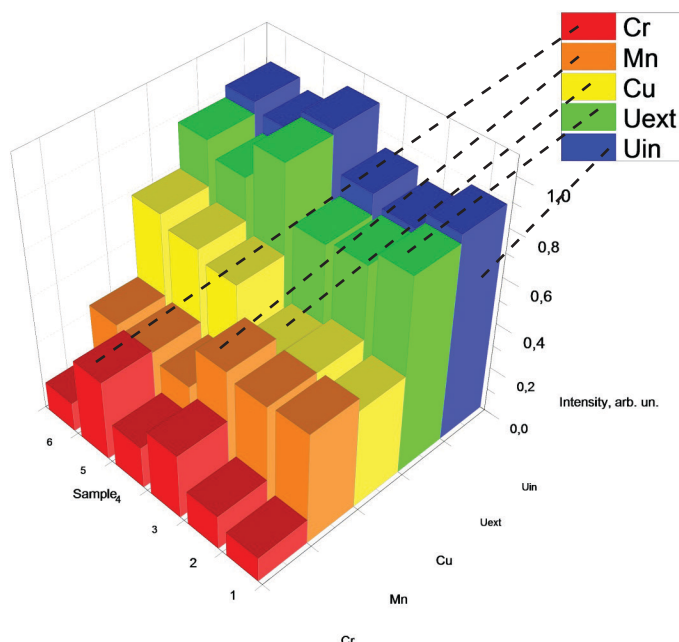


Рис. 1. Залежність ефективності екстракції урану U_{ext} (у відносних одиницях) від вмісту металів Cr, Mn, Cu у вихідних зразках

В ІГНС НАН України проведено експерименти з вилуговування урану із зразка 4. Моделювалися умови, наближені до технологічних процесів на СхідГЗК [9, 10]. Концентрація H_2SO_4 становила 60,90 г/л, HNO_3 — 30,45 г/л. Моделювалися режими з різними комбінаціями вихідних параметрів, а саме:

із змінними співвідношеннями руда / вилуговуючі розчини (1:1; 1:5; 1:10);

із змінними температурними режимами (100, 110 та 150 °С при атмосферному та підвищеному тиску).

Згідно з результатами [9], за всіх умов експерименту отримано достатньо високу ступінь вилуговування

урану — до 75 %. При зазначених умовах склад розчину після вилуговування стає принципово іншим, зокрема основною формою урану в розчині є сульфатні комплекси складу $UO_2(SO_4)^0$, $UO_2(SO_4)_2^{2-}$ та $UO_2(SO_4)_3^{4-}$, а концентрація нітратних комплексів не перевищує 1 %. За результатами аналізу на мас-спектрометрі ISP-MS залишку руди після вилуговування до розчину переходить до 96 % кальцію та магнію, до 74 % — хрому, до 69 % — міді. Крім того, до розчину в значних концентраціях входять такі елементи, як залізо (5—8 % вмісту у вихідній руді) та алюміній (3—5 % вмісту у вихідній руді). Зазначені відмінності, особливо інший тип комплексів урану, можуть суттєво вплинути на подальшу його екстракцію. Тому доцільно продовжити дослідження з більш повного вилуговування урану з урахуванням особливостей прийнятої на СхідГЗК технології.

Висновки

Результат проведених досліджень можна сформулювати так.

1. Визначено, що для пробопідготовки урановмісних матеріалів при проведенні НФЕ-СО₂ треба використовувати такі реагенти та модифікатори: діоксид карбону (СО₂) як органічний розчинник, азотну кислоту (HNO₃) та трибутилфосфат (ТБФ) як хімічні речовини для утворення комплексів урану; уайт-спірит, ацетилацетон та воду для модифікації властивостей розчинів комплексів урану.

2. Експериментально встановлено оптимальні тиск і температуру екстракції урану з урановмісних матеріалів: 16,0 МПа та 40 °С відповідно.

3. Визначено, що присутність у вихідних зразках урановмісних матеріалів таких металів, як Mn, Cr, Cu, Fe, Nb впливає на ефективність екстракції урану методом НФЕ-СО₂.

4. Показано, що збільшення у вихідних зразках вмісту Cr та Mn знижує ефективність екстракції урану методом НФЕ-СО₂ відповідно до 90 % та 92 %, а зменшення кількості цих елементів підвищує ефективність до 98 %.

5. Для підвищення ефективності вилуговування урану згідно з технологічними процесами на СхідГЗК може бути застосована технологія, де основною формою урану в розчині є сульфатні комплекси складу $UO_2(SO_4)$, $UO_2(SO_4)_2^{2-}$ та $UO_2(SO_4)_3^{4-}$, а концентрація нітратних комплексів не перевищує 1 %.

Автори висловлюють подяку Мазілову О. В. і Гончарову І. Г. за проведення вимірів та оцінку вмісту урану у вихідних зразках рудних концентратів та матеріалу хвостосховища.

Список використаної літератури

1. Uranium 2014: Resources, Production and Demand // A Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. — 2014.—506 p.
2. Уранові руди України. Геологія, використання, поводження з відходами виробництва / Лисиченко Г. В., Мельник Ю. П., Лисенко О. Ю., Дудар Т. В., Нікітіна Н. В. — К :Наук. думка, 2010. — 221 с.
3. Сверхкритическая флюидная экстракция в современной радиохимии / М. Д. Самсонов, А. Ю. Шадрин, Д. Н. Шафиков, Ю. М. Куляко, Б. Ф. Мясоедов // Радиохимия. — 2011. — Т. 53, № 2. — С. 97—106.

4. Влияние воды на эффективность сверхкритической CO₂ экстракции Урана из природных минералов // Б. В. Борц, Ю. Г. Казаринов, С. А. Сиренко, С. Ф. Скоромяная, В. И. Ткаченко // Вісник Харк. нац. ун-ту (серія: фізична «Ядра, частинки, поля»). — 2012. — Вып. 2/54/1001. — С. 125 — 134.

5. Ахметов Н. С. Общая и неорганическая химия : Учеб. для вузов. — 4-е изд., испр. — М. : Высш. шк., Изд. Центр «Академия». — 2001. — 743 с.

6. Сверхкритическая флюидная экстракция радионуклидов / Б. Ф. Мясоедов, Ю. М. Куляко, А. Ю. Шадрин, М. Д. Самсонов // Сверхкритические флюиды: Теория и практика. — 2007. — Т. 2, № 3. — С. 5–24.

7. Иванова С. Ф. Фізико-технологічні механізми підвищення ефективності екстракції урану надкритичним діоксидом вуглецю : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / С. Ф. Иванова. — Харків, 2013. — 20 с.

8. Материалы и пробоподготовка для моделирования сверхкритической флюидной экстракции урана в среде диоксида углерода / Б. В. Борц, И. Г. Гончаров, А. В. Мазилев, С. Ф. Скоромяная, В. И. Ткаченко // Вісник Харк. нац. ун-ту (серія: фізична «Ядра, частинки, поля»). — 2012. — Вып. 4/56/1025 — С. 69–76.

9. A comprehensive set of physical, elemental, isotopic, radionuclide and microscopic characteristics of input, intermediate and final products of the UOC production technology as implemented in Ukraine [Text]: Report on stage 3 STCU Project P 465 / Institute for Environmental Geochemistry NAS of Ukraine; Project manager G. Bondarenko; executors: I. Koliabina [et al.]. — K., 2014. — P. 54.

10. Тураев Н. С. Химия и технология урана / Н. С. Тураев, И. И. Жерин. — М. : ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2005. — 416 с.

References

1. Uranium 2014: Resources, Production and Demand, Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency, 2014, 506 p.

2. Lysychenko, G.V., Melnik, Yu.P., Lisenko, O.Yu., Dudar, T.V., Nikitina, N.V. (2010), Uranium Ores of Ukraine. Geology, Use, Waste Management [Uranovi rudy Ukrainy. Neolohiia, vykorystannia, povodzhennia z vidkhodamy vyrobnytstva], Naukova Dumka, Kyiv, 221 p. (Ukr)

3. Samsonov, M.D., Shadrin, A.Yu., Shaphikov, D.N., Kuliako, Yu.M., Myasoiedov, B.F. (2011), “Supercritical Fluid Extraction in Modern Radiochemistry” [Sverkhkriticheskaia fluidnaia ekstrakcia v sovremennoi radiokhimii], Vol. 53, No. 2, pp. 97–106. (Rus)

4. Borts, B.V., Kazarinov, Yu. G., Sirenko, S.A., Skoromnaya, S.F., Tkachenko, V.I. (2012), “Effect of Water on the Efficiency of Supercritical CO₂ Extraction of Uranium from Natural Minerals” [Vliianie vody na effektivnost sverkhkriticheskoi CO₂ ekstrakcii urana iz prirodnykh mineralov], Bulletin of Kharkiv National University (Series: Physical “Nucleus, Particles, Field”), Issue 2/54/1001, pp. 125–134. (Ukr)

5. Akhmetov, N.S. (2001), “General and Inorganic Chemistry”. [Obshchaia i neorganicheskaia khimiia], Moscow, Manual, Akademiia Publishing House, 743 p. (Rus)

6. Myasoiedov, B.F., Kulyako, Yu.M., Shadrin, A.Yu., Samsonov, M.D. (2007), “Supercritical Fluid Extraction of Radionuclides” [Sverkhkriticheskaia fluidnaia ekstrakcia radionuklidov], Supercritical Fluids, Theory and Practice, Vol. 2, No. 3, pp. 5–24. (Rus)

7. Ivanova, S.F. (2013), “Physical and Technological Mechanisms for Improving Uranium Extraction Efficiency by Supercritical Carbon Dioxide: Author’s Thesis [Fiziko-tekhnologicheskiie mekhanizmy povysheniia effektivnosti ekstrakcii urana sverkhkriticheskim dioksidom ugleroda: avtoref. dis. ... kand. tekhnich. nauk], Kharkiv, 20 p. (Rus)

8. Borts, B.V., Goncharov, I.G., Mazilov, A.V., Skoromnaya, S.F., Tkachenko, V.I. (2012), “Materials and Sample Preparation for Simulation of Supercritical Fluid Extraction of Uranium in the Carbon Dioxide Environment” [Materialy i probopodgotovka dlia modelirovaniia sverkhkriticheskoi fluidnoi ekstrakciei urana v srede dioksida ugleroda], Supercritical Fluids, Theory and Practice, Issue 4/56/, No. 1025, pp. 69–76. (Rus)

9. Koliabina, I., Bondarenko, G. (2014), “A Comprehensive Set of Physical, Elemental, Isotopic, Radionuclide and Microscopic Characteristics of Input, Intermediate and Final Products of the UOC Production Technology as Implemented in Ukraine [Text]”: Report on Stage 3 STCU Project P 465, Institute for Environmental Geochemistry, NAS of Ukraine, Kyiv, P. 54.

10. Turaiev, N.S., Zherin, I.I. (2005), “Uranium Chemistry and Technology” [Khimiia i tekhnologiia urana], Moscow, CNIIATOMINFORM, 416 p. (Rus)

Отримано 11.11.2015.