

2. Jia R., Enhanced thermal performance of form-stable composite phase-change materials supported by novel porous carbon spheres for thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*. (2020) 27, 101134
3. European technology platform on renewable heating and cooling. (2013). Strategic research and innovation agenda for renewable heating & cooling.
4. Crespo A. ,Latent thermal energy storage for solar process heat applications at medium-high temperatures – A review. *Solar Energy*. (2019) 192, 3-34.

## **ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ УРАНА ИЗ ТВЕРДЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ РАСТВОРАМИ СОЛЯНОЙ КИСЛОТЫ**

Наливайко К.А.<sup>1</sup>, Муравлева А.М.<sup>1</sup>, Евдокимов И.В.<sup>1</sup>, Скрипченко С.Ю.<sup>1</sup>,  
Яковлева О.В.<sup>1</sup>, Абдрахманова А.К.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>) Уральский федеральный университет имени первого Президента России  
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

E-mail: [k.a.nalivaiko@urfu.ru](mailto:k.a.nalivaiko@urfu.ru)

## **LEACHING OF URANIUM FROM SOLID RADIOACTIVE WASTE BY HYDROCHLORIC ACID SOLUTIONS**

Nalivaiko K.A.<sup>1</sup>, Muravleva A.M.<sup>1</sup>, Evdokimov I.V.<sup>1</sup>,  
Skripchenko S.Yu.<sup>1</sup>, Yakovleva O.V.<sup>1</sup>, Abdrahmanova A.K.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>) Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

The maximum degree of uranium extraction of 99% was obtained by HCl an excess concentration of more than 74 gL<sup>-1</sup>, the uranium content in the PR is 255 mgL<sup>-1</sup>. According to the results of XRD, the insoluble residue of leaching consists of CaSO<sub>4</sub>\*2H<sub>2</sub>O 62-84%, CaF<sub>2</sub> 10-31%, graphite 3-7% and SiO<sub>2</sub> 1-5%.

В процессе работы предприятий, осуществляющих переработку и аффинаж соединений урана, происходит образование и накопление твердых радиоактивных отходов, содержание урана в которых оценивается на уровне 0,1 масс.% (в пересчете на сухой продукт). Для переработки накопленных шламов наиболее приемлемым способом считается выщелачивание растворами кислот.

В данной работе представлены результаты выщелачивания урана из шлама (0,093% U) растворами соляной кислоты с концентрацией 42-160 г/дм<sup>3</sup>. Результаты предыдущих исследований показали, что шлам преимущественно состоит из CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O (45-50%), CaCO<sub>3</sub> (22-30%) и CaF<sub>2</sub> (10-15%) [1]. Процесс выщелачивания проводили при Т:Ж = 1:4, в интервале температур 20-80 °С и при постоянном перемешивании (300 об/мин).

Согласно результатам исследований, с увеличением температуры процесса и избыточной концентрации соляной кислоты в выщелачивающем растворе степень извлечения урана из шлама возрастает. Выщелачивание растворами соляной

кислоты ( $42-160 \text{ г/дм}^3$ ) при комнатной температуре обеспечивает степень извлечения урана из шлама  $65-77\%$ . Содержание урана в продуктивном растворе (ПР) составляет не более  $179 \text{ мг/дм}^3$ .

Проведение процесса выщелачивания урана из шлама при избыточном содержании  $\text{HCl}$  свыше  $74 \text{ г/дм}^3$  и температуре  $80^\circ\text{C}$  обеспечивает степень извлечения урана  $96-99\%$ . При этом его содержание в ПР составляет порядка  $255 \text{ мг/дм}^3$ , а расход соляной кислоты –  $266-362 \text{ кг/т}$  сухого осадка.

Метод выщелачивания урана из шлама с применением соляной кислоты из-за высокой химической активности реагента по отношению к основным компонентам шлама, включая гипс, характеризуется низкой селективностью. При этом содержание примесных элементов в ПР увеличивается с ростом температуры и концентрации соляной кислоты. При высокотемпературном выщелачивании крепкими растворами соляной кислоты степень извлечения  $\text{Mg}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Mn}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Ni}$  составляет  $90-98\%$ . Кроме того, в ПР переходит  $66\% \text{ Ca}$ ,  $77\% \text{ F}$  и  $60\% \text{ Si}$ , также из шлама извлекается  $80-90\% \text{ Na}$ ,  $\text{K}$  и  $\text{Zr}$ . Таким образом, в результате выщелачивания в ПР содержится  $1-2 \text{ г/дм}^3 \text{ Mg}$  и  $\text{Fe}$ , до  $5 \text{ г/дм}^3$  фтора, около  $50 \text{ г/дм}^3$  хлорида кальция.

Согласно результатам рентгенофазового анализа (РФА), нерастворимый остаток выщелачивания урана из шлама с применением соляной кислоты состоит из  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ( $62-84\%$ ),  $\text{CaF}_2$  ( $10-31\%$ ), графита  $2,5-6,5\%$ ) и  $\text{SiO}_2$  двух модификаций (суммарно  $1-5\%$ ). Результаты РФА подтвердили, что с ростом концентрации выщелачивающего агента и температуры ведения процесса увеличивается степень растворения гипса, оксида кремния и фторида кальция.

Таким образом, метод выщелачивания урана из шлама с применением соляной кислоты характеризуется высокой степенью извлечения целевого металла. Однако наблюдается низкое содержание урана в солевой части ПР. Кроме того, высокое содержание в ПР фторид- и хлорид-ионов, являющихся крайне коррозионно-активными элементами, накладывает дополнительные ограничения на конструкционные материалы, используемые для изготовления оборудования всей технологической цепочки.

1. V. N. Rychkov, K. A. Nalivayko, S. M. Titova and S. Yu. Skripchenko, AIP Conf. Proc. 2313, 050021 (2020).