

**ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ  
И ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СОРБЦИОННОЙ  
ПЕРЕРАБОТКИ УРАНОСОДЕРЖАЩИХ РАСТВОРОВ  
ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ**

**Халимов И. У.**, к.т.н., зав. каф. «Добыча и переработка руд редких и радиоактивных металлов»,

**Хамидов С. Б.**, ассистент, каф. «Добыча и переработка руд редких и радиоактивных металлов»,

**Каримов Н. М.**, ассистент, каф. «Добыча и переработка руд редких и радиоактивных металлов»

Навоийский государственный горный институт  
г. Навои, Республика Узбекистан

В урановой промышленности применение сорбционной технологии на основе ионитов обусловлено тем, что уран в растворах после выщелачивания находится в виде различных комплексных анионов уранила  $[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2]^{2-}$ ,  $[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_3]^{4-}$  (в сернокислой среде) и  $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$  (в карбонатной).

Одновременно, хотя и в меньшей степени, протекают конкурирующие процессы сорбции других присутствующих в растворе анионов  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Fe}(\text{SO}_4)^{2-}$ ,  $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3^{3-}$ , некоторые анионы форм V, P, As, Mo, а также  $\text{Cl}^-$  и  $\text{NO}_3^-$ . Катионы  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{CO}_2^+$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  и некоторые другие не сорбируются.

Емкость смол существенно зависит от присутствия некоторых солей. Депрессирующее действие некоторых солей используют на стадии снятия урана со смол (десорбции, регенерации). Десорбция является обратным процессом по отношению к сорбции. Поэтому для десорбции в урановой промышленности обычно применяют азотную, соляную, крепкую серную кислоту, хлоридные или нитритные растворы [1].

При высокой кислотности особенно проявляется конкурирующая сорбция  $\text{H}_2\text{SO}_4^-$ , заметно снижающая емкость смолы по урану. Поэтому сорбция урана интенсивнее протекает при высоких значениях pH [2].

При снижении кислотности и повышении концентрации урана в растворе емкость смолы растет, т. к. вместо четырехзарядных

анионов  $[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_4]^{4-}$  сорбируются преимущественно двухзарядные комплексы  $[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2]^{2-}$ . При дальнейшем снижении кислотности ( $\text{pH}=2,5$ ) емкость смолы увеличивается вследствие гидролитического образования комплексов урана типа:  $[\text{U}_2\text{O}_5(\text{SO}_4)_3]^{4-}$  и  $[\text{U}_2\text{O}_5(\text{SO}_4)_2]^{2-}$ .

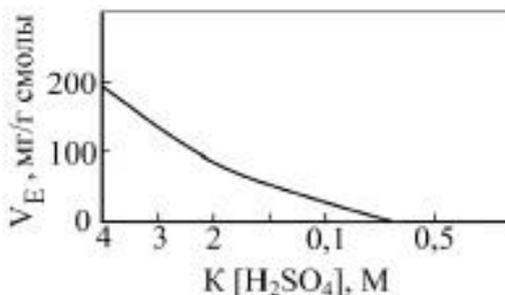


Рис. 1. – Влияние кислотности  $K$  на сорбционную емкость  $V_E$  (по урану) сильноосновных анионитов

Известно, что сорбция урана из производственных растворов в статических условиях с использованием синтетических смол обеспечивает получение насыщенных до  $0,55 \div 2,34$  % масс по урану сорбентов, если величина удельного расхода сорбента на сорбцию составляет порядка  $0,026 \div 0,125$  и менее кг на 1 г урана в ураносодержащем растворе. Определено, что сорбция урана из растворов в статических условиях обеспечивает очистку продуктивных растворов от урана до его содержания не более  $3 \text{ мг/дм}^3$ , если величина удельного расхода сорбента на сорбцию составляет порядка  $0,083 \div 0,260$  кг на 1 г урана в продуктивном растворе.

Применявшиеся в опыте сильноосновные аниониты типа АВ-17, АМП, АМ имеют большую емкость по сравнению с низко основными. Емкость сильноосновной смолы зависит от концентрации металла и серной кислоты в растворе [3].

Результаты экспериментов по сорбции урана из сернокислых растворов показали, что среди сорбентов по величине статической обменной емкости (СОЕ) по урану выделяется сорбенты марки АМП. Емкость данного сорбента, в зависимости от содержания сульфат-ионов, составляет порядка  $280\text{--}350$  мг/г, что в  $3,0\text{--}3,5$  раза выше, по сравнению с другими сорбентами [4].

В сернокислых растворах выщелачивания урана из руд присутствуют нитрат и хлорид-ионы, которые могут отрицательно повлиять на сорбцию урана. Было выявлено, что данные ионы не оказывают заметного влияния на сорбцию урана сорбентом АМП. В то же время, емкость других исследованных сорбентов в присутствии хлорид-ионов снижается до 50–100 мг/г, а в присутствии нитрат-ионов – до 40 мг/г.

Данный сорбент обладает высокой емкостью по урану и способен к работе в режиме сорбция-десорбция-регенерация. Десорбция осуществляется раствором аммиака с концентрацией 6–8 моль/дм<sup>3</sup>, а регенерация – раствором серной кислоты. Также было установлено, что при сорбции из растворов, содержащих аммиак, емкость сорбента АМП резко снижается вследствие его окисления. Для подавления окислительной способности растворов и, следовательно, повышения обменной емкости сорбента, в исходный раствор вводят азотную кислоту. Введение азотной кислоты с концентрацией 0.05 моль/дм<sup>3</sup> позволяет проводить эффективную сорбцию урана из растворов с концентрацией NH<sub>3</sub> до 4 моль/дм<sup>3</sup>.

Полученная изотерма сорбции урана из реальных ПР и модельных растворов на анионите АМП при 24 и 72-часовом контакте фаз (6–8 °С) оказались аналогичными для случая модельных растворов (рис. 2). При пониженных температурах кинетика сорбции урана на анионите осложнена, что подтверждается характером кривых, далеких от установления равновесия даже при длительности эксперимента 72 часа.

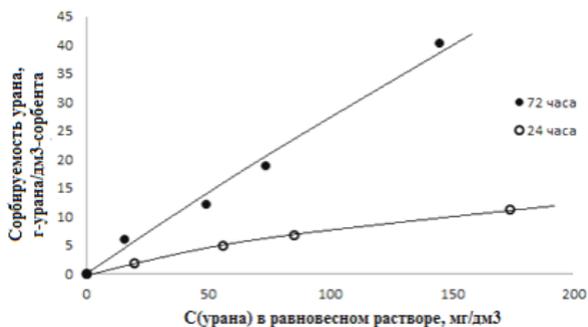


Рис. 2. – Изотермы сорбции урана из модельных растворов при T = 6–8 °С

За время проведения кинетического эксперимента – 24 часа, анионитом не достигалось состояния насыщения. Полученные кинетические зависимости сорбции урана для периода времени 95 часов и температуры 4–6 °С на модельном растворе представлены ниже. Для каждого периода времени были рассчитаны значения кинетического коэффициента, составившие от 0,11 до 0,36 для времени контакта фаз от 7 до 95 часов соответственно [5].

Динамические испытания подтвердили данные статических экспериментов (изотермы сорбции). На основании смоделированных процессов сорбции с применением различных геометрий колонн и скоростей фильтрации растворов через сорбенты определены оптимальны условия: внутренний диаметр колонки – 9 мм, высота слоя сорбента 290 мм, объем загрузки сорбента – 30 см<sup>3</sup>.

Для выявления влияния формы геометрии колонн на сорбцию получены кривые десорбции урана и конверсии анионитов в различных режимах. На стадии сорбции величина полной обменной емкости анионита по урану не достигалась, этим доказана необходимость операции донасыщения в технологическом цикле [6].

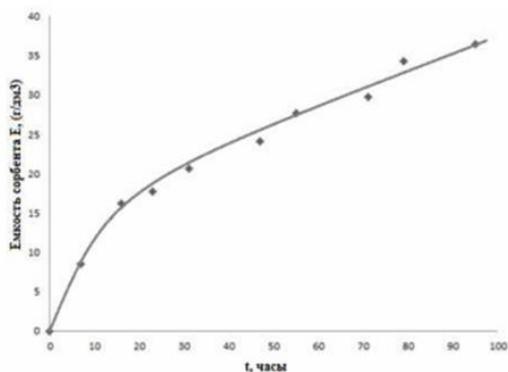


Рис. 3. – Изотермы сорбции урана из модельных растворов при  $T = 4-6\text{ }^{\circ}\text{C}$

Выявлена необходимость моделирования процессов исходя из объемных удельных соотношений продуктивного раствора и сорбента. Полученные зависимости сорбции урана от содержания серной кислоты в растворах при температуре 4–8 °С ( $C(U)_{\text{исх}} = 93\text{ мг/дм}^3$ ) и времени контакта фаз 20 часов можно применять для

оценки процесса сорбции. По выходной кривой сорбции найдена рабочая емкость анионита АМП, что согласуется с заявленными характеристиками данного сорбента.

Смола, выходящая из стадии сорбции должна соответствовать емкости по урану не менее  $28 \text{ г/дм}^3$ , учитывая высоту сорбционных колонн и слоя защитного действия сорбента, достижение установленного параметра является выполнимым при часовой нагрузке на 1 объем смолы 5 объемов технологического раствора.

#### **Список литературы**

1. Шарафутдинов, У. З., Каримов, Н. М., Аvezова, Д. А. Исследования сорбируемости ураносодержащих растворов подземного выщелачивания некоторыми сильноосновными анионитами // LXIX-ая международная конференция «Инновационные подходы в современной науке». – Москва, 2020.

2. Куранов, М. А., Шарафутдинов, У. З., Каримов, Н. М. Основные принципы исследований в области технологии извлечения рения из растворов подземного выщелачивания урана в условиях РУ-5 НГМК // Международная научно-практическая конференция «Рациональное использование минерального и техногенного сырья в условиях индустрии 4.0». – Алматы, 2019.

3. Ласкорин, Б. Н., Метальников, С. С., Смолина, Г. И. Извлечение урана из природных вод // Атомная энергия. – Москва. 1977.

4. Кокотов, Ю. А., Пасечник, В. А. Равновесие и кинетика ионного обмена // Химия. – Москва. 1979.

5. Коровин, С. С., Букин, В. И., Федоров, П. И., Резник, А. М. Редкие и рассеянные элементы: Химия и технология. // МИСИС. – Москва. 2003.

6. Петухов, О. Ф., Каримов, Н. М. Исследования технологии сорбции рения из карбонатных растворов на активированном угле // Научный журнал «Интернаука». – Москва, 2020.