

УДК 622.349.5:622.775

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ГРАНУЛЯЦИИ В ТЕХНОЛОГИИ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА ИЗ РУД\*



**М. В. ЯКОВЛЕВ,**  
главный инженер Гидрометаллургического  
завода, YakovlevMV@ppgho.ru



**В. Ю. БОЛЬШУХИН,**  
ведущий инженер-технолог ЦНИЛ

ПАО «ППГХО им. Е. П. Славского», Краснокаменск, Россия

### Введение

Обеднение добываемых урансодержащих руд и увеличение себестоимости их добычи в ПАО «ППГХО» требуют новых подходов к осуществлению процессов горно-химического производства [1]. Эти обстоятельства необходимо учитывать при переработке сырья для обеспечения безубыточности деятельности предприятия. На ближайшее десятилетие основным направлением развития производства по выпуску концентрата урана и снижения его себестоимости является увеличение доли переработки урансодержащих руд методом кучного выщелачивания, являющимся менее затратным по сравнению с пульповым процессом [2].

В настоящее время на ПАО «ППГХО» выпуск урана методом кучного выщелачивания (КВ) составляет ~10 % по отношению к выпуску металла, извлекаемому по пульповой технологии. Себестоимость переработки сырья по схеме, включающей измельчение руды, сгущение полученной суспензии, агитационное вскрытие урана в присутствии окислителя и сорбционное извлечение выщелоченного ценного компонента из пульпы, значительно выше способа с перколяционным выщелачиванием металла в штабелях [3]. В связи с этим актуальной задачей для Объединения является значительное увеличение объемов переработки руд методом КВ. Последнее предполагает решение проблем коагуляции руды и образования в штабелях водоупорных

*Рассмотрено применение методов грануляции при подготовке урановых руд к процессу перколяционного выщелачивания. Приведены результаты лабораторных и опытно-технологических работ по перколяционному выщелачиванию гранулированной урансодержащей рудной мелочи в комплексе с дробленным сырьем крупных классов. Предложена технологическая схема подготовки и укладки руды с применением методов грануляции мелких классов, позволяющая интенсифицировать процесс извлечения урана из руд, характеризующихся значительной долей рудной мелочи, образовавшейся в процессе отбойки руды на рудниках.*

**Ключевые слова:** алюмосиликатная урановая руда, коагуляция, грануляция, связующее вещество, дробление, грохочение, выщелачивание

**DOI:** 10.17580/gzh.2023.07.09

зон, обусловленных присутствием в сырье алевритов и глинистого материала [4, 5].

Одним из способов предотвращения негативных последствий ошламования сырья, направляемого на укладку в штабели, является предварительная грануляция мелких классов руды [6–9]. Сложность реализации данного процесса заключается в подборе связующего компонента для руд алюмосиликатного типа, выщелачивание которых осуществляют водными растворами серной кислоты, а также в создании гранул, устойчивых к статическим нагрузкам и воздействию кислой среды.

### Полученные результаты лабораторных и опытно-технологических работ по перколяционному выщелачиванию гранулированной урансодержащей рудной мелочи в комплексе с дробленным сырьем крупных классов

Первоначальные исследования в области грануляции урансодержащей руды мелких фракций были проведены в 2016 г. в ПАО «ППГХО» на базе ЦНИЛ [10]. В ходе работ была осуществлена грануляция беднобалансовой руды крупностью –5+0 мм с целью определения условий, необходимых для получения устойчивых к разрушению гранул при их взаимодействии с водой и растворами серной кислоты в процессе перколяционного выщелачивания урана [11]. В качестве связующих веществ были исследованы суглинок, натриевое жидкое стекло и глиноземистый цемент марки ГЦ-40 [12].

\*В работе принимал участие директор по науке ПАО «ППГХО им. Е. П. Славского», д-р техн. наук А. А. Морозов.

© Яковлев М. В., Большухин В. Ю., 2023

Лабораторные исследования по грануляции урановой руды включали следующие стадии:

- смешение рудной мелочи и связующего компонента до однородного состояния;
- загрузку полученного материала в барабан гранулятора;
- смачивание сырья растворами жидкого стекла или водой;
- образование гранул из мелких частиц с участием жидкой фазы;
- окатывание и уплотнение гранул в результате их перемещения по поверхности аппарата;
- упрочнение связей в результате перехода жидкой фазы в твердую, т. е. стабилизации структуры гранул.

В процессе грануляции происходило изменение распределения частиц по размерам, т. е. наблюдался процесс формирования окатышей, интенсивность которого зависела от технологии и свойств продукта.

На основании проведенных испытаний было установлено, что при окомковании руды крупностью  $-5+0$  мм наибольшую устойчивость к кислой агрессивной среде показал глиноземистый цемент (ГЦ) (ГОСТ 969–2019), оптимальный расход которого был определен на уровне 50 кг на 1 т руды.

Глиноземистые цементы представляют собой быстротвердеющие в воде и на воздухе высокопрочные вяжущие вещества. Сырьем для них служат бокситы и чистые известняки. Цементы ГЦ получают путем тонкого измельчения обожженной до спекания или сплавления богатой глиноземом сырьевой смеси. Клинкер глиноземистых цементов отличается повышенным содержанием глинозема (35–80 %) и сравнительно низким содержанием оксида кальция (17–32 % против 64–68 % в портландцементе).

Из специфических особенностей глиноземистых цементов можно выделить быстрый набор прочности в первые сутки после затвердевания, устойчивость к агрессивным жидкостям и газам и выделение большого количества тепла при твердении, что делает удобным их применение в условиях пониженных температур окружающей среды (до  $-10$  °С).

При выщелачивании полученного образца гранулята с исходным содержанием урана 0,06 % в течение двух месяцев были зафиксированы следующие результаты: извлечение урана из гранулята, произведенного на основе цемента ГЦ-40 с расходом 50 кг/т, составило 75 % при расходе серной кислоты 140 кг на 1 т руды; извлечение урана из неокомкованной руды класса  $-5+0$  мм, содержащей 0,06 % урана, за тот же период времени достигло только 68 % при расходе серной кислоты 95 кг на 1 т руды. Рост приблизительно в 1,5 раза удельного расхода серной кислоты при выщелачивании гранулированного материала очевидно связан с присутствием оксида кальция в связующем компоненте.

В ходе эксперимента была отмечена низкая фильтрация растворов через слой неокомкованной руды класса  $-5+0$  мм. Частичное разрушение гранул, которое имело

место при выщелачивании гранулята, не ухудшило пропускную способность рудного слоя. Так, при проведении процесса перколяционного выщелачивания в «базовом» режиме, без окомкования руды, периодически фиксировали скопление растворов орошения на поверхности сырья в колонне, вследствие чего не удавалось поддерживать стабильную интенсивность орошения. В среднем она составляла  $20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  против  $26 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , постоянно поддерживаемой в опыте с гранулированной рудой.

В 2019 г. в ПАО «ППГХО» были проведены опытно-технологические работы по фракционированию рудного сырья забалансовых отвалов с последующим перколяционным выщелачиванием обогащенного ураном материала крупностью  $-25+0$  мм, содержащего до 60 % рудной мелочи класса  $-5+0$  мм [13, 14].

Применение глиноземистого цемента в качестве связующего при окомковании руды класса  $-25$  мм позволило по сравнению с исходным материалом:

- снизить содержание класса  $-1$  мм с 20 до  $\sim 3$  %;
- стабилизировать за счет улучшения фильтрационных свойств сырья подачу рабочих растворов на выщелачивание урана и повысить на  $\sim 20$  % интенсивность орошения руды;
- увеличить на  $\sim 5$  % степень извлечения ценного компонента при аналогичной длительности процесса выщелачивания.

Однако в результате испытаний был установлен ряд факторов, обуславливающих экономическую нецелесообразность применения глиноземистых цементов для окомкования алюмосиликатных руд Стрельцовского рудного поля:

- значительное увеличение расхода серной кислоты в процессе выщелачивания ценного компонента в ряде опытов практически в 2 раза;
- рост цен на глиноземистые цементы, обусловленный, в том числе, ограниченным числом месторождений бокситов с высоким содержанием оксида алюминия при устойчивой цене на уран в последние годы.

В связи с этим извлечение урана методом КВ с окомкованием мелких фракций алюмосиликатного сырья могло иметь практические перспективы в случае успешного решения задач по сокращению расхода глиноземистого цемента с помощью добавок-пластификаторов и применению более дешевых связующих.

В 2021 г. в ЦНИЛ ПАО «ППГХО» были возобновлены работы по поиску наименее дорогих вяжущих компонентов для гранулирования рудной мелочи. На текущий момент исследуют два варианта производства гранулята с применением сульфатостойких добавок, разработанных научно-производственной компанией Mining Systems & Technologis (Россия, г. Кемерово) на базе отечественных компонентов:

- гранулированного рудного материала на основе сухой сульфатостойкой смеси SRP с расходом вяжущего вещества 40 кг на 1 т руды;



**Рис. 1. Базовая технологическая схема подготовки руды для перколяционного выщелачивания без гранулирования мелких классов:**

$a$  – содержание U в исходном сырье;  $V$  – распределение потока руды от исходного объема (в данном случае разделение потоков не предусматривается)

- гранулята с использованием при окомковании добавки типа ASRP, представляющей из себя смесь компонентов, которая после перемешивания ее с портландцементом увеличивает его сульфатостойкость и ускоряет набор прочности; при получении окатышей данного вида были использованы цемент марки ПЦ 400-Д0 с расходом 40 кг на 1 т руды и добавка ASRP-B с расходом 4,8 кг на 1 т руды.

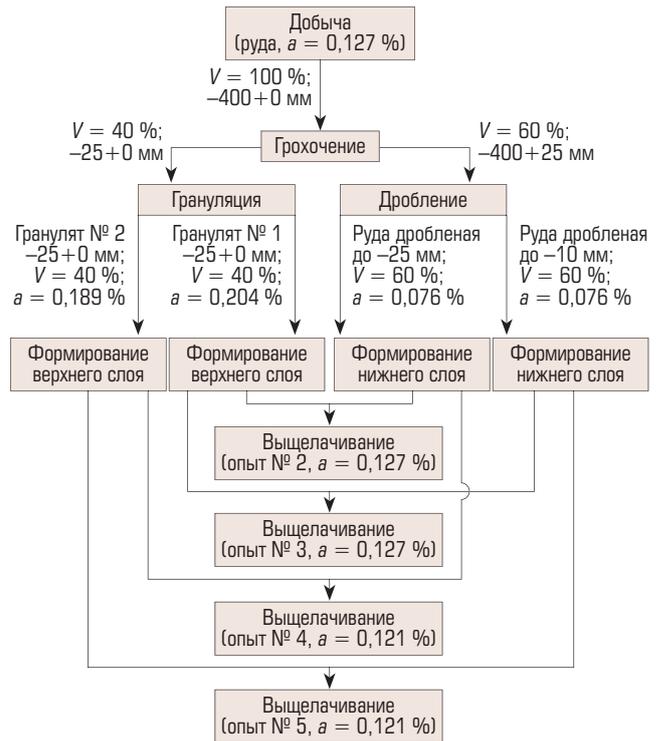
Гранулы, полученные в результате окомкования рудной мелочи, характеризовались устойчивостью к кислой агрессивной среде и по прочностным характеристикам не уступали окатышам, полученным на основе глиноземистого цемента ГЦ-40 с расходом 50 кг на 1 т руды.

На **рис. 1** представлена базовая технологическая схема подготовки руды для перколяционного выщелачивания без гранулирования мелких классов.

С целью изучения основных технологических показателей гранулированного материала была разработана представленная на **рис. 2** технологическая схема подготовки и укладки руды с использованием гранулята, позволяющая интенсифицировать процесс извлечения урана из руд, характеризующихся значительной долей мелких классов, образовавшихся в процессе отбойки руды на рудниках.

Для проведения лабораторных работ на частных пробах руды было поставлено пять опытов по инфильтрационному выщелачиванию:

- опыт № 1 (базовый) – руда крупностью  $-400+0$  мм, дробленая до крупности  $-25$  мм;
- опыт № 2 – с послойной укладкой рудного материала:
  - нижний слой (60 % от общей массы) – руда крупностью  $-400+25$  мм, дробленая до крупности  $-10$  мм;
  - верхний слой (40 % от общей массы) – гранулированная рудная мелочь класса  $-25$  мм на основе сульфатостойкой смеси SRP;

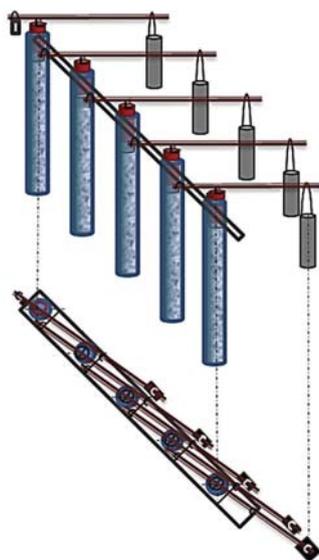


**Рис. 2. Технологическая схема подготовки рудного материала к перколяционному выщелачиванию с применением методов грануляции мелких классов:**

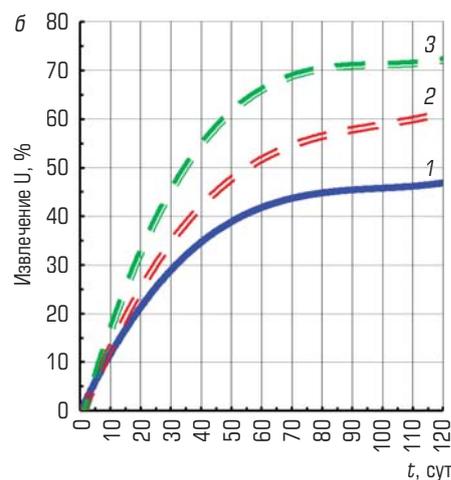
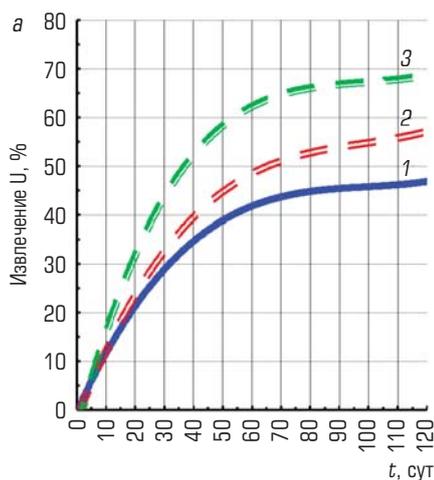
$a$  – содержание U в исходном сырье;  $V$  – распределение потока руды от исходного объема

- опыт № 3 – с послойной укладкой рудного материала:
  - нижний слой (60 % от общей массы) – руда крупностью  $-400+25$  мм, дробленая до крупности  $-10$  мм;
  - верхний слой (40 % от общей массы) – окомкованная с применением добавки SRP руда крупностью  $-25$  мм;
- опыт № 4 – с послойной укладкой рудного материала:
  - нижний слой (60 % от общей массы) – руда крупностью  $-400+25$  мм, дробленая до крупности  $-25$  мм;
  - верхний слой (40 % от общей массы) – гранулированная рудная мелочь крупностью  $-25$  мм на основе двухкомпонентного связующего из цемента ПЦ 400-Д0 и сульфатостойкой добавки ASRP-B;
- опыт № 5 – с послойной укладкой рудного материала:
  - нижний слой (60 % от общей массы) – руда крупностью  $-400+25$  мм, дробленая до крупности  $-10$  мм;
  - верхний слой (40 % от общей массы) – гранулированная рудная мелочь класса  $-25$  мм с использованием комбинированного вяжущего из цемента ПЦ 400-Д0 и сульфатостойкой добавки ASRP-B.

Дополнительно в экспериментальных колоннах (опыты № 2–5) с помощью системы рычагов и грузов (**рис. 3**) была создана статическая нагрузка на поверхность гранулята,



**Рис. 3.** Принципиальная схема моделирования нагрузки на исследуемый рудный материал



**Рис. 4.** Кинетика выщелачивания урана из рядовой руды и гранулята рудной мелочи на основе сульфатостойкой смеси SRP (а) и на основе портландцемента ПЦ400-ДО и добавки ASRP-B (б):

1 – руда крупностью 0–400 мм, дробленная до класса –25 мм; 2 – нижний слой (60 % от общей массы) – руда крупностью 25–400 мм, дробленная до класса –25 мм, верхний слой (40 % от общей массы) – гранулированная рудная мелочь класса –25 мм; 3 – нижний слой (60 % от общей массы) – руда крупностью 25–400 мм, дробленная до класса –10 мм, верхний слой (40 % от общей массы) – гранулированная рудная мелочь класса –25 мм

**Таблица 1.** Технологические показатели выщелачивания проб руды, подготовленных для перколяционного выщелачивания без окомкования рудной мелочи (опыт № 1, схема на рис. 1) и с применением методов грануляции мелких классов (опыты № 2–5, схема на рис. 2)

Содержание U в исходном рудном сырье, %	Интенсивность орошения, дм <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·ч)		Суммарный расход на руду, кг/т				Съем продуктивных растворов, м <sup>3</sup> /т	Содержание в растворе выщелачивания, г/дм <sup>3</sup>					Остаточное содержание U в кеке, %	Извлечение U в раствор, %
	заданная	фактическая	Смесь SRP	Добавка ASRP-B	Цемент ПЦ400-ДО	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		U <sub>ср</sub>	Fe <sup>3+</sup> <sub>кон</sub>	Fe <sup>2+</sup> <sub>кон</sub>	pH <sub>ср</sub>	ОВП <sub>кон</sub> , мВ		
Опыт № 1 (базовый)														
0,127	30	20	–	–	–	53	12	0,061	3	1	2,02	497	0,067	47
Опыт № 2														
0,127	30	30	40	–	–	78	17	0,050	2	0	1,96	579	0,055	57
Опыт № 3														
0,127	30	30	40	–	–	85	17	0,061	3	0	1,98	573	0,038	70
Опыт № 4														
0,121	30	30	–	4,8	40	81	17	0,052	3	0	1,94	560	0,047	61
Опыт № 5														
0,121	30	30	–	4,8	40	88	17	0,062	4	0	1,96	554	0,031	74

равная в среднем 78,4 кПа, что соответствует давлению пятиметрового слоя руды с насыпной плотностью 1,7 т/м<sup>3</sup>.

Выщелачивание всех проб осуществляли в производственном помещении при температуре 18–22 °С в непрерывном режиме обратными растворами с концентрацией серной кислоты 25–30 г/дм<sup>3</sup> на стадии «закисления» и 3–4 г/дм<sup>3</sup> на

стадии «активного» выщелачивания. Показатель pH продуктивных растворов поддерживали на уровне 1,8–2.

Полученные продуктивные растворы направляли на сорбцию, маточки сорбции доукрепляли по серной кислоте и подавали на орошение руды. Ежедневно отбирали пробы растворов, которые анализировали на содержание урана, серной

**Таблица 2. Сравнение затрат на реагенты, применяемые при производстве окатышей**

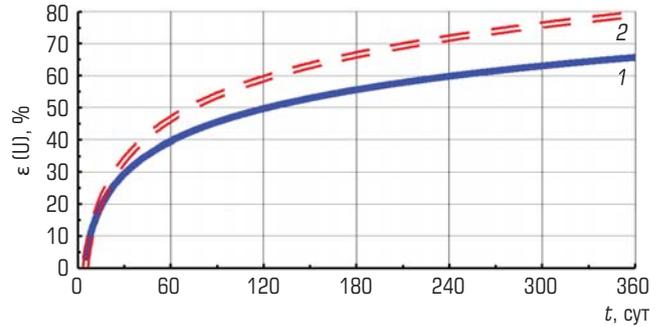
Реагент	Цена, руб. за 1 кг (по данным поставщиков на 2023 г.)	Расход реагента на переработку 1 т руды, кг	Затраты на переработку 1 т руды, руб.
Глиноземистый цемент марки ГЦ-40	40	50	2000
Сульфатостойкая смесь марки SRP	36	40	1440
Портландцемент марки ПЦ400-ДО	6	40	614
Сульфатостойкая добавка марки ASRP-B	78	4,8	

кислоты и pH. Потери оборотных растворов (отбор проб для анализа, испарение и т. д.) восполняли добавлением водного раствора серной кислоты. Результаты перколяционного выщелачивания, осуществляемого в течение 120 сут с заданной интенсивностью орошения 30 дм<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч) представлены в табл. 1 и на рис. 4.

Проведенные исследования на алюмосиликатной руде, содержащей 0,127 % урана, показали более высокую эффективность перколяционного выщелачивания урана из рудного материала, подготовленного с применением методов грануляции мелких классов, по сравнению с рудоподготовкой сырья, где окомкование рудной мелочи отсутствует.

Так руда, подготовленная по базовой схеме без применения грануляции (см. рис. 1), за 120 сут выщелочилась на 47 % вследствие того, что материал колонки не позволял пропускать растворы орошения с интенсивностью более 20 дм<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч). Варианты рудоподготовки, где применяли методы грануляции мелких классов (см. рис. 2) обеспечили более высокую эффективность: за аналогичный период времени в опытах с окомкованием рудной мелочи и дроблением класса -400+25 мм до крупности -25+0 мм показатель извлечения достиг уровня ~60 % при стабильной интенсивности орошения 30 дм<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч). В опытах с окомкованием мелкой руды, где крупные классы -400+25 мм додрабмливали до крупности -10+0 мм, за 120 сут извлечение урана в продуктивный раствор достигло ~70 %; при этом орошение материала с интенсивностью 30 дм<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч) происходило без образования застойных явлений на поверхности рудного слоя.

К положительным результатам работы следует отнести снижение в ~1,5–3,5 раза затрат на связующие реагенты, которые были использованы при создании гранулята, по сравнению с окатышами, производимыми ранее на основе глиноземистого цемента (табл. 2). Однако снижения расхода серной



**Рис. 5. Прогнозная кинетика выщелачивания урана из рядовой руды и гранулята рудной мелочи на основе сульфатостойкой смеси SRP:**

1 — руда крупностью 0–400 мм, дробленая до класса -25 мм; 2 — нижний слой (60 % от общей массы) — руда крупностью 25–400 мм, дробленая до класса -25 мм, верхний слой (40 % от общей массы) — гранулированная рудная мелочь класса -25 мм; ε (U) — степень извлечения

кислоты на выщелачивание ценного компонента из окатышей на данном этапе исследований добиться не удалось.

Для оценки прогнозного экономического эффекта за основу были приняты результаты опытов № 1 (схема на рис. 1) и № 2 (схема на рис. 2). В рассматриваемых экспериментах исходный рудный материал содержал одинаковое количество урана и имел крупность от 0 до 25 мм, однако в опыте № 2 рудную мелочь гранулировали и укладывали на верхний слой. Для получения возможных значений показателя извлечения за период времени 1 год был применен метод графического прогнозирования с помощью построения линий тренда, имеющих логарифмическую функцию (рис. 5).

Прогнозный показатель извлечения полезного компонента за 1 год выщелачивания для опытов № 1 и 2 составил ~66 и ~78 % соответственно.

В ценах 2023 г. достигаемый экономический эффект от внедрения технологической схемы подготовки рудного материала к перколяционному выщелачиванию с применением методов грануляции мелких классов определяется значениями ~200–210 млн руб/год при переработке руды 1 млн т/год с содержанием урана ~0,120–0,130 % на участках кучного выщелачивания ПАО «ППГХО».

Лабораторные исследования по переводу урана в продуктивный раствор из рудного материала, подготовленного к выщелачиванию с применением методов грануляции, будут продолжены. Задачи сокращения затрат на применяемые при окомковании реагенты, снижения себестоимости получения урана методом перколяционного выщелачивания могут быть решены при постановке опытов, направленных на:

- снижение расхода связующих веществ;

- сокращение времени переработки подготовленного сырья путем увеличения интенсивности орошения рудной поверхности;
- изучение возможности использования в качестве рабочего реагента отработанной серной кислоты;
- проведение исследований по оценке влияния поверхностно-активных веществ на фильтрационные свойства слоя дробленой руды.

### Выводы

На основе результатов проводимых исследований определены методы интенсификации процесса перколяционного

выщелачивания урана, применение которых в ПАО «ППГХО» позволяет решить актуальные проблемы, связанные с кольматацией и заиливанием рудной массы при выщелачивании урана из рудных штабелей, повысить эффективность извлечения урана методом КВ и обеспечить полноту использования сырьевой базы предприятия.

### Библиографический список

См. англ. блок. 

«GORNYI ZHURNAL», 2023, № 7, pp. 53–58  
DOI: 10.17580/gzh.2023.07.09

#### Application of pelletization in heap uranium leaching

#### Information about authors

**M. V. Yakovlev**<sup>1</sup>, Chief Engineer at Hydrometallurgical Plant, YakovlevMV@ppgho.ru  
**V. Yu. Bolshukhin**<sup>1</sup>, Leading Engineer–Process Engineer at Central Research Laboratory

<sup>1</sup>E. P. Slavsky PIMCU, Krasnokamensk, Russia

#### Abstract

The increasingly lower grade of uranium-bearing ore and the elevation of the uranium production cost at PIMCU calls for new approaches to chemical production. These circumstances should be taken into account in processing of mineral raw materials to ensure operation without loss. In recent years, PIMCU's urgent task is to increase essentially the volume of ore processing by heap leaching. The latter involves problems connected with ore mudding and formation of impermeable zones in ore piles due to the presence of siltstone and clayey material. In this respect, the lab-scale tests and pilot production trials of percolation leaching of pelletized uranium-bearing fine ore together with crushed coarser ore were carried out. Uranium recovery by heap leaching with pelletization of aluminosilicate fines would be practically efficient in case of successful reduction of the consumption of aluminous cement through the use of plasticizers and cheaper binders. The study of aluminosilicate ore with uranium content of 0.127 % proved the higher efficiency of percolation leaching of uranium from the ore material treated with pelletization of fine grains as compared with the methods of ore pretreatment without pelletizing.

The research findings helped determine stimulation techniques for the process of percolation leaching of uranium, which can enhance efficiency of uranium recovery by heap leaching and ensure complete utilization of mineral resources. The positive results of the research are the reduction in cost of the binding agents used in creation of granulated material by ~ 1.5–3.5 times as against pellets made of aluminous cement. The authors appreciate participation of the Director of Science at E. P. Slavsky PIMCU, Doctor of Engineering Sciences A. A. Morozov in this study.

**Keywords:** uranium-bearing aluminosilicate ore, mudding, pelletization, binder, crushing, screening, leaching.

#### References

1. Litvinenko V. G., Morozov A. A., Sheludchenko V. G. Development of percolating and agitation technology of uranium ores processing. *Gornyi Zhurnal*. 2013. No. 8-2. pp. 42–44.

2. Tirskiy A. V., Morozov A. A., Bakharev V. Yu. Development of concentration technology of silicate uranium ores. *Gornyi Zhurnal*. 2013. No. 8-2. pp. 40–41.
3. Gorbunov V. A., Litvinenko V. G. Development of processing technology for uranium ore of the Streltsovskoe field. *Gornyi Zhurnal*. 2018. No. 7. pp. 55–58.
4. Ovseychuk V. A. Dependence of Uranium Extraction into Solution During Heap Leaching on the Petrographic Composition of Ores. *Vestnik Zabaykalskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2021. Vol. 27, No. 7. pp. 27–32.
5. Pyper R., Seal T., Uhrie J. L., Miller G. C. Heap and Dump Leaching. *SME Mineral Processing and Extractive Metallurgy Handbook*. Englewood : Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2019. Vol. 1-2. pp. 1207–1224.
6. Nagar M. S., Morsy W. M. Acidic heap leaching behavior of uranium from El-Sela area, South Eastern Desert, Egypt. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2021. Vol. 329, Iss. 2. pp. 1073–1082.
7. Vorobev A. E., Tchard H. The main factors determining the efficiency of irrigation of the hl stack. *Vestnik Evraziyskoy nauki*. 2019. Vol. 11, No. 1.
8. Burdonov A. E., Kovalev E. V., Prokhorov K. V., Rasskazova A. V. A study on the use of pelletization in the processing of argillaceous gold-bearing ores. *Obogashchenie Rud*. 2020. No. 3. pp. 31–37.
9. Rasskazova A. V., Sekisov A. G., Kirilchuk A. G., Vasyanovich Yu. A. Stage-activation leaching of oxidized copper–gold ore: Theory and technology. *Eurasian Mining*. 2020. No. 1. pp. 52–55.
10. R&D Report : Technology of Nodulizing of Fine Ore Grains and Its Application in Flowcharts of Percolation Uranium Leaching. Final Report on Laboratory-Scale Studies. Krasnokamensk : PPGKhO, 2016. 30 p.
11. Hoummady E., Golfier F., Cathelineau M., Truche L., Durupt N. et al. A study of uranium-ore agglomeration parameters and their implications during heap leaching. *Minerals Engineering*. 2018. Vol. 127. pp. 22–31.
12. Alsaqoor S., Borowski G., Alahmer A., Beithou N. Using of Adhesives and Binders for Agglomeration of Particle Waste Resources. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2022. Vol. 16, Iss. 3. pp. 124–135.
13. R&D Report : Technology of Nodulizing of Fine Ore Grains and Its Application in Flowcharts of Percolation Uranium Leaching. Achievement of Target Values in the Technology of Nodulizing of Fine Ore Grains. Krasnokamensk : PPGKhO, 2019. 18 p.
14. Ovseychuk V. A., Morozov A. A. Research of the characteristic features of the ore mass composing the dumps of off-balance uranium ores formed during the development of the Streltsovskaya group deposits. *Physicochemical Geotechnology : Innovations and Development Trends. International Conference Proceedings*. Chita : Zabaykalskiy gosudarstvennyi universitet, 2021. pp. 20–25.