УДК 669.822.553.495

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ УРАНОВЫХ РУД СТРЕЛЬЦОВСКОЙ ГРУППЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В. А. ГОРБУНОВ,
директор
гидрометаллургического
завода

В. Г. ЛИТВИНЕНКО,
зам. главного инженера
по технологии, д-р техн. наук,
LitvinenkoVG@ppgho.ru

ПАО «ППГХО», Краснокаменск, Россия

Обобщены результаты внедрения на предприятии технических новшеств, направленных на совершенствование проектной схемы переработки урановых и уран-молибденовых руд. Показано, что для улучшения технологических показателей следует использовать сочетание различных методов (тонкое измельчение сырья, агитационное выщелачивание рудной пульпы, рентгенорадиометрическое обогащение бедных руд, кучное выщелачивание).

Ключевые слова: *уран, руда, выщелачивание, окислитель, серная кислота, диоксид марганца, схема, рентгенорадиометрическое обогащение, кучное выщелачивание, молибден.*

DOI: *10.17580/ gzh.2018.07.10*

Введение

Проектная схема переработки урановых руд алюмосиликатного типа на гидрометаллургическом заводе (ГМЗ) включала в себя следующие основные операции:

- крупное дробление исходной руды до крупности кусков менее 200 мм;
- измельчение дробленой руды в две стадии (в мельницах мокрого самоизмельчения ММС-70×23 и в шаровых мельницах МШР-4,5×3,6) до крупности, при которой содержание частиц размером более 0,1 мм не превышает 5 %;
- сгущение измельченного материала до плотности 1350–1450 г/л в сгустителях диаметром 50 м;
- сернокислотное агитационное выщелачивание в пачуках с воздушным перемешиванием, при избыточной кислотности 10–15 г/дм^3 с добавлением в качестве окислителя пиролюзита до значения окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) 460–500 мВ;
- сорбционное извлечение урана из выщелоченной пульпы анионообменными смолами в пачуках с воздушным перемешиванием после корректировки избыточной кислотности до значения pH = 2,2÷2,5;
- десорбцию урана с анионообменной смолы растворами серной (150 г/дм^3) и азотной (10–15 г/дм^3) кислот в десорбционных колоннах КНСПР;
- экстракцию урана из товарных регенератов тройной смесью органических веществ (Ди2ЭГФК, ТАА, ТБФ) в углеводородном разбавителе в экстракторах ящичного типа с механическими мешалками;
- реэкстракцию урана из насыщенной органической фазы раствором карбоната аммония с одновременной кристаллизацией и выпадением в осадок соли аммонийуранилтрикарбоната (АУТК) в трехфазных смесителях-отстойниках;
- прокалку отфильтрованных из карбонатных растворов кристаллов аммонийуранилтрикарбоната при температуре 830–850 °С во вращающихся горизонтальных трубчатых печах (ВГТП-8) с получением закиси-окиси урана.

После ввода в эксплуатацию ГМЗ практика его работы не подтвердила проектной производительности блоков измельчения, узлов выщелачивания-сорбции и выявила ряд «узких мест» технологических процессов, компоновки и конструкции оборудования.

Первые месяцы работы показали несовершенство узла самоизмельчения. Поэтому в 1976–1978 гг. была выполнена реконструкция этого узла, заключавшаяся в замене футеровки барабана мельницы ММС-70×23 для создания возможности загрузки шаров, в расширении фронта классификации путем установления дополнительного классификатора 1-КСП-30, а также в монтаже насосов 12 ГР по производительности, соответствующих величине потоков и изменении конструкции гидроциклонов второй стадии классификации. Результатом проведенной реконструкции стало увеличение производительности блоков измельчения в 1,8 раза по сравнению с первоначальной схемой.

Проведенная реконструкция узла измельчения, приведшая к увеличению объема переработки, выявила следующее «узкое место» в технической цепи – неспособность пачуков выщелачивания при существующей аэролифтной перекачке пропускать требуемый объем пульпы. Замена аэролифтной системы перекачки на самотечную путем установки между аппаратами перетоков диаметром 700 мм позволила увеличить пропускную способность узла выщелачивания на 40 %.

Предусмотренная проектом для осуществления процесса десорбции колонна КНСПР обладала рядом существенных недостатков, выявленных в первый период эксплуатации. Замена этих

© Горбунов В. А., Литвиненко В. Г., 2018

колонн на более надежные в эксплуатации и явно выигрывающие по технологическим и технико-экономическим показателям колонны ПИК завершила этап большой реконструкции ГМЗ. Принятые технические решения обеспечивают эффективную работу завода до настоящего времени.

Технологическая служба объединения продолжает работу по совершенствованию технологии переработки урановых руд, используя отечественный и зарубежный опыт в уранодобывающей отрасли промышленности [1–15].

Внедрение технических новшеств в перерабатывающем комплексе предприятия

В рудах ряда месторождений Стрельцовской группы, помимо урана, отмечено наличие молибдена, содержание которого составляет 0,04–0,2 %. Специалистами ВНИИХТ и ППГХО была разработана схема переработки комплексных уран-молибденовых руд с попутным получением молибдена в виде парамолибдата аммония (ПАМА). Рудоподготовка комплексных руд включала все операции, используемые при переработке однокомпонентных урановых руд. Гидрометаллургическая переработка сгущенных пульп комплексных руд включала в себя следующие операции:

- сернокислотное агитационное выщелачивание в пачуках с воздушным перемешиванием при избыточной кислотности 30–50 г/дм^3 с добавлением в качестве окислителя пиролюзита до значения ОВП 600–650 мВ;
- сорбционное извлечение молибдена из выщелоченной пульпы после снижения избыточной кислотности до 10–15 г/л путем дозировки исходной нейтральной пульпы однокомпонентной урановой руды анионообменными смолами в пачуках с воздушным перемешиванием; выводом насыщенного по молибдену анионита на десорбцию с последующей подачей пульпы на сорбционное извлечение урана;
- десорбцию молибдена с анионообменной смолы аммиачно-сульфатными растворами $(NH_4)_2SO_4$ – 70–150 г/дм^3, NH_4OH – 50–150 г/дм^3;
- сорбционное концентрирование молибдена на анионоообменной смоле после корректировки pH до 2–3 дозировкой серной кислоты;
- десорбцию молибдена аммиачно-сульфатными растворами;
- очистку от мышьяка и фосфора после дозировки расчетного количества раствора азотнокислого магния;
- осаждение полимолибдата аммония (ПоМА) после корректировки pH до значения 2,2–2,4 дозировкой азотной кислоты;
- растворение ПоМА в доукрепленных до 1,5–3 % по NH_4OH и подогретых паром до 80 °С маточниках осаждения ПАМА;
- осаждение ПАМА после охлаждения раствора до 20–25 °С.

Переработка уран-молибденовых руд на ГМЗ была начата в 1980 г. и уже в 1981 г. выпуск молибдена составил 102 т, максимальный выпуск молибдена (628 т) был достигнут в 1989 г.

В 1979–1981 гг. проведены работы по строительству радиометрической обогатительной фабрики (РОФ), в конце 1981 г. схема радиометрического обогащения начала действовать. На радиометрическое обогащение направляли бедную по содержанию урана руду, богатая руда шла на гидрометаллургический передел, минуя обогатительную фабрику. Деление руды на потоки осуществлялось предварительной крупнопорционной сортировкой на автомобильной радиометрической контрольной станции (АРКС).

Для обогащения руды фракции 50–200 мм использовали сепараторы непрерывного действия с конусными раскладчиками «Гранат», оснащенные радиометрами «Полет», необходимым вспомогательным оборудованием конструкции ЦНИЛ (г. Желтые Воды, Украина). Для обогащения руды фракции 25–50 мм были установлены сепараторы «Агат», разработанные и изготовленные там же.

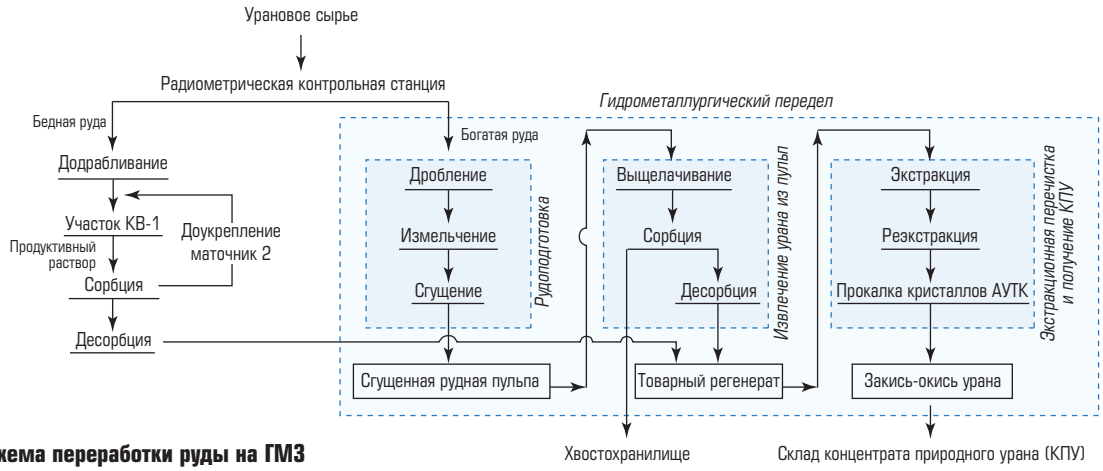
Объем переработанной на РОФ руды составлял в разные годы от 400 до 911 тыс. т. За период работы РОФ (1982–1990 гг.) было переработано более 6 млн т руды и отсортировано около 1,5 млн т пустой породы.

Одновременно с решением задач по переработке руд по классической гидрометаллургической схеме, включающей тонкое измельчение сырья, на предприятии проводились работы по исследованию технологии переработки руд методами кучного (КВ) и подземного (ПВ) выщелачивания. На первом этапе в переработку были вовлечены забалансовые, по содержанию урана, руды. Разработанная технологическая схема включала: перколяционное выщелачивание штабелей забалансовых руд забойной крупности; сбор продуктивных растворов; сорбционное извлечение урана анионообменными смолами; доукрепление маточников сорбции по серной кислоте и возврат их на орошение рудного штабеля. Десорбцию урана с насыщенного анионита осуществляли растворами бикарбоната аммония, с одновременным высаливанием черновых кристаллов аммонийуранилтрикарбоната, которые после отделения от влаги направляли на экстракционную перечистку, осуществляемую на ГМЗ. Установка КВ забалансовых руд была введена в эксплуатацию в 1975 г., производительность ее по переработке продуктивных растворов составляла 250 м^3/ч.

Изменение экономической ситуации в стране, удорожание химических реагентов и увеличение затрат на их перевозку потребовало новых подходов к стратегии развития технологии переработки урановых руд. Проведенный функционально-стоимостной анализ показал необходимость увеличения объема руд, вовлекаемых в переработку методом кучного выщелачивания. В 1996 г. была введена в эксплуатацию установка кучного выщелачивания бедных товарных урановых руд, что позволило сократить объемы переработки в основной гидрометаллургической цепочке и снизить расходы по наиболее затратным операциям всего технологического цикла.

Вследствие того, что используемые на ГМЗ процессы агитационной переработки руд отличаются потреблением значительного количества реагентов и материалов, основное внимание уделялось созданию экономически эффективных процессов кислотного выщелачивания урансодержащего сырья.

С целью сокращения расхода серной кислоты на операции агитационного вскрытия урана были изучены закономерности его выщелачивания в режимах гидролиза трехвалентного железа, по-



Блок-схема переработки руды на ГМЗ

зволившие определить оптимальные значения pH среды при обработке материала (2,3–2,6), температуры (55–65 °С) и ОВП (460–470 мВ), позволившие минимизировать себестоимость извлекаемого металла.

Для снижения расхода диоксида марганца, используемого в качестве окислителя, были проведены исследования по усовершенствованию процесса выщелачивания путем применения в качестве оксиданта рудного железа. Сущность данной технологии заключается в том, что исходная рудная пульпа разделяется на два потока; в головном из них, при значении pH 2–4,2, осуществляется выщелачивание железа, затем в него подают исходную рудную пульпу с повышением значения pH до 5–5,5 и проводят окисление перешедшего в жидкую фазу двухвалентного железа кислородом воздуха. После окисления железа в пульпу дозируют серную кислоту до значения pH 1,5–2,5 и диоксид марганца до ОВП 450-470 мВ и ведут выщелачивание урана.

Внедрение разработанной технологии агитационного выщелачивания позволило сократить расход серной кислоты на 35–40 %, диоксида марганца – на 70–90 % и известняка – на 60–65 %, что в стоимостном выражении экономии значительно перекрывает убытки от увеличения (на 2–3 %) потерь урана с твердой фазой.

Дальнейшим этапом развития ГМЗ стало восстановление передела покусковой сортировки бедных по содержанию урана руд с использованием метода рентгенорадиометрической сепарации. Технически сортировка в сепараторах СРФ осуществляется следующим образом. Вибропитатель обеспечивает непрерывную подачу руды из приемного бункера на раскладчик. Последний формирует потоки (ручьи) руды в лотках и подает куски руды в зону измерения. Разделение кусков происходит в период их свободного падения. Каждый кусок подвергается сканирующему рентгеновскому облучению на расстоянии 30 мм от блока детектирования. Спектр вторичного рассеянного излучения от куска подвергается автоматической компьютерной обработке, определению аналитического параметра разделительного признака и сравнению полученной величины с заданным пороговым значением. Измерительная система сепаратора выдает сигнал управления для срабатывания исполнительного механизма по отношению к куску с содержанием урана выше порогового значения. Исполнительный механизм электромагнитного шиберного типа изменяет траекторию падения куска, скорость которого при подходе к шиберу составляет около 3 м/с, и направляет его в приемник концентратора. Остальные куски падают без отклонения траектории в приемник отвальных хвостов. В целом достоинства рентгенорадиометрической сепарации (глубокая селективность и экономическая эффективность) определяются высокой чувствительностью и информативностью рентгеновского излучения, а также характерно высокой концентрацией анализируемых компонентов на поверхности кусков – куски разламываются при взрыве и дроблении по плоскостям низкой прочности, но с повышенной минерализацией.

Возобновление работы обогатительной фабрики было осуществлено в 2006 г. Используемая для рудоподготовки схема включает: отмывку и грохочение дробленой по классу –200 мм руды с подачей подрешетного продукта –5 мм, обогащенного по урану, в пульповой процесс; подачу фракции –40+5 мм на установку кучного выщелачивания, а машинного класса –200+40 мм – на рентгенорадиометрическую сепарацию. Основные показатели обогащения руд с содержанием урана 0,075–0,105 % удерживаются на следующем уровне: выход хвостов 24–31 % (в среднем 25,3 %); содержание урана в хвостах 0,012–0,015 % (в среднем 0,014 %); выход руды для установки КВ 35–40 %; содержание урана в продукте, направляемом на перколяционное выщелачивание, 0,08–0,09 %; коэффициент обогащения в концентрате рентгенорадиометрической сепарации, подаваемом в основную гидрометаллургическую цепочку, 1,4–1,8; эффективность выделения хвостов 85–93 %.

Выделение на установку КВ материала крупностью –40+5 мм позволило повысить извлечение урана в продуктивный раствор до 75 %, что на 5–10 % выше извлечения, достигаемого при выщелачивании руд забойной крупности. Следующим этапом интенсификации процесса перколяционного выщелачивания урана стало внедрение схемы додрабливания промпродукта РОФ перед укладкой в штабели до крупности –15 мм. Это дало возможность повысить извлечение урана до 85 %.

В результате проведенного комплекса лабораторных работ, полупромышленных и опытно-промышленных испытаний разра-

ботана гибкая схема переработки урановых руд, позволяющая оптимально сочетать методы гидрометаллургической переработки с тонким помолом сырья, кучного выщелачивания и рентгенорадиометрического обогащения (см. **рисунок**).

Изменением заданной границы отсечки по содержанию урана в руде на АРКС достигается варьирование объемов руды, направляемых на переработку в гидрометаллургическую цепочку напрямую и, соответственно, на РОФ и КВ. Это позволяет при изменении цены урана в готовой продукции, цен на реагенты и энергоносители выбирать оптимальную схему для достижения максимальной экономической эффективности производства закиси-окиси урана.

В настоящее время перед технологической службой предприятия поставлена задача по реализации технологии извлечения ценных компонентов из руд месторождений Аргунское и Жерловое, начало добычи которых запланировано в 2023 г. на руднике № 6. Ввод в эксплуатацию этого рудника и внедрение разработанной схемы переработки карбонатных руд на ГМЗ обеспечит работу предприятия до 2046 г.

Заключение

Усилиями специалистов ГМЗ и технологической службы объединения осуществлена техническая реконструкция перерабатывающего комплекса предприятия, реализована схема извлечения урана из руд, позволяющая оптимально сочетать методы гидрометаллургической переработки с тонким помолом сырья, кучного выщелачивания и рентгенорадиометрического обогащения, и обеспечившая сокращение расхода реагентов и улучшение технико-экономических показателей производства.

Библиографический список

См. англ. блок. ГЖ

«GORNYI ZHURNAL», 2018, № 7, pp. 55–58
DOI: 10.17580/ gzh.2018.07.10

Development of processing technology for uranium ore of the Streltsovskoe field

Information about authors
V. A. Gorbunov[1], Director of Metallurgical Works
V. G. Litvinenko[1], Deputy Chief Engineer of Technology, Doctor of Engineering Sciences, LitvinenkoVG@ppgho.ru

[1] Priargunsky Mining and Chemical Works, Krasnokamensk, Russia

Abstract
The article generalizes results of many years-long research work undertaken by specialists of the Metallurgical Works and Processing Service of Priargunsky Mining and Chemical Works towards the large-scale modernization of the existing processing structure.
The first system to be introduced was the circuit of complex uranium–molybdenum ore processing with the concurrent recovery of a marketable molybdenum-bearing product. In the early 1980s radiometric processing factory for ore with low uranium content was put into operation. Heap leaching plant using various economic leaching agents was built to process noncommercial ore reserves. The major success was introduction of grading of poor ore fragments using the method of X-ray radiometric separation.
As a result of the accomplished lab-scale, semi-commercial and full-scale research and testing, a flexible uranium processing circuit was developed; it enabled efficient combination of hydrometallurgy, fine milling, heap leaching and X-ray radiometric separation. Adjustment of the preset limit of uranium content at check points allows varying ore feeds in different processing schemes. As a consequence, it is possible to select optimal processing flowcharts to reach maximum economic efficiency of urano-uranic oxide production in the conditions of varied prices of final uranium products, reagents and energy sources.

Keywords: uranium, ore, leaching, oxidizer, sulfuric acid, manganese dioxide, scheme, X-ray radiometric enrichment, heap leaching, molybdenum.

References

1. Zhivov V. L., Boytsov A. V., Shumilin M. V. Uranium: geology, mining, economics. Moscow : Atomredmetzoloto, 2012. 301 p.
2. Bugenov E. S., Vasilevskiy O. V., Shkolnik V. S. Theory and practice of production of uranium and its compounds. Almaty : Kazakh National Technical University, Kazatomprom, 2012. 336 p.
3. 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.
4. Trubetskoy K. N., Kaplunov D. R., Viktorov S. D., Rylnikova M. V., Radchenko D. N. Scientific rationale of technologies for comprehensive resource-saving exploitation of strategic mineral resources. *Gornyy informatsionno-analiticheskii byulleten.* 2014. No. 12. pp. 5–12.
5. Volkov V. P. Sorption processes of operating productions. Moscow : "Ore and Metals" Publishing House, 2014. 160 p.
6. Svyatetsky V. S., Solodov I. N. Technological advancement strategy of uranium mining industry in Russia. *Gornyi Zhurnal.* 2015. No. 7. pp. 68–77. DOI: 10.17580/gzh.2015.07.10
7. Chanturia V. A. Innovation-based processes of integrated and high-level processing of natural and technogenic minerals. *Gornyi Zhurnal.* 2015. No. 7. pp. 29–37. DOI: 10.17580/gzh.2015.07.05
8. Tsypin E. F., Ovchinnikova T. Yu., Efremova T. A., Pestov V. V. Development of flow sheets for pre-concentration of multi-component complex ores. *Obogashchenie Rud.* 2016. No. 5. pp.8–13. DOI: 10.17580/or.2016.05.02
9. Morozov A. A., Yakovlev M. V. Processing-involvement of off-balance uranium ores, formed during the mastering of Streltsovskoe ore field deposits. *Gornyy informatsionno-analiticheskii byulleten.* 2016. No. 12. pp. 174–181.
10. Niyetbayev M., Yermilov A., Avdassyov I., Pershin M. The methods for performance improvement of technological wells at in-situ uranium leaching. *Proceedings of the International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM-2014), 23–27 June 2014.* Vienna : International Atomic Energy Agency, 2014. 81 p.
11. Ren P., Yue Y., Wang K., Wu W., Yan Z. Synthesis and characterization of N,N,N,N-tetraalkyl-4-oxaheptanediamide as extractant for extraction of uranium (VI) and thorium (IV) ions from nitric acid solution. *Radioanalytical and Nuclear Chemistry.* 2014. Vol. 300, No. 3. pp. 1099–1103.
12. GuoXiang C., Chun Ji X. Hydrodynamic regime as a major control on localization of uranium mineralization in sedimentary basins. *Science China Earth Sciences.* 2014. Vol. 57. pp. 2928–2933.
13. Heck S., Rogers M. Resource Revolution : How to Capture the Biggest Business Opportunity in a Century. Amazon Publishing, 2014. 256 p.
14. Meng H., Li Z., Ma F., Jia L., Wang X., Zhou W., Zhang L. Preparation and characterization of surface imprinted polymer for selective sorption of uranium(VI). *Radioanalytical and Nuclear Chemistry.* 2015. Vol. 306, No. 1. pp. 139–146.
15. Schnell H. Building a uranium heap leach project. *In URAM 2014 Conference, 23–27 June, 2014, Vien, Ausrtia.* Available at: http://www-pub.iaea.org/iaeameetings/cn216pn/Thursday/Session11/178-Schnell.pdf (accessed: 15.04.2018).