

УДК: 622.765:669.28:669.35:628.4

doi 10.70769/3030-3214.SRT.3.4.2025.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ МЕДИ, ЖЕЛЕЗО И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ОБОЖЕННОГО МОЛИБДЕНОВОГО ПРОМПРОДУКТА



**Вохидов Бахриддин
Рахмидинович**

Доктор технических наук,
профессор Навоийского
государственного горно-
технологического университета,
Навои, Узбекистан
E-mail:
bakhriddin.vokhidov@mail.ru
ORCID ID: 0000-0002-0819-6752



**Рустамов Исломжон
Илхомович**

Помощник ректора
Университета информационных
технологий и менеджмента,
Ташкент, Узбекистан



**Рахимов Махмуджон
Муроджонович**

Начальник отдела
Министерства
горнодобывающей
промышленности и геологии,
Ташкент, Узбекистан



**Азимов Ойбек
Ахмадович**

Доцент Навоийского
государственного горно-
технологического университета,
Навои, Узбекистан

Аннотация. Представлены результаты извлечения железа, меди и благородных металлов из твёрдых отходов (кеков) содового выщелачивания обожжённого молибденового промпродукта. По данным ИСП-спектроскопии и РФА кек содержит Mo, Re, Cu, Fe и др.; установлены фазы $Fe(OH)_3 \cdot nH_2O$, MoO_2/MoO_3 , MoS_2 , а также молибдатные соединения ($CuMoO_4$, $ZnMoO_4$, $CaMoO_4$, $PbMoO_4$, $Fe_2(MoO_4)_3$). Кек мелкодисперсен (до 95% < 0,074 мм), с удельным весом ~1,33 т/м³ и слабыми магнитными свойствами, обусловленными гидратированными оксидами железа. Разработана и апробирована схема мокрой магнитной сепарации с поэтапным повышением магнитной индукции, добавлением 0,5–0,8% магнетитовых частиц (для подмагничивания слабомагнитных зерен) и ~1 г/т полиакриламида. Получен магнитный концентрат с содержанием Fe 26–27% при снижении Cu до ~0,05% и Mo до ~0,2%; немагнитная фракция обогащена Mo (~5,2%) и Cu (~2,4%) и направляется на последующую гидрометаллургическую переработку (извлечение меди и благородных металлов). Материальный баланс и испытания показали технологическую реализуемость и селективность предлагаемого подхода для комплексной утилизации кеков выщелачивания.

Ключевые слова: обожжённый молибденовый промпродукт, содовое выщелачивание, кек, мокрая магнитная сепарация, магнетитовые частицы, полиакриламид, железный концентрат, немагнитная фракция, извлечение меди, благородные металлы, комплексная переработка.

KUYDIRILGAN MOLIBDEN ORALIQ MAHSULOTINI TANLAB ERITISHNING QATTIQ CHIQINDILARIDAN MIS, TEMIR VA QIMMATBAHO METALLARNI AJRATIB OLISHNI TADQIQ QILISH

Voxidov Baxriddin
Raxmidinovich

*Navoiy davlat konchilik va
texnologiyalar universiteti texnika
fanlari doktori, professor,
Navoiy, O'zbekiston*

Rustamov Islomjon
Ilhomovich

*Rektor yordamchisi, Axborot
texnologiyalari va menejment
universiteti, Toshkent, O'zbekiston*

Raximov Maxmudjon
Murodjonovich

*Tog'-kon sanoati va geologiya
vazirligi bo'lim boshlig'i,
Toshkent, O'zbekiston*

Azimov Oybek
Axmadovich

*Navoiy davlat konchilik va
texnologiyalar universiteti dotsenti,
Navoiy, O'zbekiston*

Annotatsiya: Kuydirilgan molibden oraliq mahsulotini sodali tanlab eritishning qattiq chiqindilari (keklar) dan temir, mis va qimmatbaho metallarni ajratib olish natijalari keltirilgan. IQ-spektroskopiya va RFA ma'lumotlariga ko'ra, kek tarkibida Mo, Re, Cu, Fe va boshqalar mavjud; $Fe(OH)_3 \cdot nH_2O$, MoO_2/MoO_3 , MoS_2 fazalari, shuningdek, molibdat birikmalari ($CuMoO_4$, $ZnMoO_4$, $CaMoO_4$, $PbMoO_4$, $Fe_2(MoO_4)_3$) aniqlangan. Kek mayda dispers ($95\% < 0,074$ mm gacha), solishtirma og'irligi $\sim 1,33$ t/m³ va gidratlangan temir oksidlari tufayli kuchsiz magnit xususiyatlarga ega. Magnit induksiyasini bosqichma-bosqich oshirib, 0,5-0,8% magnetit zarrachalari (kuchsiz magnitlangan zarrachalarni magnitlash uchun) va ~ 1 g/t poliakrilamid qo'shib nam magnitli separatsiyalash sxemasi ishlab chiqildi va sinovdan o'tkazildi. Tarkibida Fe 26-27% bo'lgan magnit konsentrati olindi, bunda Cu $\sim 0,05\%$ gacha va Mo $\sim 0,2\%$ gacha kamaytirildi; nomagnit fraksiya Mo ($\sim 5,2\%$) va Cu ($\sim 2,4\%$) bilan boyitildi va keyingi gidrometallurgik qayta ishlashga (mis va nodir metallarni ajratib olish) yuborildi. Moddiy balans va sinovlar tanlab eritish keklarini kompleks utilizatsiya qilish uchun taklif etilayotgan yondashuvning texnologik amalga oshirilishi va selektivligini ko'rsatdi.

Kalit so'zlar: kuydirilgan molibden oraliq mahsuloti, sodali tanlab eritish, kek, nam magnitli separatsiya, magnetit zarralari, poliakrilamid, temir konsentrati, nomagnit fraksiya, misni ajratib olish, nodir metallar, kompleks qayta ishlash.

STUDY OF EXTRACTION OF COPPER, IRON AND NOBLE METALS FROM SOLID WASTE OF LEACHING OF CALCINED MOLYBDENUM INTERMEDIATE PRODUCT

Vokhidov Baxriddin
Rakhmidinovich

*Doctor of Technical Sciences,
Professor of Navoi State Mining
and Technology University,
Navoi, Uzbekistan*

Rustamov Islomjon
Ilkhomovich

*Assistant Rector, University of
Information Technologies and
Management, Tashkent, Uzbekistan*

Rakhimov Makhmudjon
Murodjonovich

*Head of Department of the Ministry
of Mining Industry and Geology,
Tashkent, Uzbekistan*

Azimov Oybek
Akhmadovich

*Docent of the Navoi State Mining
and Technological University,
Navoi, Uzbekistan*

Abstract. The results of the extraction of iron, copper, and precious metals from solid waste (cakes) of soda leaching of calcined molybdenum intermediate product are presented. According to IR spectroscopy and RFA data, the cake contains Mo, Re, Cu, Fe, etc.; $Fe(OH)_3 \cdot nH_2O$, MoO_2/MoO_3 , MoS_2 phases, as well as molybdate compounds ($CuMoO_4$, $ZnMoO_4$, $CaMoO_4$, $PbMoO_4$, $Fe_2(MoO_4)_3$) were identified. The cake is finely dispersed (up to $95\% < 0.074$ mm), has a specific gravity of ~ 1.33 t/m³, and weak magnetic properties due to hydrated iron oxides. A scheme of wet magnetic separation with a gradual increase in magnetic induction with the addition of 0.5-0.8% of magnetite particles (for magnetization of weakly magnetized particles) and ~ 1 g/t of polyacrylamide was developed and tested. A magnetic concentrate with a Fe content of 26-27% was obtained, in which Cu was reduced to $\sim 0.05\%$ and Mo to $\sim 0.2\%$; the non-magnetic fraction was enriched with Mo ($\sim 5.2\%$) and Cu ($\sim 2.4\%$) and sent for further hydrometallurgical processing (extraction of copper and rare metals). Material balance and tests have shown the technological feasibility and selectivity of the proposed approach to the integrated disposal of leaching cakes.

Keywords: calcined molybdenum intermediate, soda leaching, cake, wet magnetic separation, magnetite particles, polyacrylamide, iron concentrate, non-magnetic fraction, copper extraction, rare metals, complex processing.

Введение. В современных условиях интенсификации цветной металлургии и роста объёмов переработки молибденсодержащего сырья особое значение приобретает проблема рационального использования отходов производства. В процессе содового выщелачивания обожжённого молибденового продукта образуются твёрдые остатки — кеки, содержащие значительное количество ценных компонентов: железо, медь, рений, а также благородные металлы (золото и серебро). Традиционно такие отходы рассматриваются как малоперспективные для вторичной переработки, однако современные аналитические и технологические методы позволяют рассматривать их как важный источник редких и цветных металлов.

Одной из актуальных задач является разработка эффективных способов селективного извлечения железа, меди и благородных металлов из твёрдых остатков выщелачивания, обеспечивающих комплексную переработку сырья и снижение экологической нагрузки на окружающую среду. Особый интерес представляет применение **мокрой магнитной сепарации** с добавлением магнетитовых частиц и флокулянтов, что позволяет разделять фазы по магнитным свойствам и концентрации железосодержащих соединений.

В настоящей работе рассматриваются результаты исследований по определению состава кеков, изучению их физико-химических свойств и разработке технологической схемы извлечения железа, меди и благородных металлов. Полученные данные служат основой для совершенствования процессов вторичной переработки отходов молибденового производства и повышения комплексности использования минеральных ресурсов.

Материалы и методы. При содовом выщелачивании обожжённого молибденового промпродукта образуется кек, в котором содержится Mo, Re, Fe, Cu, Au, Ag и твёрдая часть невыщелаченного огарка.

Анализами ИСП — спектроскопии установлено, что кек содержит (в, %): 33,98 Mo, (в т.ч. 2,1 окисленного и 2,7 сульфидного); 1,2 Cu; 0,03 Re; 0,24 W, а также 9,5 Fe; 4,3 SiO₂; следы As, P; и 42 (и выше) влаги.

Результатами рентгенофазовых анализов определены формы нахождения основных компонентов в кеке: Fe(OH)₃•30H₂O, MoO₂, MoO₃, MoS₂, CuMoO₄, ZnMoO₄, CaMoO₄, PbMoO₄, Fe₂(MoO₄)₃, а также адсорбированные на гидроксиде железа формы меди, молибдена, вольфрама.

Исследованиями установлено, что кек имеет слабые магнитные свойства и удельный вес составляет 1,33 т/м³. Данные свойства кека использованы для разработки технологии извлечения железа методом мокрой магнитной сепарации в сочетании гравитационным обогащением [1; с. 417].

Магнитная сепарация — сепарация двух материалов, основанная на их разделении по магнитным свойствам [2]. Кроме магнитных сил, на частицы действуют сила тяжести и силы выталкивания и сопротивления среды, в которую помещаются зерна (ее плотность, вязкость, смачиваемость, степень турбулизации потока и др.). Результат взаимодействия указанных сил предопределяет различный характер движения частиц, что позволяет произвести их разделение. Материалы с высокой магнитной восприимчивостью при магнитном воздействии отделяются от немагнитных и слабо магнитных частиц.

Для того чтобы разделить смесь материалов, различающихся по магнитным свойствам, должны одновременно соблюдаться следующие условия: а) магнитная сила, действующая на сильно магнитные материалы, должна быть равна или больше равнодействующей всех механических сил, действующих на эти минералы в направлении, противоположном магнитной силе; б) магнитная сила, действующая на слабо магнитные материалы, должна быть меньше равнодействующей всех механических сил, действующих на эти минералы [3; с. 400].

Разделение материала в магнитном поле под влиянием магнитных и механических сил осуществляется в режиме извлечения магнитных материалов (нижнее питание) или в режиме их удерживания (верхнее питание). Средой, в которой осуществляется разделение материалов, может быть воздух или вода. В соответствии с этим процесс называется мокрой

или сухой магнитной сепарацией.

На магнитную частицу действуют следующие силы (отнесенные к зерну массой, равной единице):

1) магнитная сила, нормальная к поверхности барабана,

2) сила трения руды на плоскость $f_{тр}$ (магнитные частицы под воздействием $F_{магн}$ отрываются от наклонной плоскости, поэтому для них $f_{тр}=0$); 3) сила инерции $F_{ц}$, возникающая за счет кривизны питающего лотка. Влияние последней силы на процесс разделения незначительно и ею можно пренебречь. Обозначим: t_1 - время, за которое частица пройдет длину зоны притяжения L ; t_2 - время, за которое частица поднимется на высоту зоны притяжения h . Если частица поступает в рабочую зону с начальной скоростью V_0 , путь L , который за время t_1 пройдет частица [4; с. 113]. Одновременно магнитная частица должна переместиться в направлении к полюсу на расстояние.

Режим удерживания. В этом случае руда подается в верхнюю часть барабана и перемещение ее через рабочую зону сепаратора происходит по криволинейной траектории. На магнитное зерно при разделении в воздушной среде действуют следующие силы (отнесенные к зерну массой, равной единице):

1) магнитная сила, нормальная к поверхности барабана

$$F_{магн} = \mu_0 \chi H \sin \alpha \quad (1)$$

2) сила тяжести $f_m = g$, имеющая две составляющие: нормальную к поверхности барабана $f_n = g \cos \alpha$ и касательную к этой поверхности $f_t = g \sin \alpha$,

3) центробежная сила, нормальная к поверхности барабана $F_{ц} = v^2/R$,

Необходимая удельная магнитная сила для удерживания магнитных минералов, содержание которых в руде $\alpha_m = 0,3 \pm 0,9$,

Таким образом, основными механическими силами, определяющими удельную магнитную силу при сепарации в режиме удерживания, являются центробежная сила и сила тяжести зерна, причем при значениях угла α от 0 до 90° последняя уменьшает необходимую магнитную силу [5; с. 404].

В зависимости от направления пере-

мещения продуктов относительно друг друга различают следующие режимы сепарации:

прямоточный - продукты сепарации движутся в том же направлении, что и исходная руда; противоточный - магнитная фракция движется в направлении, противоположном направлению движения исходной руды;

полупротивоточный - исходная руда, направляемая на магнит, разделяется на магнитную и немагнитную фракции, отклоняющиеся под прямыми углами в разные стороны.

Условия разделения при прямоточном режиме не обеспечивают полного извлечения магнитных зерен, поскольку слабомагнитные зерна, притягиваемые магнитом с меньшей скоростью, должны притягиваться к уже образовавшемуся на нем слою сильно магнитных зерен и в связи с этим возрастает вероятность их отрыва и попадания в немагнитный продукт [6; с. 132-140].

Противоточный режим обеспечивает более благоприятные условия для извлечения магнитных зерен, так как слабо магнитные зерна могут притягиваться к поверхности магнита, свободной от сильно магнитных зерен.

При полупротивоточном режиме направление движения исходного питания совпадает с направлением магнитных сил, действующих на магнитные частицы, вследствие этого облегчается их извлечение.

Несмотря на конструктивные отличия магнитных систем и других узлов, все сепараторы делятся на две группы:

1) сепараторы со слабым магнитным полем (напряженность магнитного поля от 70 до 120 кА/м и сила поля от $3 \cdot 10^5$ до $6 \cdot 10^5$ кА²/м³), предназначенные для выделения из руд сильномагнитных минералов;

2) сепараторы с сильным магнитным полем (напряженность магнитного поля от 800 до 1600 кА/м и сила поля от $3 \cdot 10^7$ до $1210 \cdot 10^7$ кА²/м³), предназначенные для выделения из руд слабомагнитных минералов. Сепарация может осуществляться в воздушной или водной среде и магнитные сепараторы, в свою очередь, подразделяются на сухие и мокрые.

Из литературных данных [7], известен, способ мокрого магнитного обогащения слабо-

магнитных тонко вкрапленных железо содержащих руд, заключающейся магнитной гидросепарации измельченной исходной руды с добавлением сильномагнитных частиц через целевые магнитные системы с пересечением частицами магнитных силовых линий для подмагничивания слабомагнитных частиц руды. В измельченной исходной руде поддерживают концентрацию сильномагнитных магнетитовых частиц, достаточную для флокуляции ими слабомагнитных частиц.

Для извлечения железа из кека выщелачивания обожженного молибденового продукта исследована мокрая магнитная сепарация с добавлением в исходную пробу магнетитовых частиц. Процесс магнитного разделения включает многостадийную магнитную сепарацию при периодическом увеличении поля магнитной индукции от 0,085 до 0,11 Тесла с добавлением магнетитовых частиц в количестве 0,5% к массе сухого материала класса крупности -0,4+0,2мм и поли акриламида концентрации 1,0 г/т сухого материала.

Установлены, что кеки выщелачивания благодаря из-за значительного содержания в них гидратированных оксидов железа имеют слабо магнитные свойства. Высушенный кек является мелкодисперсным материалом, имеющим до 95,0 % крупностью фракции – 0,074 мм и с удельным весом 1,33 т/м³. Эти физические характеристики использованы для отделения железа из состава кека выщелачивания методом магнитного сепарации.

Результаты и обсуждение. Эксперименты мокрой магнитной сепарации кека выщелачивания проводились на лабораторном магнитном сепараторе, в следующей последовательности : из пульпы кека состава (в %): 32,8-Мо; 1,2-Cu; 0,03-Re; 9,5-Fe; 4,3-SiO₂; 2,58-CaO; следы As, P, Sb. Из кека фильтрацией отделен раствор; кек промыли водой, остаточная влажность кека составил 42,0%; материалу добавлена по сухому весу 0,8% магнетита и 1.2 г/т полиакриламида; из полученной смеси приготовлена пульпа в соотношении Т:Ж=1:1; приготовленная смесь подавался к магнитной сепарации в непрерывном режиме с производительностью 2,0; 4,0; 6,0 литров в минуту, при этом напряженность магнитного

поля составляло 1600 -17000 эрстед.

Таблица 1.

Результаты экспериментов мокрой магнитной сепарации кека

Пробы	Наименование продукта	Fe, %	Cu, %	Mo, %	Удельный вес, т/м ³
1.	Исходный кек	9,5	1,2	4,8	1,33
2.	Магнитная фракция	26,9	0,05	0,2	1,24
3.	Отмагниченная фракция	1,8	2,4	5,2	1,41

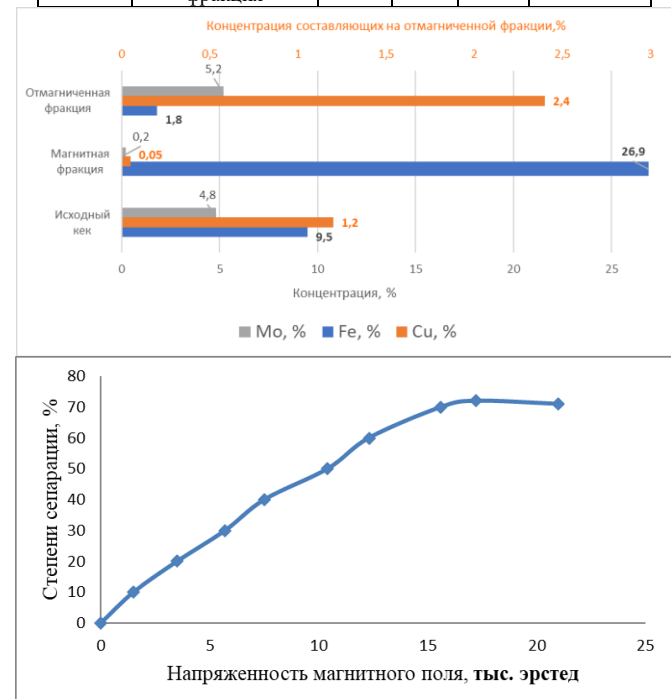


Рис.1. Зависимость степени сепарации от напряженности магнитного поля.

В результате экспериментов получена отмагниченная фракция (концентрат) содержащий до 26,6% железа. Полученный железный концентрат глубоким отстоем под воздействием ПАВ –полиакриламида отделился из раствора фильтрацией, осветленный раствор направлялся на переработку для извлечения меди. Немагнитная фракция (хвосты) содержит в (%): 5,2-Мо; 2,4-Cu; 0,011-Re; 0,4-W.

На магнитную сепарацию подают 300 мл в минуту пульпа кека при Т:Ж=1:2. Из 1000,0 гр. кека получен 30 гр. отмагниченный продукт, остальное и 70 гр. перешло в кек в хвостовой пульпе 200 мл.

В результате экспериментов получена отмагниченная фракция (концентрат) содержащий до 26,6 % железо. Полученный железный концентрат глубоким отстоем под воздействием

ПАВ – полиакриламида отделился из раствора, осветленный раствор направлялся на переработку для извлечения меди.

Таблица 2.

Материальный баланс мокрой магнитной сепарации кека

Приход		Расход	
Статья прихода	Количество	Статья расхода	Количество
Кек выщелачивания	3000 мл	Отмагниченная продукция	1000 мл
	1000 гр		300гр.
Итого	3000 мл	Хвост	2000 мл
	1000 гр		700 гр
			3000 мл
			1000 гр.

Немагнитная фракция (хвосты) содержит в (%): 5,2 Mo; 2,4 Cu; 0,011Re; 0,4W. Полученный кек после магнитной сепарации имеет усредненный химический состав (в %): Mo-33,98; Cu-2,51; SiO₂-21,05; Fe-,73; WO₃-необ., P-0,012; As-0,015; Re-0,011; MoS₂- 0,63; Au-29,4 г/т; Ag-69,3г/т и крупность 91,0% не более 0,08 мм.

Заключение. Проведённые исследования показали, что твёрдые отходы (кеки) содового выщелачивания обожжённого молибденового промпродукта представляют собой перспективное вторичное сырьё, содержащее железо, медь, рений и благородные металлы. Определено, что основными минеральными формами

в кеке являются гидроксиды и оксиды железа, молибдаты, а также остаточные сульфидные соединения. Установленные физико-химические свойства — мелкодисперсность, слабые магнитные характеристики и удельный вес около 1,33 т/м³ — позволили применить метод мокрой магнитной сепарации для разделения компонентов.

Разработанная технология мокрой магнитной сепарации с добавлением магнетитовых частиц (0,5–0,8 %) и полиакриламида (1,0 г/т) обеспечивает получение железного концентрата с содержанием Fe до 26,6 % и одновременным снижением содержания меди и молибдена. Немагнитная фракция обогащается медью (до 2,4 %) и молибденом (до 5,2 %) и может быть направлена на дальнейшую гидрометаллургическую переработку для извлечения ценных металлов.

Таким образом, предложенный комплексный подход обеспечивает эффективное извлечение железа и меди, способствует вовлечению отходов в повторный технологический цикл и повышает экологическую и экономическую эффективность переработки молибденосодержащих промышленных отходов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Спирин, Э. К., Бубнов, В. К., Ласкорин, Б. Н., Водолазов, Л. Н., Андреев, И. Ю., Югай, А. В., Козин, О. М., & Спирин, К. Э. (1992). Общие свойства ионообменных материалов. Акмола: Издательско-полиграфическое предприятие «Жана Д’Арк».
- [2] Tolibov, V. I., Hasanov, A. S., & Pirnazarov, F. G. (2019, November 27–28). Molybdenum containing products processing in conditions of SPA RM&RA AMMC. In Proceedings of the International Conference on Integrated Innovative Development of Zarafshan Region: Achievements, Challenges and Prospects (pp. 139–143). Navoi.
- [3] Авдохин, В. М. (2006). Основы обогащения полезных ископаемых (Т. 1: Обогащительные процессы). Москва: Издательство Московского государственного горного университета.
- [4] Кармазин, В. И., & Кармазин, В. В. (1984). Магнитные и электрические методы обогащения. Москва: Недра.
- [5] Авдохин, В. М. (2008). Основы обогащения полезных ископаемых (Т. 2: Обогащительные процессы). Москва: Горная книга.
- [6] Коровин, С. С., Букин, В. И., & Федеров, П. И. и др. (2003). Редкие и рассеянные элементы (Т. 3). Москва: МИСиС.
- [7] Ватолин, Н. А., Халезов, Б. Д., Харин, Е. И., & Зеленин, Е. А. (2010). Состояние и перспективы извлечения рения из молибденовых концентратов и промпродуктов. В Фундаментальные и прикладные проблемы науки (Т. 2, сс. 132–140). Москва: РАН.