

ОПЫТНЫЕ РАБОТЫ ПО ПОДЗЕМНОМУ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЮ НИКЕЛЯ ИЗ СИЛИКАТНЫХ РУД

В. В. Свиблов,
генеральный директор,
канд. экон. наук

В. И. Гуминский,
исполнительный директор,
д-р техн. наук

В. А. Гуров,
главный технолог,
канд. техн. наук

Г. С. Гребнев,
ведущий инженер-технолог

В. С. Тагильцев,
ведущий гидрогеолог

Горнодобывающая компания «Голд»

И. А. Четверкин,
директор

Научно-производственная фирма
ООО «Мониторинг месторождений
полезных ископаемых»

К природным критериям применимости метода ПВ следует отнести: степень обводненности руд и их фильтрационные свойства, наличие непроницаемых водоупоров, минеральную форму соединений металлов (должна относительно легко вскрываться растворителем) и др. К технологическим критериям относятся возможность применения недорогого селективного растворите-

На Урале сосредоточены достаточно большие запасы силикатных никелевых руд. При этом для большинства месторождений характерны либо низкие содержания никеля в руде (0,5-1,0 %), либо небольшие запасы руд, пригодных для традиционной пирометаллургической переработки, что делает добычу и переработку руд этих месторождений обычными методами заведомо нерентабельной. Вместе с тем, достаточно давно известен метод подземного выщелачивания (ПВ) металлов из руд на месте их залегания. Метод ПВ получил широкое распространение в мире для добычи урана. В настоящее время в России этим методом ведется промышленная добыча урана (ЗАО «Далур», Курганская обл.), меди (Гумешевское месторождение, Свердловская обл.) и золота (Гагарское месторождение, Свердловская обл.). Подземное выщелачивание металлов обладает рядом достоинств, главное из которых – снижение в 2-4 раза капитальных и эксплуатационных затрат на добычу и переработку руды в сравнении с традиционными технологиями.

ля металла, наличие эффективной технологии переработки продуктивных растворов на поверхности, позволяющей извлекать металлы в товарный продукт, очищать оборотные растворы от балластных примесей и возвращать их на выщелачивание, а также некоторые другие.

В табл. 1 приведены сравнительные данные, характеризующие преимущества и недостатки трех основных способов получения никеля. Исходные данные взяты из литературных источников и современной практики. Необходимые запасы рассчитаны исходя из срока работы 20 лет.

В табл. 2 приведены сравнительные технико-экономические показатели по видам товарной продукции, которая может быть произведена при отработке Точильногорского месторождения никеля (Свердловская обл.) методом ПВ. В расчетах использованы следующие исходные дан-

ные: цена 1 т катодного никеля на Лондонской бирже металлов (ЛБМ) – 11,5 тыс. долл., 1 т кобальта – 130 тыс. долл.; цена 1 т никеля и кобальта в продуктах с содержанием 40 % принималась с дисконтом 40 % от цены на ЛБМ, в продуктах с содержанием 65–75 % – с дисконтом 20 %; цена 1 т никеля в сульфате никеля – 18 тыс. долл., 1 т кобальта в сульфате кобальта – 200 тыс. долл.; весовое соотношение Ni:Co в товарных продуктах 30:1. Исходным промпродуктом является раствор – товарный десорбат.

Промышленное подземное выщелачивание никеля не имеет аналогов в мире, поэтому исходные данные для проектирования опытно-промышленных работ на Точильногорском месторождении и основные проектные решения в настоящее время проходят многократную проверку. В качестве методической основы для технологических исследований используются разработки, применяемые

Таблица 1. Сравнительные данные, характеризующие преимущества и недостатки основных способов получения никеля

Основные переделы и показатели	Способ получения никеля и масштаб его применения		
	Пирометаллургия, мировой промышленный	Кучное выщелачивание, опытно-промышленный (Турция)	Подземное скважинное выщелачивание на месте залегания руд, опытный (Россия)
Основные переделы: ◇ вскрышные работы и добыча руды ◇ транспортирование руды ◇ дробление ◇ пирометаллургическая переработка ◇ гидрометаллургическая переработка ◇ бурение скважин	+ + + + - -	+ - + - + -	- - - - + +
Необходимые запасы металла, тыс. т	400	200	20
Необходимая добыча металла, тыс. т/год	20	10	1
Содержание никеля в руде, не менее, %	1,3	1,0	0,5
Ориентировочная себестоимость переработки, тыс. долл/т: ◇ сульфидные руды ◇ окисленные руды	8–9,5 12–15	- 8–9	- 5–6

П р и м е ч а н и е. Знак «+» обозначает наличие, знак «-» – отсутствие данного передела.

для ПВ урана как наиболее полные и многократно подтвердившие свою эффективность. Согласно принятой методике, проектирование промышленного предприятия ПВ осуществляется на основе исходных данных, полученных по этапам:

- ◆ укрупненные лабораторные опыты по фильтрационному выщелачиванию и переработке продуктивных растворов никеля;
- ◆ натурные опытные работы по выщелачиванию в горнорудном массиве;
- ◆ опытно-промышленные работы на полигоне ПВ с переработкой растворов.

В настоящее время *укрупненные лабораторные работы* подтвердили возможность извлечения никеля из руд на уровне 70–75 % раствором серной кислоты при ее расходе от 30 до 50 кг на 1 кг никеля в зависимости от режима выщелачивания. По результатам лабораторных исследований получены исходные данные для проведения натурных опытных работ, выполнен проект на опытно-промышленный полигон ПВ и разработан технологи-

Таблица 2. Сравнительные технико-экономические показатели по видам товарной продукции

Продукция	Характеристика	Переделы	Затраты по переделу в расчете на 1 т никеля/всего, тыс. долл.	Товарная стоимость в продукции, тыс. долл.		Доход в расчете на 1 т никеля, тыс. долл.
				1 т никеля	кобальта на 1 т никеля	
Товарный десорбат	Раствор: Ni – 30 г/л, Co – 1 г/л	Подземное выщелачивание – десорбция	4,7/4,7	-	-	-
Основные карбонаты никеля и кобальта, коллективный концентрат	40 % Ni 1,3 % Co	Осаждение содой	0,6/5,3	6,9	-	1,6
Закись никеля, коллективный концентрат	75 % Ni 2,5 % Co	Сушка – прокатка при 600 °С	0,4/5,7	9,2	-	3,5
Основной карбонат никеля, отдельный концентрат Основной карбонат кобальта, отдельный концентрат	40 %	Сорбционное разделение и осаждение содой	1,0/5,7	6,9	-	3,77
	40 %		0,03/5,73	-	2,6	
Закись никеля, отдельный концентрат Оксид кобальта, отдельный концентрат	75 %	Сушка – прокатка при 600–900 °С	0,5/6,2	9,2	-	6,48
	65 %		0,02/6,22	-	3,5	
Катодный никель	99,98 %	Электролиз с нерастворимыми анодами	3,0/8,3	11,5	-	3,2
Сульфат никеля Сульфат кобальта	Чистая соль по ГОСТУ Чистая соль по ГОСТУ	Сорбционная очистка, выпарка	5,0/9,7 5,2/9,9	18 -	- 6,0	14,1

ческий регламент на опытно-промышленную установку переработки продуктивных растворов ПВ по гидратно-сорбционной схеме, с получением готовой продукции – основного карбоната никеля.

В ходе исследований установлено, что, начиная с минимальной промышленной концентрации никеля в продуктивных растворах около 1 г/л, достигается максимальная емкость ионообменной смолы, рекомендованной к использованию согласно регламенту.

При разработке технологического регламента по переработке продуктивных растворов никеля обнаружено, что эти растворы всегда содержат кобальт с постоянным соотношением к никелю примерно 1000:34 мг/л. При этом кобальт извлекается в концентрат с теми же параметрами, что и никель. Другими словами, на каждую тонну никеля в концентрат извлекается 34 кг кобальта. Если выделить кобальт в отдельный концентрат, то при годовом выпуске 1500 т никеля возможен попутный выпуск 50 т кобальта. Если учесть, что ценовое соотношение между никелем и кобальтом составляет примерно 1:10, а массовое соотношение – 30:1, то получение, например, 1500 т никеля даст попутную добычу в стоимостном выражении еще 500 т никеля.

В связи с этим были проведены укрупненные лабораторные опыты по сорбционному разделению никеля и кобальта из концентрированных десорбатов (30 г/л никеля и 1,02 г/л кобальта). В результате опытов установлено, что кобальт извлекается из коллективного раствора на 99 % в отдельный 40 %-ный концентрат. В свою очередь, раствор сульфата никеля хорошо очищается от примесей. Так, очищенный в процессе опытов на ионообменной смоле раствор сульфата никеля по соотношению никеля и примесей значительно превосходил по качеству стандартные требования (ГОСТ 2665–85 на сульфат никеля для аккумуляторной промышленности марки НС-1). Выделение из такого раствора товарной соли технологически не представляет

трудностей, при этом содержание примесей в ней только уменьшится. В настоящее время продолжают исследования по сорбционной очистке и получению товарной соли сульфата кобальта. Можно утверждать, что существует реальная возможность промышленного получения части никеля и кобальта в виде товарных солей, в которых стоимость металлов примерно вдвое превышает стоимость соответствующих товарных катодных металлов.

Разрабатываемая авторами схема сорбционная схема разделения никеля и кобальта и выделения их в виде товарных солей технологически значительно проще и экономичнее традиционной, связанной с хлорированием и многоступенчатой очисткой осаждением и фильтрованием, что в 2–3 раза сокращает капитальные и эксплуатационные затраты на этот передел. Таким образом, проводимые исследования показывают возможность весьма существенно увеличения доходности проекта при прочих равных условиях.

Натурные опытные работы и проектирование опытно-промышленных работ проводились Горнодобывающей компанией «Голд» в рамках Геологического задания на проведение разведочных работ в пределах Точильногорского месторождения силикатно-никелевых руд, выданного 03.08.2007 г. региональным агентством по недропользованию по Уральскому ФО на основании лицензии № СВЕ 02362 ТР, полученной ГК «Голд» 19.06.2007 г. на геологическое изучение, разведку и добычу силикатно-никелевых руд Точильногорского месторождения. Специалистами ГК «Голд» был разработан, а департаментом по недропользованию по Уральскому ФО 10.11.2007 г. согласован проект на проведение разведочных и оценочных работ на участке недр Точильногорского месторождения, имеющем статус горного отвода.

Целью опытных работ являлось технологическое опробование процесса подземного выщелачивания никеля из силикатных руд раствором серной кислоты в натуральных условиях Точильногорского месторождения.

Задачей опытных работ являлась проверка и обоснование возможности проведения опытно-промышленных работ на месторождении по отработке его методом ПВ сернокислыми растворами. Основным показателем процесса служила возможность получения промышленных концентраций никеля (около 1 г/л) в откачных продуктивных растворах, а также динамика его извлечения в раствор в начальный период процесса ПВ в сравнении с укрупненными лабораторными опытами. Кроме того, задачей опытных работ было определение ориентировочного ореола растекания продуктивных растворов в недрах за контур опытной ячейки и изучение управляемости процесса растекания растворов при изменении параметров откачки и закачки.

Отдельно был проведен экологический двухскважинный (дуплетный) опыт вне зоны влияния опытной ячейки (на расстоянии около 100 м от нее) с целью определения миграционных параметров песчаноглинистой коры выветривания и скального субстрата и количественной оценки на этой основе влияния способа ПВ на подземные и поверхностные водные объекты.

По минеральному и химическому составу руды Точильногорского месторождения относятся к трем типам – окисленные, полуокисленные и слабоокисленные. Окисленные руды приурочены к верхней части залежей и имеют подчиненное значение (8–10 % запасов). Им присуще полное замещение исходных минералов серпентинита оксидами и гидроксидами железа, кремнистыми образованиями, тальком и нонтронитом. Для их химического состава характерно повышенное содержание трехвалентного железа, кремнезема и низкое – магния. В гранулометрическом составе резко преобладают частицы алевритистой размерности. В залегающих ниже полуокисленных рудах, являющихся основными на месторождении (85–90 % запасов), присутствуют как новообразованные (оксиды и гидроксиды железа, кремнистые образования, тальк, нонтронит, гарниерит), так и пер-

вичные, лишь гидратированные (антгорит), минералы. В химическом составе это выражается в примерно равном содержании трехвалентного железа и магния. По гранулометрическому составу руды представлены частицами песчано-глинистой и дресвяно-песчано-глинистой размерности. Содержание глинисто-алевритистых частиц изменяется от 30 до 50 %. Слабо окисленные руды (3–5 % запасов) залегают в нижней части коры выветривания, в так называемой зоне выщелачивания. Гранулометрический состав руд преимущественно дресвяно-щебнистый и щебнистый, на отдельных участках с примесью глинисто-алевритистой фракции (до 10–30 %).

Глубина залегания подошвы залежей на месторождении изменяется в пределах 45–80 м, кровли – 22–33 м, мощность залежей – 22–48 м. Уровень грунтовых вод расположен в среднем на глубине 33 м.

На месторождении проведена детальная разведка. Для натуральных опытных работ выбрана представительная опытная ячейка (рис. 1) в форме квадрата 7,1×7,1 м, в углах которого оборудование вскрыто четырьмя закачными скважинами (№ 4; 5; 6; 7) и одной откачной скважиной в центре (№ 1). Откачная скважина вскрывает своей фильтровой частью весь рудный интервал (21 м), фильтры закачных скважин – 10 м верхней части рудения, чтобы направить выщелачивающие растворы не только по простиранию руды, но и сверху вниз по мощности. За контуром ячейки сооружены две наблюдательные скважины: № 11н – на расстоянии 5 м и № 12н – на расстоянии 7 м от контура. Фильтры наблюдательных скважин вскрывают весь рудный интервал.

Опытной ячейкой вскрыты только два типа руд: окисленные (доля – 28 % общей массы) и полуокисленные (72 %), поскольку залегающие ниже слабоокисленные руды имеют (по данным расходомерии) аномально повышенную водопроницаемость и, кроме того, их доля в запасах, как уже указывалось ранее, весьма невелика. Заключенные в контуре опытной ячейки 1312 т горнорудной

массы имеют среднее содержание никеля 0,74 %. Усредненный химический состав руд опытной ячейки приведен в табл. 3.

Опыт проводился в замкнутом цикле оборотных растворов, без их переработки или сброса в недра за контур ячейки, что было продиктовано экологическими и экономическими соображениями. Опыт имел целью отработать только начальный период процесса ПВ – до получения промышленных концентраций никеля. Продолжение выщелачивания в замкнутом циркуляционном режиме привело бы к искажению реальной динамики процесса и технико-эконо-

мических показателей из-за прогрессирующего накопления макропримесей (Fe, Mg и Al), мешающего извлечению никеля.

Вначале проводилась настройка оборотного цикла на грунтовой воде с балансом откачных и закачных растворов при подаче 2 м³/ч. При этом подземная вода откачивалась из откачной скважины № 1 погружным насосом 1 в буферную емкость 2 через щелевой расходомер 3. Из буферной емкости вода самотеком равномерно (по 0,5 м³/ч) распределялась по четырем закачным скважинам с помощью запорной арматуры и щелевых расходомеров. Работа на оборотной

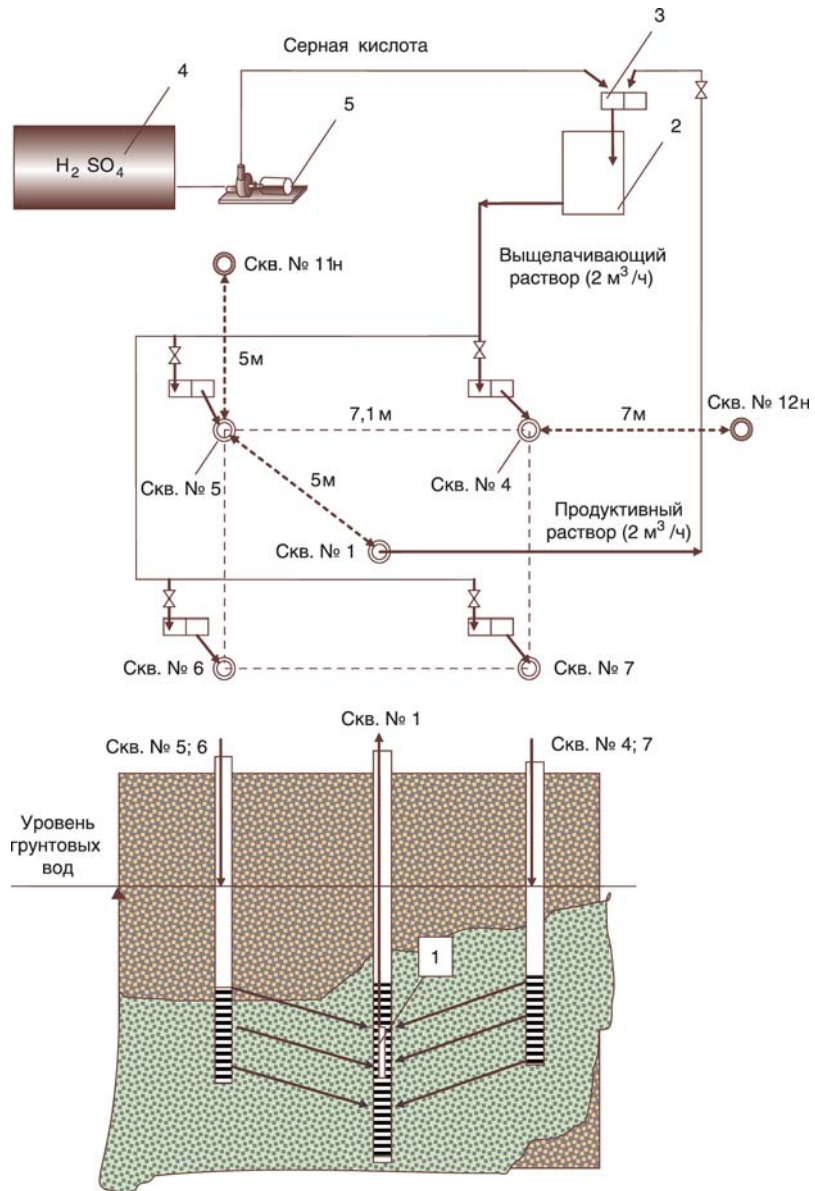


Рис. 1. Опытная ячейка ПВ в плане (вверху) и разрезе (внизу) и применяемая технологическая схема

Таблица 3. Химический состав руд опытной ячейки, %

Компоненты	Окисленные руды	Полуокисленные руды
K ₂ O	0,02	0,03
Na ₂ O	0,03	0,04
SiO ₂	54,12	64,17
TiO ₂	0,04	0,07
Al ₂ O ₃	1,32	2,49
Cr ₂ O ₃	0,69	0,63
Fe ₂ O ₃	29,99	12,39
FeO	0,48	0,53
CaO	0,44	0,33
MgO	3,73	9,55
MnO	0,70	0,36
Ni	0,79	0,73
Co	0,031	0,016
CO ₂	0,14	0,27
Cu	<0,05	<0,05
п.п.п.	7,24	8,19

воде продолжалась в течение 2 сут. В это время проводилась настройка работы всего оборудования, отслеживались динамические уровни в скважинах, а также отбирались пробы грунтовой воды на химический анализ.

Исходными данными для технологического режима выщелачивания послужили результаты укрупненного лабораторного опробования рудных керновых проб (навески по 18–50 кг) в фильтрационном режиме выщелачивания. Наилучшие показатели получены при выщелачивании руд растворами со средней концентрацией серной кислоты 50–55 г/л. При извлечении никеля 70–75 % из руды с исходным его содержанием 0,73 % расход кислоты составил 30–32 кг на 1 кг никеля, средняя концентрация никеля в растворах – 1,7 г/л, отношение Ж:Т – 3:1. Промышленные концентрации никеля в продуктивных растворах (1 г/л и выше) появляются при расходе кислоты 50–60 кг на 1 т руды через 14–16 сут. На опытной ячейке поддерживался режим выщелачивания, определенный лабораторными опытами.

После стабилизации обратного цикла началась подача в выщелачи-

вающий раствор серной кислоты. Серная кислота из сборника 4 дозировочным мембранным насосом 5 подавалась в щелевой расходомер 3, куда одновременно поступал раствор с откачной скважины с расходом 2 м³/ч. Дозировка серной кислоты настраивалась опытным путем и каждые два часа контролировалась анализом на кислотность на выходе из буферной емкости 2. Откачной раствор ежедневно анализировался на содержание Ni, Mg, Fe, с определением рН и кислотности. После доукрепления серной кислотой раствор равномерно распределялся по закачным скважинам.

Динамика извлечения никеля в раствор показала (рис. 2), что при расходе 2 м³/ч (0,036 отношения Ж:Т в сутки) и средней концентрации серной кислоты в выщелачивающем растворе 50–55 г/л через 12 сут концентрация никеля в продуктивном растворе достигла 939 мг/л. Полученные данные на этот момент практически полностью соответствуют динамике извлечения никеля в укрупненных лабораторных опытах. Концентрация никеля в наблюдательной скважине № 11н на расстоянии 5 м от контура опытной ячейки выросла до 446 мг/л, на расстоянии 7 м – в скважине № 12н – изменения

химического состава подземных вод на этот момент не обнаружено. Кратковременный переход (на 4 сут) на подачу 4 м³/ч (0,073 отношения Ж:Т в сутки) привел к увеличению контура растекания и разубоживания продуктивных растворов: в откачном растворе концентрация никеля постепенно снизилась до 801 мг/л, в 5 м от контура – до 264 мг/л, а в 7 м от него через 10 сут появились никель и магний в количестве 3,6 и 70 мг/л соответственно. Возврат к подаче 2 м³/ч постепенно (через 6 сут) привел к увеличению содержания никеля в откачном растворе до 1074 мг/л. После прекращения подачи кислоты в течение последующих 10 сут концентрация никеля колебалась в интервале 970–1104 мг/л. Поведение основных макропримесей (Fe и Mg) четко коррелирует с изменением концентрации никеля в растворе. Эти данные свидетельствуют о хорошей управляемости процесса ПВ как с технологической точки зрения, так и с позиции экологического контроля и защиты окружающей среды вне лицензионной площади месторождения.

Другие показатели опытных работ также полностью соответствуют данным лабораторных опытов: при общем расходе серной кислоты 77 т

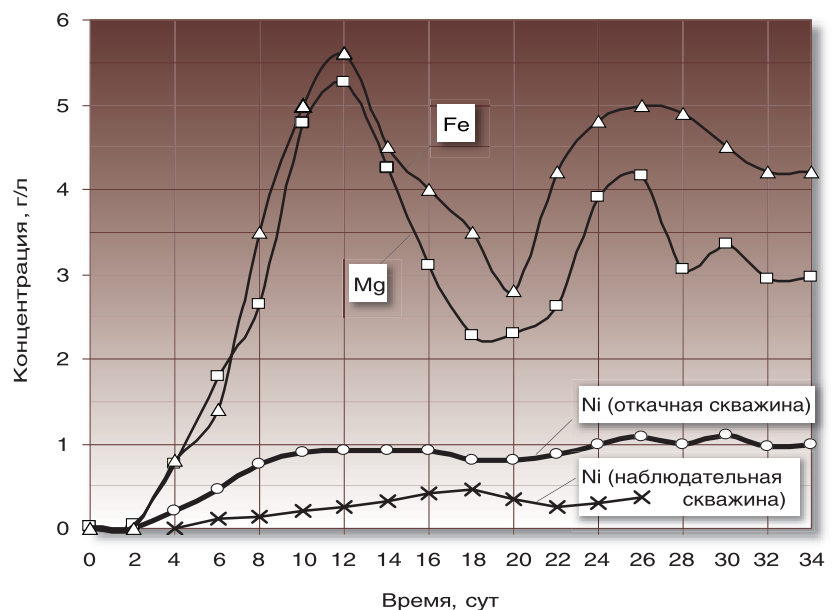


Рис. 2. Динамика изменения концентраций никеля и примесей в продуктивном растворе

и отношении Ж:Т=1,023:1 удельный расход кислоты составил 57,3 кг на 1 т руды, а средняя ее концентрация в выщелачивающем растворе – 56 г/л. По предварительным подсчетам, с учетом законтурного растекания объем продуктивных растворов составил около 2370 м³ со средней концентрацией никеля 750 г/м³. В раствор переведено 1777 кг никеля с извлечением его из руды 18,3 %.

Для экологического опыта были выбраны две скважины (закачная и откачная), расположенные на расстоянии 14 м друг от друга и вскрывающие как песчано-глинистую кору, так и зону дезинтеграции, представленную дресвяно-щебнистыми отложениями. В качестве инертного индикатора использовался раствор NaCl с концентрацией 2 г/л, в качестве активного реагента – раствор серной кислоты с концентрацией на различных этапах опыта от 5 до 10 г/л. Опыт проводился с постоянным дебитом откачки-закачки, равным 0,4 л/с (1,44 м³/ч). Появление соли (хлоридов) зафиксировано в откачной скважине через 5 сут. Фактическая скорость распространения инертных индикаторов в водоносном горизонте с учетом созданного гидродинамического градиента, равного 1,17, составила 3,28 м/сут. Скорость распространения рН-зависимых компонентов в 5–7 раз меньше. При дуплетном опробовании зафиксировано снижение значения рН на 0,65 ед. (с 7,8 до 7,15) только на 22-е сутки опыта. Способ ПВ не нарушает гидродинамический режим, на месторождении в целом объем откачки растворов равен объему закачки, поэтому растекание продуктивных растворов за пределами опытного полигона возникает за счет естественного гидродинамического градиента. На Точильногорском месторождении

из-за приводораздельного положения участка и большой зоны аэрации гидродинамический градиент в сторону р. Каменки составляет всего 0,008. При этом миграция консервативных компонентов (ион магния и сульфат-ион) по ленте тока за три года опытно-промышленных испытаний не превысит 30 м. За счет высокой реагентоемкости пород за три года зона кислых вод сместится от края полигона вниз по потоку всего на 5–6 м.

На основании результатов технологических и экологических опытов, проведенных в натуральных условиях Точильногорского месторождения, можно сделать следующие выводы:

- ◆ при расстоянии пути фильтрации растворов по кратчайшим линиям тока – 5 м за 26–30 сут получены промышленные концентрации никеля в продуктивных растворах на уровне 0,97–1,1 г/л;

- ◆ динамика извлечения никеля в раствор практически полностью соответствует аналогичной динамике в укрупненных лабораторных работах в начальный период выщелачивания;

- ◆ ореол растекания продуктивных растворов за контур опытной ячейки при расходе 2 м³/ч не превышает 5 м. Кратковременное увеличение расхода до 4 м³/ч показало практически пропорциональное разбавление законтурных растворов и распространение ореола растекания до 7 м. Возврат к исходному расходу вернул ореол растекания в прежние границы, что свидетельствует о хорошей управляемости процесса ПВ с точки зрения экологического контроля и защиты окружающей среды вне лицензионной площади месторождения;

- ◆ благодаря высокой кислотоемкости руд и вмещающих пород нейт-

рализация кислых продуктивных растворов в недрах происходит уже на расстоянии до 6 м от закачных скважин;

- ◆ скорость распространения консервативных элементов (ионы магния и сульфат-ионы) составит всего 0,026 м/сут, поэтому их распространение по ленте тока за время опытно-промышленных работ (три года) не превысит 30 м;

- ◆ по регламентируемой схеме предела продуктивных растворов с образованием гипсогидратов, содержащих большое количество воды, работа полигона ПВ в период работы цеха переработки будет протекать с дебалансом растворов в сторону откачки, поэтому растекание в недрах экологически вредных элементов в сторону нелицензионной площади месторождения полностью исключается.

Результаты опытных работ на полигоне ПВ и разработанная авторами в укрупненных лабораторных условиях технологическая гидратно-сорбционная схема переработки продуктивных растворов ПВ с выделением отдельных концентратов никеля (не менее 75 %) и кобальта (не менее 40 %), а также получения товарного сульфата никеля для аккумуляторной промышленности могут послужить основой строительства цеха переработки и перехода к полному комплексу опытно-промышленных работ с получением 1500 т никеля в год. Себестоимость 1 т никеля ориентировочно составит 5700 долл. США, что является высокорентабельным даже в условиях резкого снижения мировой цены на никель. ■■■

Key words: nickel, silicate ores, in-situ leaching, pilot project, Tochilnogorskoe deposit, pilot cell, ecology