ЭКОНОМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБОГАЩЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГОРНОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

А.В. Конев[1], К.А. Шульгина[2], Ж.В. Миронова[2],
Л.Н. Кузина[2], С.Ф. Богдановская[2]

[1]ОАО «СИБЦВЕТМЕТНИИПРОЕКТ», г. Красноярск, Россия
[2]ВГАОУ ВПО СФУ, г. Красноярск, Россия

России достался в наследство фрагмент горно-металлургического комплекса (ГМК) СССР, сложившегося исторически в нерыночных условиях, с разорванными технологическими циклами и производственными связями, с обогатительными мощностями в Сибири и на Дальнем Востоке. Тогда как одна часть металлургических производств осталась в бывших союзных республиках Центральной Азии, на Украине и в Прибалтике, другая часть располагается на Урале. В силу ведомственной принадлежности в СССР предприятия ГМК извлекали из перерабатываемого сырья только те металлы, что обеспечивали потребности своей отрасли. Другие полезные компоненты складировались или сбрасывались в отвал, что приводило, к безвозвратным потерям ценных металлов, к ухудшению экологической обстановки на прилегающих территориях, к нерациональному использованию сырья и как результат к дополнительным затратам.

Это обстоятельство наряду с низким качеством, высокой металло- и энергоемкостью применяемых машин и оборудования (удельный расход материальных ресурсов на тонну перерабатываемой руды выше мирового уровня: по электроэнергии – на 30 %; по флотационным реагентам – в 2 ÷ 3 раза; по износу металла в футеровках, мелющих телах и транспортных материалах – в 2,5 раза выше), производительностью обогатительных фабрик (ОФ) в 3 ÷ 5 раза ниже мирового уровня из-за низкой степени автоматизации, определяют высокую долю энергетических и транспортных затрат, оплаты труда в себестоимости производства.

Основу минерально-сырьевой базы (МСБ) цветной металлургии России составляют месторождения со значительными запасами преимущественно рядовых и бедных, труднообогатимых, залегающих на значительных глубинах со сложными горно-геологическими и горнотехническими условиями добычи. Их кондиционные части, окруженные на 50 ÷ 80 % породой и забалансовой рудой, стали пассивными на 20 ÷ 80 % вследствие изменения в 90-ых годах прошлого столетия экономических, правовых и экологических условий освоения.

Переоценка запасов с учетом мировых цен на металлы показывает, что в категорию забалансовых в ближайшей перспективе перейдет от 30 до 50 % свинцовых и оловянных, от 15 до 30 % титановых, медных и вольфрамовых руд. Доля таковых в обогащаемом сырье возросла за последние 20 - 25 лет с 15 до 40 %, содержание цветных металлов и золота в них снизилось в 1,2 ÷ 1,5 раза, что связано с более широким применением добычи открытым способом, дешевых массовых способов отбойки, высокопроизводительной горной техники, затрудняющих селективную выемку [1].

Снижение кондиций сопровождается увеличением доли в сырье комплексных руд с вредными примесями, мелковкрапленных, с субмикрозернистой структурой, возможности рентабельной переработки которых с применением технологий глубокого обогащения практически исчерпаны. Полезные минеральные агрегаты таких руд раскрываются селективно на отдельные фазы только измельчением до крупности - 50 + 5 мкм, где значительная часть энергии процесса расходуется не на раскалывание, а на пластическую деформацию, ухудшающую физико-химические свойства поверхности минеральных

частиц [2], на использовании которых основано обогащение флотацией, снижает эффективность работы мельниц. Недоизмельчение таких руд приводит к потерям до 30 – 40 % полезного компонента в сростках с минералами пород в хвостах. Переизмельчение – со шламами в виде наиболее мелких частиц, снижаемых заменой традиционных щековых и конусных дробилок, шаровых мельниц на селективную дезинтеграцию в инерционных дробилках, мельницах динамичного самоизмельчения, газоструйных и пружинных мельницах для сверхтонкого измельчения.

Таким образом, обеднение и ухудшение качества руд стимулирует применение все более сложных схем измельчения и обогащения, новых видов оборудования и реагентов, вследствие чего растет себестоимость извлечения, опережая динамику роста рыночных цен на конечную продукцию (концентраты, металлы, их соединения), снижая конкурентоспособность и инвестиционную привлекательность, создавая сырьевой и экономический барьеры развитию ГМК.

Решением данных проблем является перевооружение ГМК с изменением схемы переработки руд. Оно позволит извлекать в концентрат легкообогащаемую часть полезных минералов, а нераскрытые агрегаты в виде бедного концентрата либо промпродукта направлять в химико-металлургический передел, что обеспечивает комплексное использование сырья, получение металлов и химических соединений с высоким сквозным извлечением, но ведет к удорожанию товарной продукции [1].

Экономический барьер широкого применения химико-металлургических технологий устраняется снижением издержек на стадиях разведки, отбойки, транспортировки и глубокого обогащения руд, в том числе за счет применения предварительного обогащения (ПО). Последнее позволит механически разделить горную массу на отвальную породу, забалансовую руду и продукт с повышенной концентрацией полезных компонентов, поскольку основано на использовании зависимости между содержанием и физическими свойствами частиц (кусков или порций) [3-5].

Технологической целью ПО является выделение в отвальный продукт полиминеральных кусков (частиц) разубоживающей массы (породы и части забалансовых руд) крупностью – 300 + 1 мм с допустимыми потерями полезного компонента. Экономической – снижение эксплуатационных затрат на переработку руды, повышение объемов переработки руды за счет части выделенной породы без наращивания обогатительных и металлургических мощностей. Организационно-управленческой – создание дополнительных механизмов обеспечения устойчивого функционирования ГМК в условиях неопределенности с запасами, изменяющейся рыночной конъюнктуры на реагенты, машины и оборудование, изменения цен на конечную продукцию [4-7].

Наиболее благоприятной сферой для внедрения предварительного обогащения является на данный момент золотодобывающая отрасль.

Несмотря на тренд снижения кондиций и качества сырья, производство золота в России растет, обеспечивая стране на протяжении последних двух лет при относительно небольшом отставании от Австралии и США четвертое место в мире (Таблица 1) [13].

Таблица 1

Динамика добычи золота по годам, тонн [14, 15]

№/№ п/п	Страна	2009	2010	2011	2012
1	Китай	300	330	355	379
2	Австралия	220	223	270	266
3	США	210	214	237	227
4	Россия	185	181	200	216
5	ЮАР	212	222	190	170
6	Перу	175	180	150	165
7	Канада	100	95	110	102

8	Индонезия	98	146	100	95
9	Гана	83	87	100	89
10	Узбекистан	77	74	90	90
11	Папуа-Новая Гвинея	67	68	70	60
12	Прочие	857	889	940	841
	Итого	2584	2709	2812	2700

Как видно из данных, приведенных в таблице, устойчивый прирост производства золота наблюдается в Китае, Австралии, России и Узбекистане, сохранение объемов либо снижение золотодобычи – в США, ЮАР, Перу, Канаде, Индонезии и еще нескольких десятках стран мира. При такой динамике России вполне реально продвинуться выше и приблизиться к Китаю по уровню производства в исторически обозримые сроки, для чего имеется ресурсная база.

В России лидирующими регионами в золотодобыче являются Красноярский край, Дальний Восток (Амурская область, Чукотский АО и Хабаровский край) и Республика Саха (Якутия) [16].

Основными направлениями развития золотодобывающей промышленности России являются:

- расширение МСБ золота за счет увеличения объемов геологоразведочных работ, перевода прогнозных запасов в промышленные, освоение новых месторождений, увеличение объемов добычи и извлечения с применением действующих технологий;
- более рациональное использование разведанных запасов, переоценка кондиций отрабатываемых месторождений, вовлечение в переработку бедных и убогих, забалансовых, комплексных руд, с применением дешевых массовых способов отбойки и выемки, предварительного обогащения и химико-металлургических технологий извлечения из них золота и других полезных компонентов (интенсивный путь).

Анализ литературных данных показывает, что производственная и инвестиционная политики золотодобывающих компаний формируется под воздействием экзогенных рыночных (цены, спрос и предложение) и эндогенных отраслевых факторов (количество и качество месторождений, фискальные условия и правила недропользования, производственные и геологоразведочные стратегии золотодобывающих предприятий и т.д.).

Политика крупнейших зарубежных золотодобывающих компаний, действующих в статусе глобальных корпораций по всему миру, заключается в эксплуатации одного или нескольких крупнотоннажных месторождений с запасами золота не менее 400-500 тонн. Средние компании с объемом добычи до 10 тонн в год также способны вести транснациональную деятельность, но на менее крупных объектах.

Компании придерживаются стратегии диверсификации добычных активов, с перераспределением нагрузки на месторождения в зависимости от рыночной цены на золото: при падении цены – отрабатывают богатые руды и за счет этого при минимальных объемах переработки поддерживают либо даже увеличивают добычу металла. При необходимости снизить удельные капитальные и эксплуатационные затраты сворачивают геологоразведочные и добычные работы на низко- и нерентабельных месторождениях, наращивают добычу золота на месторождениях в странах с дешёвой рабочей силой (Китай, Индонезия, Гана, Латинская Америка) и т.д. При увеличении цены отрабатывают более бедные руды, что позволяет нивелировать колебания цены, сохранить уровень доходности на примерно одном уровне, хотя это и приводит к росту срока отработки месторождений.

Для снижения среднеотраслевых издержек производства золота и увеличения общей рентабельности практикуется стратегия вовлечения в отработку новых месторождений, издержки на которых, как правило, ниже, чем на эксплуатируемых объектах. С другой стороны установлена корреляция: наращивание запасов - падение

цены. Это можно объяснить тем, что прирост запасов увеличивает вероятность поступления в перспективе на рынок большего объема металла. Поэтому для конкурентного рынка наилучшее состояние – статус-кво, хотя мировая золотодобыча имеет признаки и конкуренции и олигополии, но в целом мировые лидеры стараются придерживаться консервативной стратегии в части наращивания объемов производства золота и портфеля рентабельных активов (месторождений).

Прибыль, полученная за счет эксплуатации крупных месторождений, позволяет компаниям финансировать разведку и подготовку к промышленному освоению новых месторождений по схеме PEIP (profit-exploration-investment-profit).

Таким образом, инвестиционная активность в зарубежной золотодобывающей отрасли развивается вне зависимости от среднесрочных цен на золото, поскольку временной разрыв между капитальными вложениями и их окупаемостью не гарантирует поддержание определенного уровня цен в будущем. Поэтому при прогнозировании золотодобычи, при планировании инвестиционных вложений цену реализации продукции оценивают консервативно, а в ТЭО проектов освоения новых месторождений закладывают минимальную цену, что позволяет инвестору минимизировать риски изменения цены и считать проект рентабельным в период его реализации [9].

Исходя из обстоятельств и тенденций развития мировой экономики в целом, золотодобывающей промышленности в частности, учитывая сложности доступа отечественных компаний к зарубежным крупнотоннажным месторождениям, распределенности таковых в России между крупными компаниями, объективную оценку состояния отечественной МСБ, представляется жизненно необходимым осуществить в ближайшие годы техническое перевооружение отечественной золотодобывающей отрасли с применением новых технологий и инвестиционных инструментов их внедрения, в том числе экономического моделирования в целях снижения рисков применения инноваций, среди которых наиболее перспективной представляется предварительное обогащение.

ПО не нашло до настоящего времени широкого применения несмотря на наличие комплекса разнообразных, взаимно дополняющих методов и средств, лишь частично используемых для переработки материалов крупностью -20+1 мм обогащением в тяжелых суспензиях, отсадкой, концентрированием на центробежных принципах, магнитной, электростатической и воздушной сепарацией.

Использование водных и специальных сред принуждает размещать комплексы ПО рядом или в составе обогатительных фабрик, тогда как для снижения транспортных и утилизационных издержек целесообразнее приближать их к рудникам, чему в максимальной степени соответствуют радиометрические методы сухого обогащения (РМО), в том числе наиболее универсальные из них рентгенорадиометрическая порционная сортировка и кусковая сепарация [17-22]. Применение последней для материала крупностью менее 20 мм осложняется ростом эксплуатационных затрат из-за снижения производительности, высокой единичной стоимости установок и расходных комплектующих к ним.

Таким образом, РМО и ранее наработанные методы и средства ПО взаимно дополняют друг друга, не конкурируя в одном классе крупности перерабатываемых материалов. Масштабному промышленному ПО препятствует, однако, недостаточный уровень развития теории и методологии, инструментов ведения НИР, разработки технологических регламентов и ТЭО инвестиций в строительство фабрик предварительного обогащения (ФПО).

В работах [6,7] авторами предложена методика аналитической оценки относительной экономической эффективности применения ПО на действующих предприятиях, не позволяющая однако оценить абсолютные масштабы капитальных и эксплуатационных затрат на ПО, в сравнении с аналогичными параметрами по горной и перерабатывающим стадиям горно-металлургического предприятия.

Данная задача решается расчетным моделированием условий работы ФПО в структуре ряда золотодобывающих предприятий Красноярского края с существенно различающимися параметрами по геологии, условиям добычи сырья и объемам его переработки в течение года. Например, ЗАО «Васильевский рудник» (Мотыгинский район) – около 1000 тыс. т.; ООО "Соврудник" – 3000 тыс. т. и ЗАО «Полюс» (Северо-Енисейский район) – 10000 тыс.т.

При расчетах учитываются геологические характеристики руд отрабатываемых месторождений, применяемые технологии добычи и переработки, основные показатели работы предприятий по горным, обогатительным и химико-металлургическим переделам.

Предлагаемая методика моделирования позволяет выбрать оптимальный метод или комбинацию методов ПО с учетом природных особенностей перерабатываемых руд, оценить изменения основных технико-экономических показателей предприятия, изменение структуры себестоимости металла по переделам, пересмотреть требования к горному производству в части изменения показателей качества отгружаемого минерального сырья с учетом предварительного обогащения, перераспределить объемы производства по переделам в соответствии с новыми требованиями. Для построения модели необходимы результаты анализа изменения технологических показателей стадии глубокого обогащения (гравитационных и флотационных методов), химико-металлургическая переработка руд, подвергшихся предварительному обогащению.

В рамках моделирования решаются следующие задачи:

1) Анализ эксплуатационных затрат по горному, обогатительному и металлургическому переделам без применения предварительного обогащения.

2) Определение необходимого состава, количества оборудования и объемов инвестиций в соответствие с технологическими схемами для строительства ФПО с объемами переработки руды до 1 , 3 и 10 млн. тонн соответственно. Это позволит учесть влияние масштаба производства на основные технико-экономические показатели работы предприятия с внедрением комплекса методов и средств предварительного обогащения, технологию избирательного дробления - грохочения.

3) Определение эксплуатационных затрат на переработку руд трех классов крупности после крупного и среднего дробления с шагом в 10 % по доле каждого из них в общем рудопотоке, с применением разных методов предварительного обогащения по каждому из классу, с учетом выхода пустой породы и промпродукта ПО.

Методикой моделирования предусматривается также возможность оценки применения технологии кучного выщелачивания для хвостов и промпродуктов ПО.

4) Моделирование эксплуатационных затрат по горному, обогатительному и металлургическому переделам с учетом перспективы применения предварительного обогащения по разным классам крупности с шагом 10 %, а также в зависимости от выхода пустой породы.

5) Оценка эффективности применения предварительного обогащения при различных сочетаниях используемых методов для не менее чем трех вариантов гранулометрического состава руды и выхода хвостов ПО.

Модель предусматривает оценку влияния на экономику всех возможных вариантов сочетания действия основных факторов с шагом изменения их значений в 10 %. Варианты одновременного проявления максимальных и минимальных значений факторов не рассматривались как маловероятные события.

6) Анализ последствий применения ПО в части изменения производственной нагрузки по переделам: снижения объемов переработки на глубоком обогащении от 30 % до 90 %, увеличения тем самым объемов горной добычи на соответствующий процент, более широкое применение массовых способов отбойки, возможности пересмотра ТЭО кондиций месторождений, вовлечения в отработку запасов бедных и забалансовых руд.

7) Оценка экологических последствий применения предварительного обогащения в результате вовлечения в разработку больших объемов горной массы, повышения

негативного воздействия на атмосферу (пыль буровзрывных работ, выхлопные газы от машин и оборудования), литосферу (нарушение почвенно-растительного слоя, образование выработанного пространства, отвалов вскрышных пород), гидросферу (осушение добычных горизонтов, водоотводные работы, загрязнение карьерными водами водоносных горизонтов), биосферу (нарушение или уничтожение среды обитание животных и растений, шумовое и вибрационное загрязнение, снижение качества окружающей среды).

На горный передел приходится значительная доля экологического ущерба (гранулометрический состав отходов горного передела -350+1мм с содержанием класса -20+1 не более 30-50 %). Однако, еще большее значение имеет снижение объемов переработки минерального сырья глубоким обогащением и химико-металлургическими технологиями с образованием мелкодисперсных отходов (гранулометрический состав -1+0,005 мм), включающих остатки флотационных реагентов, цианидов, используемых в металлургическом переделе для выщелачивания золота, сбросные шламы и технологические воды.

Полученные на данный момент результаты однозначно показывают, что удельные капитальные и эксплуатационные затраты на внедрение ПО не превышают 3-5 % от соответствующих затрат по горной части или перерабатывающему производству действующих горно-металлургических предприятий. Основная проблема с внедрением ПО заключается в разработке технологии, обеспечивающей минимальные приемлемые потери полезного компонента с отвальными хвостами, относительно невысокая производительность установок и их надежность, не проверенная долговременной практикой широкого промышленного применения.

Литература

1. Чантурия В.А. Современные проблемы обогащения минерального сырья в России. Вестник ОГГГГН РАН, № 4 (6), 1998, 17 с.
2. Ходаков Г.С. Физика измельчения // М.: Наука, 1972, 308 с.
3. Требования к изучению радиометрической обогатимости минерального сырья при разведке месторождений металлических и неметаллических полезных ископаемых» // Москва, ГКЗ, 1993, 26 с.
4. Конев А.В., Шульгина К.А., Миронова Ж.В. Проблемы переработки руд цветных металлов и золота с предварительным обогащением. – Сб. научн. статей Пятого международного конгресса «Цветные металлы – 2013». – Красноярск: Версо, 2013, с. 78-82.
5. Конев А.В., Киселева С.П., Штреслер К.А., Миронова Ж.В. Проблемы отработки месторождений руд цветных металлов и золота с предварительным обогащением. – Записки горного института, С-Петербург, 2013, т. 205, с. 179-184.
6. Конев А.В., Шульгина К.А., Миронова Ж.В. Повышение конкурентоспособности отечественной цветной металлургии с использованием предварительного обогащения. – Сб. научн. статей Пятого международного конгресса «Цветные металлы – 2013». – Красноярск: Версо, 2013, с. 675-679.
7. Штреслер К.А., Миронова Ж.В., Конев А.В., Киселева С.П. Повышение инвестиционного потенциала месторождений руд цветных металлов и золота предварительным обогащением. – Записки горного института, С-Петербург, 2013, т. 205, с. 280-284.
8. Союз золотопромышленников. Результаты работы отрасли за 2012 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: goldminingunion.ru (дата обращения 07.10.2013).
9. Самсонов Н.Ю. Взаимосвязь запасов золота с экономическими показателями добычи. Регион: экономика и социология, 2010, № 1, с.306-315.

10. Минерал [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.mineral.ru (дата обращения 25.10.2013)
11. Горная промышленность [Электронный ресурс] — Режим доступа: http://www.mining-media.ru (дата обращения 25.10.2013).
12. Лыгач В.Н., Ладыгина Г.В., Саморукова В.Д., Шубодеров А.В. Доизвлечение золота из отходов переработки бедных руд золотосодержащих руд Южного Урала. Семинар № 24. ГИАБ, 2007, С. 381-385.
13. Чайкина Е.В. Особенности функционирования мирового рынка золота в условиях финансового кризиса, Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 138/2013. Серія: Економіка і фінанси. — Севастополь, 2013.
14. Золото [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://goldomania.ru (дата обращения 17.09.2013)
15. Золотодобыча [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://zolotodb.ru (дата обращения 25.11.2013)
16. Якубович И.А., Резвухин К.Е. Современные технологии обогащения золота как источник экологической опасности. Семинар № 11, ГИАБ, 2010, с.243-245.
17. Татарников А.П. Ядернофизические методы обогащения полезных ископаемых. – М.: Атомиздат, 1974.
18. Мокроусов В.А. / В.А. Мокроусов, В.А. Лилиев // Радиометрическое обогащение нерадиоактивных руд. М.: Недра, 1979, 187 с.
19. Ревнивцев В.И. / В.И. Ревнивцев, Т.Г. Рыбакова, Е.П. Леман // Рентгенорадиометрическое обогащение комплексных руд цветных и редких металлов // М.: Недра, 1990, 120 с.
20. Федоров Ю.О./ Ю.О. Федоров, О.В. Коренев, В.А. Короткевич, В.П. Цой, М.Ю. Федоров, П.И. Ковалев, И.У. Кацер // Опыт и практика рентгенорадиометрической сепарации (РРС) золотосодержащих и других типов руд // Золотодобывающая промышленность, 2004, № 4, с.16-19.
21. Федоров Ю.О./ Ю.О. Федоров, И.У. Кацер, О.В. Коренев и др.// Опыт и практика рентгенорадиометрической сепарации руд // Известия высших учебных заведений. Горный журнал (Уральское горное обозрение), 2005, № 5, с. 21-37.
22. Портнов В.С./ В.С. Портнов, А.К. Турсунбаева, А.Д. Маусымбаева, С.А. Ефименко// Опробование медных руд месторождений Казахстана рентгенорадиометрическим методом. Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии, 2009, Том 2, стр. 345-358.