

УДК [622.272.06:622.341]:519.001.57:504.06

Соколов Игорь Владимирович

доктор технических наук,
зав. лабораторией подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: geotech@igduran.ru

Гобов Николай Васильевич

доцент, старший научный сотрудник,
лаборатория подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: geotech@igduran.ru

Соломенн Юрий Михайлович

младший научный сотрудник,
лаборатория подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: geotech@igduran.ru

Никитин Игорь Владимирович

научный сотрудник,
лаборатория подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: geotech@igduran.ru

**ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРАТЕГИИ
ОСВОЕНИЯ ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ
ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ЭКОЛОГИЧЕСКИ СБАЛАНСИРОВАН-
НЫМИ ГЕОТЕХНОЛОГИЯМИ***Аннотация:*

Создана экономико-математическая модель выбора геотехнологической стратегии (ГС) освоения глубокозалегающих железорудных месторождений, представляющая собой совокупность алгоритма формирования вариантов, методик выбора оптимальных схем и способов вскрытия, систем разработки, места размещения подземного обогатительного комплекса, расчета объемов добычи разными системами и ЧДД, определения рейтинга варианта ГС и соответствующей компьютерной программы. В результате моделирования разработанных вариантов ГС при различных содержаниях полезного компонента в руде, производственной мощности, системах разработки, местах размещения обогатительного комплекса, способах утилизации отходов горно-обогатительного производства выбран оптимальный вариант по комплексному эколого-экономическому критерию.

Ключевые слова: геотехнологическая стратегия, железорудное месторождение, горнотехническая система, подземная геотехнология, подземный обогатительный комплекс, экономико-математическое моделирование, оптимизация

Sokolov Igor V.

Dr. of technical sciences,
the head of the laboratory
of underground geo-technology
The Institute of mining UB RAS,
620075, Yekaterinburg, 58, Mamin-Sibiryak st.
e-mail: geotech@igduran.ru

Gobov Nickolay V.

assistant professor, senior researcher,
the laboratory of underground geo-technology,
The Institute of mining UB RAS
e-mail: geotech@igduran.ru

Solomein Yury M.

junior researcher,
the laboratory of underground geo-technology,
The Institute of mining UB RAS
e-mail: geotech@igduran.ru

Nikitin Igor V.

a researcher,
the laboratory of underground geo-technology,
The Institute of mining UB RAS
e-mail: geotech@igduran.ru

**ECONOMIC AND MATHEMATICAL
MODELING OF DEEP-BEDDING IRON
ORE DEPOSITS BY ECOLOGICALLY
BALANCED GEO-TECHNOLOGIES***Abstract:*

The economic and mathematical model (EMM) of selection geo-technological strategy (GS) is originated. It represents a set of formation algorithm both the GS options, methods of selection optimal schemes and processes of mining extraction, a subsurface concentration complex arrangement as well as calculation of mining output volume by various systems and net present value (NPV); determination the GS option rating and appropriate computer program. As a result of the developed GS options simulation by different mineral content, productive capacity, systems of development, arrangement of a concentration complex, the methods of mining and processing production (GOP) tails utilization, the best option was chosen according to ecological and economic criteria.

Key words: geo-technological strategy (GS), mining-technical system (MTS), subsurface geo-technology, economic and mathematical modeling (EMM), subsurface concentration complex (SCC), net present value (NPV), optimization

В настоящее время создание экономически эффективных и экологически безопасных геотехнологий добычи и обогащения руды, способствующих бесконфликтному развитию техно- и биосферы, представляется весьма актуальным [1]. Признанным подходом к решению подобных проблем является разработка новых технологий в соответствии с принципом «более чистого производства» (*Cleaner Production*) [2], акцентирующим внимание не на очистке и обезвреживании образовавшихся отходов, а на уменьшении объемов их образования и степени опасности в процессе производства.

В рамках обоснования вариантов геотехнологической стратегии (ГС) ИГД УрО РАН разработана технологическая схема инновационной комплексной эколого-ориентированной подземной геотехнологии добычи и переработки железных руд, включающей вскрытие, разработку системами с обрушением верхних этажей и камерную выемку нижних этажей яруса в соотношении, обеспечивающем замкнутость горнотехнической системы (ГТС), транспортирование грузов, обогащение руды и закладку камер, позволяющая весь объем отходов горно-обогатительного производства (ГОП) утилизировать в выработанном пространстве [3]. Эту геотехнологию можно реализовать как с использованием подземного обогатительного комплекса (ПОК) так и без его применения [4].

Для решения задачи обеспечения замкнутого цикла ГТС целесообразно методом оптимизации установить необходимое соотношение объемов добычи руды системами с обрушением и с закладкой выработанного пространства [5]. При этом факторами, влияющими на обеспечение безотходности ГОП в шаге освоения месторождения, являются: объем образовавшегося и закладываемого выработанного пространства, объем пустой породы подготовительно-нарезных выработок и объем хвостов обогащения – сухой (СМС) и мокрой (ММС) магнитной сепарации, используемых в качестве закладочного материала [6]. При этом под замкнутой понимаем такую ГТС, за пределы которой выходит только реализуемый продукт, а образующиеся твердые отходы утилизируются внутри нее. Степень замкнутости ГТС можно описать показателем экологической эффективности

$$\eta = V^o / V^п \rightarrow 1, \quad (1)$$

где V^o – объем отходов, м^3 ; $V^п$ – объем пустот, м^3 .

Исходным моментом для определения данных объемов является установленная на первых этапах формирования ГС годовая производственная мощность рудника A_r . Она складывается из годовой производительности этажей, одновременно разрабатываемых системами с обрушением и с закладкой.

$$A_r = A_{\text{обр}} + A_{\text{зак}}, \text{ т/год}, \quad (2)$$

где $A_{\text{обр}}$, $A_{\text{зак}}$ – годовая производительность этажей, разрабатываемых системами с обрушением и системами с закладкой, соответственно, т/год.

При этом определение необходимого объема добычи разными системами выполнено в зависимости от содержания железа в балансовых запасах 29 (базовый вариант), 43, 50 и 60 %.

Возможные варианты использования хвостов СМС и ММС в качестве закладки:

1. Хвосты ММС в виде пастовой закладки используются в полном объеме, хвосты СМС – по мере необходимости.
2. Хвосты ММС в виде сухой закладки используются в полном объеме, хвосты СМС – по мере необходимости.
3. Хвосты СМС используются в полном объеме, хвосты ММС в виде пастовой закладки – по мере необходимости.
4. Хвосты СМС используются в полном объеме, хвосты ММС в виде сухой закладки – по мере необходимости.

В качестве примера на рисунке 1 представлены графики доли систем разработки в общей годовой производительности рудника в зависимости от доли использования хвостов СМС при полном использовании породы и хвостов ММС в виде пастовой закладки. График читается следующим образом. По оси абсцисс откладывается λ доля хвостов СМС, принятых в качестве дополнительной закладки, по оси ординат – η как доля систем с закладкой в общей годовой производительности. Линия по оси абсцисс равная 100 %, означает полное использование для закладки всех отходов, образующихся в рамках ГТС. Линия по оси ординат равная 1,0 означает максимально возможную долю погашения объема пустот, образующихся в рамках ГТС. Отрезок по оси ординат от 0 до графика показывает долю применения систем с закладкой, от графика до 1,0 – систем с обрушением, выше 1,0 – дефицит выработанного пространства.

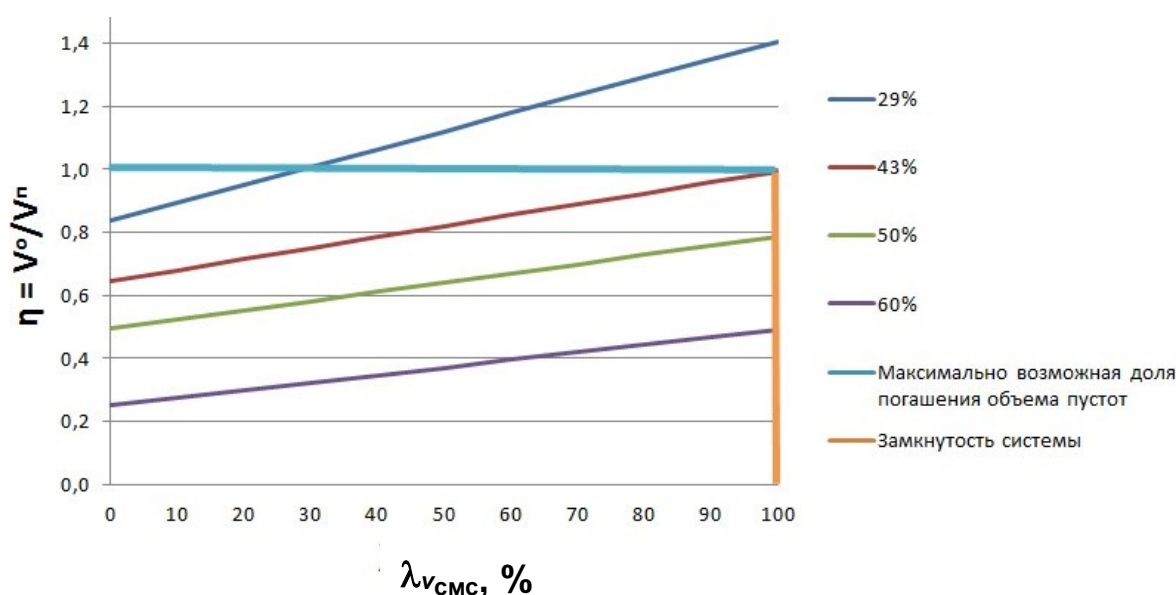


Рис. 1 – Доля систем с закладкой в общей годовой производительности в зависимости от доли использования хвостов СМС (ММС в виде пастовой закладки)

Следующим этапом стало создание алгоритма для компьютерной программы выбора ГС освоения железорудных месторождений при комбинированной разработке. Он состоит из 2 блоков данных (ввод-вывод информации), 6 логических и 15 вычислительных блоков (рис. 2).

Блок 1. Начало проведения расчетов. Ввод исходной горно-геологической информации, горнотехнических и экономических данных по следующим направлениям: геология, вскрытие, отработка и обогащение.

Блок 2. Оценка первого варианта ГС из числа рассматриваемых p . Присвоение значения $i=1$.

Блок 3. Расчет годовой производственной мощности рудника A_r шахты по i -му варианту ГС на основе горных возможностей месторождения.

Блоки 4 – 6. Определение схемы комбинированной разработки месторождения в зависимости от выбранной концепции развития ГОКа. В случае, когда предприятию необходимо поддерживать достигнутую производственную мощность, разработку месторождения следует вести по последовательной схеме, если необходимо наращивать производственную мощность – по параллельной схеме комбинированной разработки.

Блоки 7 – 12. Определение порядка отработки подземных запасов на основе сравнения A_r шахты с A_r карьера. Если A_r шахты $\geq A_r$ карьера, то отработку подземных запасов следует вести этажами последовательно. Если A_r шахты $< A_r$ карьера, то для увеличения

A_r шахты до 2 раз следует применять многоэтажную отработку, свыше 2 раз – ярусную отработку.

Блоки 13 – 15. Установление количества и, при необходимости, доли применяемых систем разработки в A_r шахты по i -му варианту ГС. Если применяется одна система разработки, то доля $A_{зак}=1$ или $A_{обр}=1$, если две и более, то $A_{зак}=opt$ и $A_{обр}=opt$.

Блок 16. Оптимизация параметров путем присвоения переменным значения $n=1$ из общего числа значений k исследуемого параметра.

Блок 17. Подсчет извлекаемых запасов $Q_{изв}$, объемов породы от проходки $Q_{пор}$, концентрата $Q_{конц}$, хвостов обогащения $Q_{смс}$, $Q_{ммс}$ и закладки $Q_{зак}$ по i -му варианту ГС при значении параметра n .

Блок 18. Определение первого критерия – ЧДД по i -му варианту ГС при значении параметра n на основе расчета извлекаемой ценности $Ц_{изв}$, суммарных капитальных K , эксплуатационных затрат $Э$, социально-экономических последствий (СЭП), сроков строительства T_c и отработки T_o в соответствии с разработанной методикой.

Блок 19. Определение второго критерия – показателя замкнутости ГТС η по i -му варианту ГС при значении параметра n на основе расчета объемов отходов V^o и пустот V^n в соответствии с разработанной методикой.

Блок 20. Присвоение следующего значения исследуемому параметру $n=n+1$. Если $n \leq k$, то возврат к блоку 17 и повторение всех расчетных и логических операций для $n=n+1$; если $n > k$, – переход к следующему блоку.

Блок 21. Оценка следующего варианта ГС. Присвоение значения $i=i+1$. Если $i \leq p$, то возврат к блоку 3 и повторение расчетных и логических операций для $i=i+1$; при условии $i > p$ переход к следующему блоку.

Блок 22. Ранжирование рассмотренных вариантов p по показателям $r_{чдд}$ и r_η – рейтинги варианта ГС по критерию ЧДД и η , соответственно.

Блок 23. Окончание выполнения расчетов. Оценка и выбор эффективного варианта ГС из числа рассмотренных p по критерию $R \rightarrow \min$ в соответствии с разработанной методикой.

Экономико-математическое моделирование (ЭММ) выполнено на примере вариантов ГС 1 – 5 освоения нижних горизонтов Естюнинского месторождения, характеризующихся:

- 1) $A_r = 2,5$ млн т/год, нисходящая выемка системами с обрушением, обогатительная фабрика на поверхности;
- 2) $A_r = 2,5$ млн т/год, восходящая выемка системами с закладкой, обогатительная фабрика на поверхности;
- 3) $A_r = 2,5$ млн т/год, восходящая выемка системами с закладкой, ПОК;
- 4) $A_r = 5$ млн т/год, нисходяще-восходящая выемка системами с обрушением и с закладкой, обогатительная фабрика на поверхности;
- 5) $A_r = 5$ млн т/год, нисходяще-восходящая выемка системами с обрушением и с закладкой, ПОК.

Компьютерная программа «Выбор ГС освоения подземных запасов при комбинированной разработке месторождений» написана в приложении Excel пакета программ Microsoft Office. Программа ранжирует варианты ГС по критериям «Показатель замкнутости ГТС» и «Чистый дисконтированный доход» (табл. 1). По каждому из двух критериев варианту ГС присваивается рейтинг $r_{чдд}$ и r_η . Более высокий рейтинг (минимальное количество баллов) получает вариант с лучшим значением критерия. Для принятия решения по выбору лучшего варианта ГС предложен глобальный критерий принятия комплексного решения R – комплексный эколого-экономический критерий, рассчитываемый как сумма баллов по критериям ЧДД и η с учетом их веса $k_{чдд}$, k_η , принятых за 1.

$$R = k_{чдд}r_{чдд} + k_\eta r_\eta. \quad (3)$$

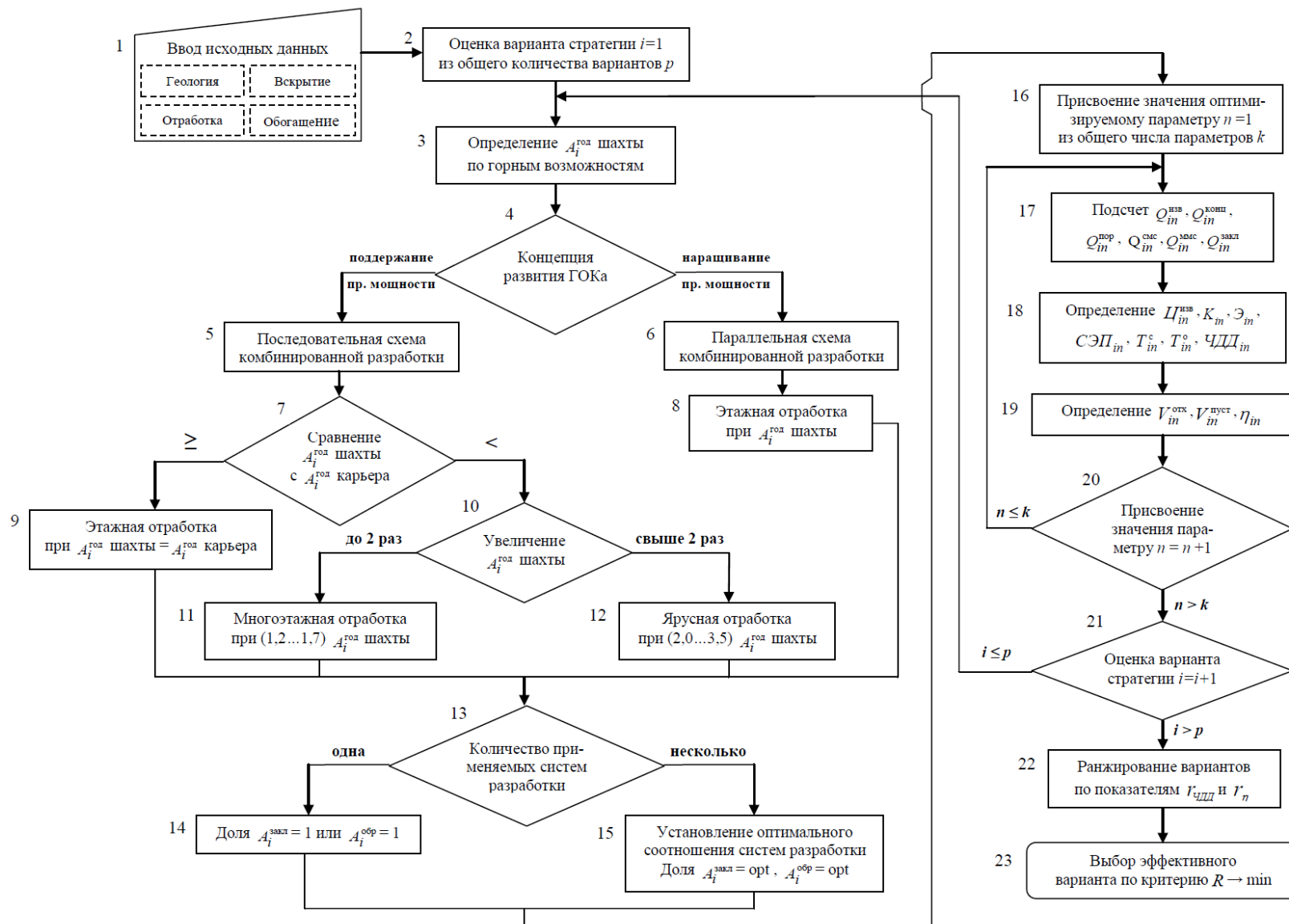


Рис. 2 – Алгоритм компьютерной программы выбора ГС освоения железорудных месторождений при комбинированной разработке

Таблица 1

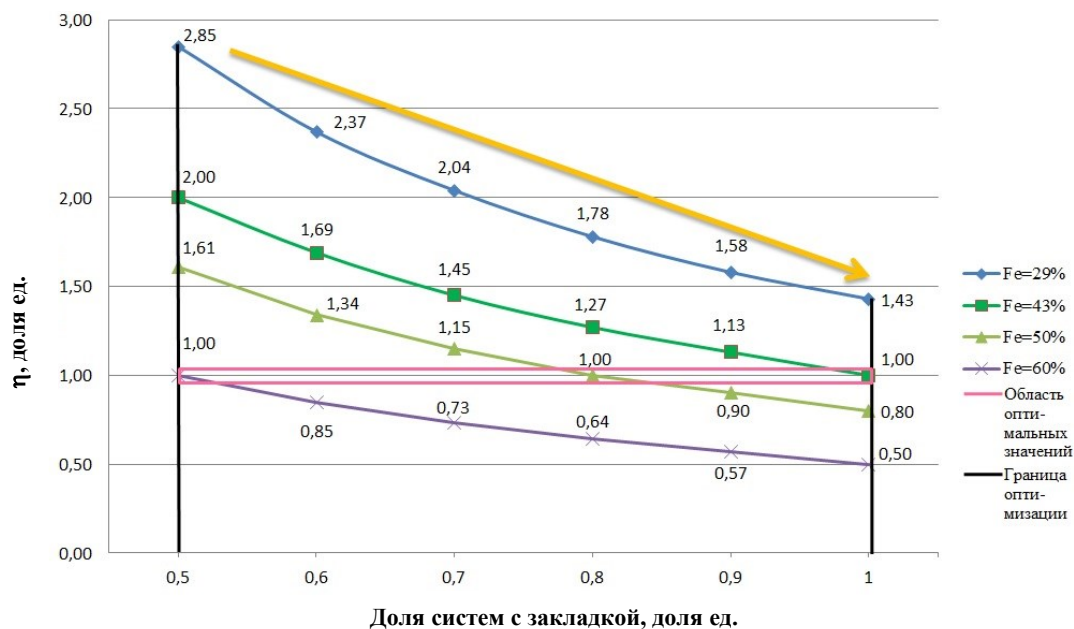
Рейтинги вариантов ГС

При содержании Fe = 29%							
Показатель	Обозн.	Ед. измер	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
Содержание металла в балансовых запасах	c_1	доля ед.	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Показатель отношения объема отходов к объему пустот	η	доля ед.	15,00	1,43	1,43	2,85	2,85
Место в рейтинге по возможности утилизации	r_η	балл	5	1	1	3	3
Чистый дисконтированный доход	ЧДД	тыс. руб.	2 678 157	3 766 288	1 180 724	12 289 475	7 569 821
Место в рейтинге по ЧДД	$r_{\text{ЧДД}}$	балл	4	3	5	1	2
Общее число баллов	R	балл	9	4	6	4	5
Итоговое место в рейтинге			5	1	4	1	3

В графе «Общее число баллов» (см. табл. 1) показано суммарное количество баллов по обоим критериям. Более высокое итоговое место в рейтинге получает вариант ГС с минимальным R . На графике видно, что наиболее эффективными являются варианты 2, 4 и 5 ГС с $R = 4, 4$ и 5.

Далее проведена оптимизация вариантов 4 и 5 ГС по комплексному эколого-экономическому критерию, вариант 2 не оптимизируется, поскольку применяется только система разработки с закладкой. Целью оптимизации является обеспечение максимальной степени замкнутости ГТС по критерию $\eta \rightarrow 1$. В данных исследованиях фиксируется весь комплекс исходных данных, не относящихся к определению η : горно-геологические, технологические, экологические и экономические.

Анализ целевой функции показателя экологической эффективности η (1), показывает, что добиться ее оптимума (равенства 1) можно, изменяя долю применения систем с закладкой $A_{\text{зак}}$ в производственной мощности подземного рудника A_r . При этом изменение $A_{\text{зак}}$, связанное с изменением доли систем с обрушением как $A_{\text{зак}} = 1 - A_{\text{обр}}$, приводит к изменению и целевой функции экономической эффективности ЧДД. Значит, существуют оптимальные значения $A_{\text{зак}}$ и $A_{\text{обр}}$, которые соответствуют максимуму ЧДД и $\eta = 1$. Отыскание оптимальных значений η показано на графиках (рис. 3).



→ – направление оптимизации

 Рис. 3 – Зависимость η от доли систем с закладкой при различном содержании Fe

Результаты оптимизации вариантов 4 и 5 ГС показали следующее:

1. При базовом содержании Fe=29 % технически возможен и экономически целесообразен полный переход на системы с закладкой. При этом показатель замкнутости ГТС улучшился в 2 раза до $\eta=1,43$, а излишки хвостов обогащения, складываемых на поверхности, минимальны. ЧДД вырос в варианте 4 на 10,7 %, в варианте 5 – на 10,2 %; при этом ЧДД по варианту 4 по сравнению с вариантом 2 больше в 3,6 раза, по сравнению с вариантом 5 – в 1,6 раза (табл. 2).

2. Аналогичные тенденции просматриваются и при содержании Fe=43 %, когда также технически возможен и экономически целесообразен полный переход на системы с закладкой. Показатель замкнутости ГТС улучшился в 2 раза до $\eta=1$, т.е. все отходы складываются в выработанном пространстве. ЧДД вырос в варианте 4 на 8,1 %, в варианте 5 – на 8 %; при этом ЧДД по варианту 4 по сравнению с вариантом 2 больше в 2,9 раза, по сравнению с вариантом 5 – в 1,7 раза.

3. При содержании Fe=50 % оптимальная доля систем с закладкой, при которой $\eta=1$ составляет 0,8, дальнейшее увеличение их доли приводит к избытку пустот. ЧДД растет в вариантах 4 и 5 на 4,5 %. При данном содержании реализация варианта 2 технически нецелесообразна.

4. При содержании Fe=60 % варианты 4 и 5 не подлежат оптимизации, поскольку $\eta=1$ при соотношении систем с закладкой и с обрушением 0,5/0,5.

Таблица 2

Рейтинги вариантов ГС после оптимизации вариантов 4 и 5

При содержании Fe = 29%							
Показатель	Обозн.	Ед. измер	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
Содержание металла в балансовых запасах	c_1	доля ед.	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Показатель замкнутости ГТС	η	доля ед.	15,00	1,43	1,43	1,43	1,43
Место в рейтинге по возможности утилизации	r_η	балл	5	1	1	1	1
Чистый дисконтированный доход	ЧДД	тыс. руб.	2 678 157	3 766 288	1 180 724	13 609 762	8 344 926
Место в рейтинге по ЧДД	$r_{\text{чдд}}$	балл	4	3	5	1	2
Комплексный эколого-экономический критерий	R	балл	9	4	6	2	3
Итоговое место в рейтинге			5	3	4	1	2

Таким образом, оптимальным по комплексному эколого-экономическому критерию признан вариант 4 ГС (во всем диапазоне содержания полезного компонента). Эффективность варианта 5 ГС по критерию ЧДД может сравняться с эффективностью варианта 4 при увеличении экологических платежей (приобретение земли по нормативу в зависимости от кадастровой стоимости, плата за перевод в категорию промышленного назначения, налог на землю, плата за размещение отходов на поверхности). Например, с 200 (в настоящее время) до 3000 руб/т, что весьма вероятно в ближайшем будущем. Горнотехническим фактором, снижающим преимущество варианта 4 ГС, является длина транспортирования руды от рудника до обогатительной фабрики. Так, при ее увеличении с 5 до 19 км целесообразен переход на подземное обогащение.

Литература

1. Яковлев В.Л. О стратегии освоения меднорудных месторождений Урала / В.Л. Яковлев, Ю.В. Волков, О.В. Славиковский // Горный журнал. – 2003. – № 9. – С. 3 – 7.
2. CleanerProduction [Текст]: офиц. Текст [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.unido.org/en/what-we-do/environment/resource-efficient-and-low-carbon-industrial-production/cp/cleaner-production.html>
3. Комплексная экологоориентированная подземная геотехнология добычи и обогащения железных руд / И.В. Соколов, Н.В. Гобов, А.А. Смирнов, А.Н. Медведев // Экология и промышленность России. – 2013. – № 6. – С. 16 –20.

4. Пат. № 25343901 Российская Федерация. Способ отработки крутопадающих месторождений / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Н.В. Гобов, Ю.Г. Антипин; опубл. 27.11.2014.

5. Соколов И.В. Систематизация и методика оценки вариантов стратегии освоения железорудных месторождений с применением подземных обогатительных комплексов / И.В. Соколов, Н.В. Гобов, Ю.Г. Антипин, А.А. Смирнов, И.В. Никитин, Ю.М. Соломеин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 7. – С. 101 – 108.

6. Соломеин Ю.М. Определение места расположения подземного обогатительного комплекса при освоении железорудного месторождения / Ю.М. Соломеин, И.В. Никитин // Проблемы недропользования: рецензируемый сб. науч. статей. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2015. – Вып. 3. – С. 44 – 50. [Электронный ресурс] - Режим доступа: // trud.igduran.ru