

УДК [622.272.06:622.341]:519.001.57:504.06

DOI: 10.18454/2313-1586.2017.01.146

Соломеин Юрий Михайлович
младший научный сотрудник
лаборатории подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН,
620075 г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: geotech@igduran.ru

Solomein Yury M.
junior researcher,
the laboratory of underground geo-technology,
The Institute of Mining UB RAS,
620075, Yekaterinburg,
58 Mamin-Sibiryak st.
e-mail: geotech@igduran.ru

Никитин Игорь Владимирович
научный сотрудник
лаборатории подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: geotech@igduran.ru

Nikitin Igor V.
researcher,
the laboratory of underground geo-technology,
The Institute of Mining UB RAS
e-mail: geotech@igduran.ru

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСВОЕНИЯ
ЕСТУНИНСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ
ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ***

**DETERMINATION THE ECOLOGICAL
AND ECONOMIC EFFICIENCY
OF DEVELOPMENT THE ESTUNINSKY
IRON ORE DEPOSIT IN TERMS
OF ECONOMIC AND MATHEMATICAL
MODELING**

Аннотация:

Создана экономико-математическая модель (ЭММ) 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 (ПОК), расчета объемов добычи разными системами и чистого дисконтированного дохода (ЧДД), определения рейтинга варианта ГС, и соответствующей компьютерной программы. В результате моделирования разработанных вариантов ГС при различных содержаниях полезного компонента, производственной мощности, системах разработки, местах размещения обогатительного комплекса, способах утилизации отходов горно-обогатительного производства (ГОП) 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

Abstract:

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

Key words: geo-technological strategy (GS), mining-technical system (MTS), iron ore deposit, 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 актуальной проблемой [1]. Признанным подходом к решению подобных проблем является разработка новых технологий в

* Исследования выполнены при поддержке Комплексной программы фундаментальных исследований УрО РАН «Исследование переходных процессов и учет закономерностей их развития при разработке инновационных технологий оценки, добычи и рудоподготовки минерального сырья» (15-11-5-7)

соответствии с принципом «более чистого производства» (CleanerProduction) [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 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 (минимизацию экологического ущерба) горнотехнической системы (ГТС), транспортирование грузов, обогащение руды и закладку камер. Данная технологическая схема позволяет весь объем отходов ГОП утилизировать в выработанном пространстве [3]. Эту геотехнологию можно реализовать как с использованием 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 (экологичности) 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 магнитной сепарации (ММС), 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 данной ГТС. Для оценки возможности утилизации твердых отходов в выработанном пространстве используется показатель η :

$$\eta = V^0 / V^n \rightarrow 1, \quad (1)$$

где V^0 – объем отходов, м^3 ; V^n – объем пустот, м^3 .

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

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

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 рис. 1 изображены 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.

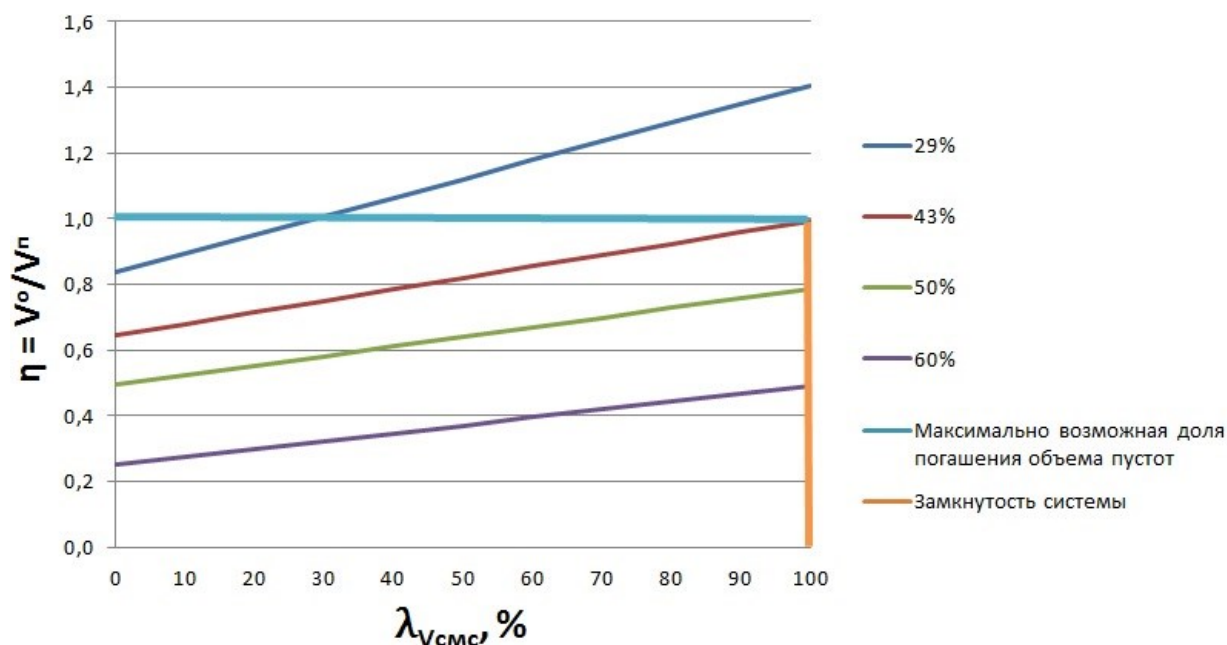


Рис. 1 – Доля систем с закладкой в общей годовой производительности в зависимости от доли использования хвостов СМС (ММС в виде пастовой закладки)

Следующим этапом стало создание алгоритма для компьютерной программы выбора ГС освоения железорудных месторождений при комбинированной разработке. Он состоит из 2-х блоков данных (ввод-вывод информации), 6-ти логических и 15-ти 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 $A_{Г}$ 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 $A_{Г}$ шахты с $A_{Г}$ карьера. Если $A_{Г}$ шахты $\geq A_{Г}$ карьера, то отработку подземных запасов следует вести этажами последовательно. Если $A_{Г}$ шахты $< A_{Г}$ карьера, то для увеличения $A_{Г}$ шахты до 2 раз следует применять многоэтажную отработку, свыше 2 раз – ярусную отработку.

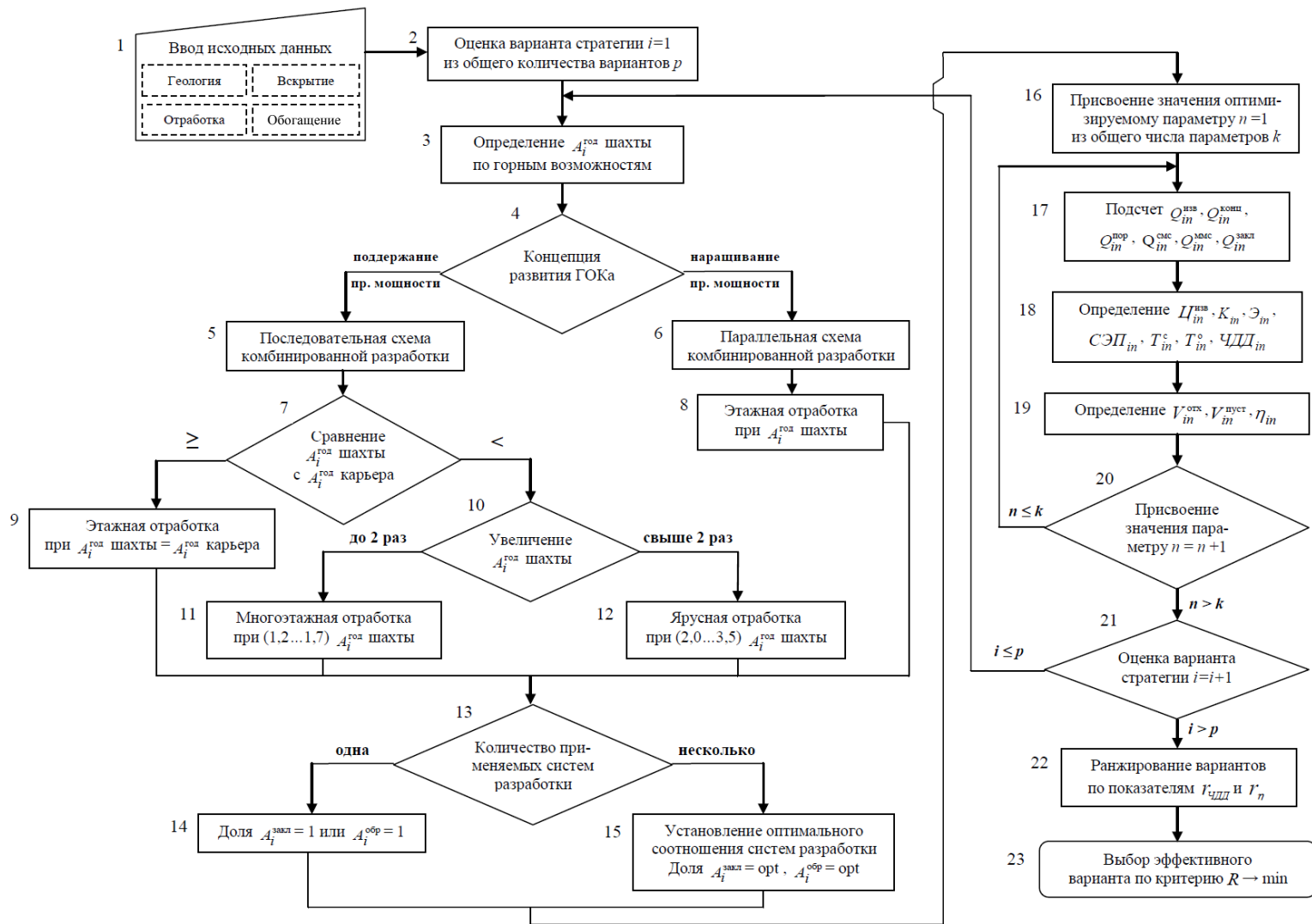


Рис. 2 – Алгоритм компьютерной программы выбора ГС освоения железорудных месторождений при комбинированной разработке

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

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

Блок 17. Подсчет извлекаемых запасов $Q_{\text{изв}}$, объемов породы от проходки $Q_{\text{пор}}$, концентрата $Q_{\text{конц}}$, хвостов обогащения $Q_{\text{смс}}$, $Q_{\text{ммс}}$ и закладки $Q_{\text{зак}}$ 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 $Ц_{\text{изв}}$, суммарных капитальных K , эксплуатационных затрат Δ , 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 $V^П$ 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 $n > k$, то 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 $i=i+1$, если $i > p$, то переход к следующему блоку.

Блок 22. Ранжирование рассмотренных вариантов p по показателям $r_{\text{чдд}}$ 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 выполнено на примере вариантов ГС 1-5 освоения нижних горизонтов Естюнинского месторождения, характеризующихся:

1. $A_{\Gamma}=2,5$ млн. т/год, нисходящая выемка системами с обрушением, обогатительная фабрика на поверхности;
2. $A_{\Gamma}=2,5$ млн. т/год, восходящая выемка системами с закладкой, обогатительная фабрика на поверхности;
3. $A_{\Gamma}=2,5$ млн. т/год, восходящая выемка системами с закладкой, ПОК;
4. $A_{\Gamma}=5$ млн. т/год, нисходяще-восходящая выемка системами с обрушением и с закладкой, обогатительная фабрика на поверхности;
5. $A_{\Gamma}=5$ 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» (рис. 3). По каждому из двух критериев варианту ГС присваивается рейтинг $r_{\text{чдд}}$ и r_{η} . Более высокий рейтинг (минимальное количество баллов) получает вариант с лучшим значением критерия. Для оценки вариантов ГС предложен глобальный критерий принятия компромиссного решения R – комплексный эколого-экономический критерий, рассчитываемый как сумма баллов по критериям ЧДД и η с учетом их веса $k_{\text{чдд}}$, k_{η} – вес критериев в глобальном критерии, настраиваемый в зависимости от потребностей предприятия (в данном случае принят равный 1):

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

Рейтинги							
При содержании Fe = 29%							
Показатели	Обозн.	Ед. измер	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
Содержание металла в балансовых запасах	c_1	доли ед.	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Показатель отношения объема отходов к объему пустот	η	доли ед.	15,00	1,43	1,43	2,85	2,85
Место в рейтинге по возможности утилизации	r_η	бал.	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	$r_{\text{чдд}}$	бал.	4	3	5	1	2
Общее число баллов	R	бал.	9	4	6	4	5
Итоговое место в рейтинге			5	1	4	1	3

Рис. 3 – Рейтинги вариантов ГС

В графе «Общее число баллов» (см. рис. 3) 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 $A_{\text{Г}}$. При этом изменение $A_{\text{зак}}$, связанное с изменением доли систем с обрушением ($A_{\text{зак}} = 1 - A_{\text{обр}}$), 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. 4).

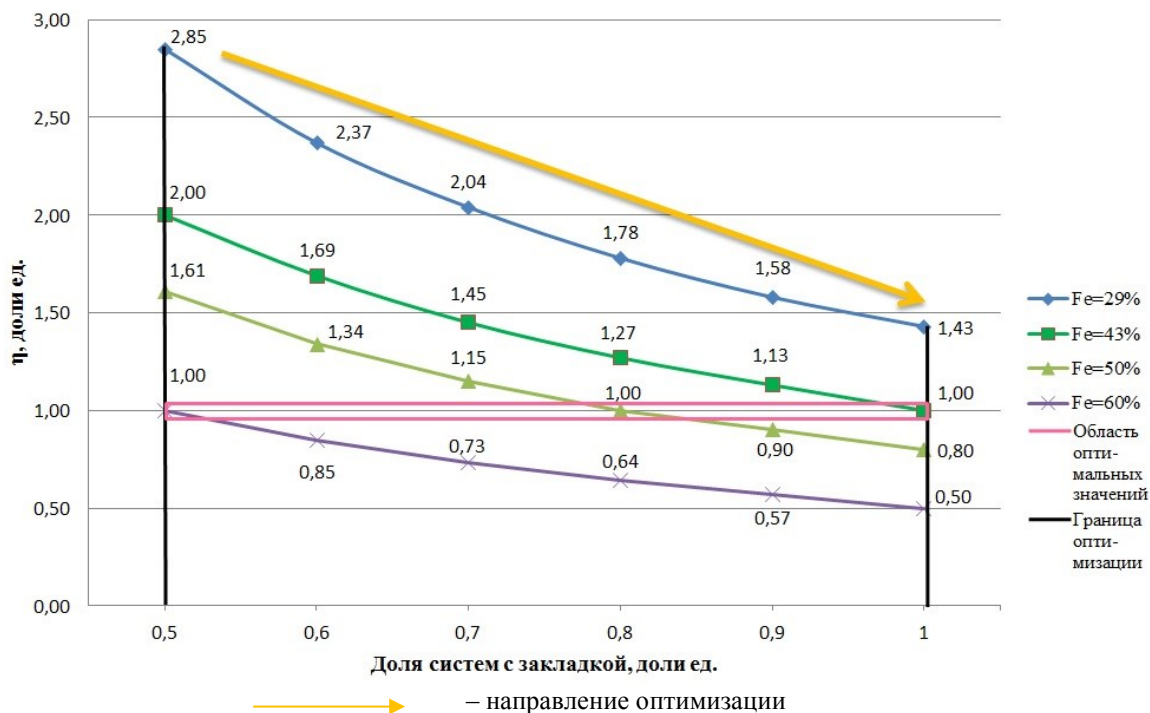


Рис. 4 – Зависимость η от доли систем с закладкой при различном содержании Fe

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 (рис. 5).

Рейтинги							
При содержании Fe = 29%							
Показатели	Обозн.	Ед. измер	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
Содержание металла в балансовых запасах	c_1	доли ед.	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Показатель замкнутости ГТС	η	доли ед.	15,00	1,43	1,43	1,43	1,43
Место в рейтинге по возможности утилизации	r_η	бал.	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	$r_{чдд}$	бал.	4	3	5	1	2
Комплексный эколого-экономический критерий	R	бал.	9	4	6	2	3
Итоговое место в рейтинге			5	3	4	1	2

Рис. 5 – Рейтинги вариантов ГС после оптимизации вариантов 4 и 5

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 (0,2 – системы с обрушением); дальнейшее увеличение их доли приводит к избытку пустот, вызванному нехваткой закладочного материала. 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.

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 вариантом 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.

Таким образом, созданные методика, алгоритм расчета и компьютерная программа позволяют провести сравнительную оценку эколого-экономической эффективности нескольких вариантов ГС освоения железорудных месторождений.

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: 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. 2534301 Российская Федерация, МПК E21C41/22. Способ отработки крутопадающих рудных месторождений / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Н.В. Гобов, Ю.Г. Антипин; заявитель и патентообладатель ИГД УрО РАН. - № 201313306603; заявл. 16.07.2013; опубл. 27.11.2014, Бюл. № 33.

5. 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 [Электронный ресурс]: рецензируемое сетевое периодическое научное издание / ИГД УрО РАН. - 2015. - № 3. - С. 44 - 50. – Режим доступа: // trud.igdur.ru