

## ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ОБНАЖЕНИЙ ВЫРАБОТОК В ФИЗИЧЕСКИ-НЕЛИНЕЙНО ДЕФОРМИРУЕМОМ РУДНОМ И ЗАКЛАДОЧНОМ МАССИВЕ ЯКОВЛЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Семенов В.И., Рубчевский Ю.И.

*Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия (199106, Санкт-Петербург, 22-я линия, 2), e-mail:synthex@bk.ru*

Яковлевское месторождение богатых железных руд, наряду с другими месторождениями КМА, является уникальным как по качеству железорудного сырья, так и по сложности горно-геологических и гидрогеологических условий. Поэтому не всегда удается воспользоваться апробированными при проектировании и на практике решениями, так как аналоги отсутствуют. Это требует изучения существующих подходов к анализу напряженно-деформированного состояния железорудного массива, а также проведения теоретических и экспериментальных исследований. В этой связи особое значение приобретает оценка устойчивости обнажений выработок в физически-нелинейно деформируемом рудном и закладочном массиве Яковлевского месторождения. В рамках работы выполнено численное моделирование методом конечных элементов (МКЭ) в пространственной постановке с учетом широкого спектра влияющих факторов, таких как физическая нелинейность железорудного и закладочного массива и последовательность ведения очистных и закладочных работ. Установлены зоны возможного разрушения вокруг подготовительной выработки и очистных заходов, проводимых по разделительному целику между бетонными полосами. Результаты моделирования могут быть использованы при выборе типа крепи и определении ее рациональных параметров.

Ключевые слова: выработка, массив, напряжения, Яковлевский рудник, нелинейность деформаций.

## EVALUATION OF STABILITY MINE'S EXPOSURES IN PHYSICALLY NONLINEAR DEFORMABLE ORE AND BACKFILL MASS OF YAKOVLEVSKOYE DEPOSIT

Semenov V.I., Rubchevsky U.I.

*National mineral resources university (University of mines), Saint Petersburg, Russia (199106, Saint Petersburg, 22 liniya, 2), e-mail:synthex@bk.ru*

Yakovlevskoye deposits of rich iron ore, along with other fields of KMA is unique both in the quality of iron ore, as well as the complexity of the geological and hydrogeological conditions. Therefore it is not always possible to use the design and proven in practice decisions, as there are no analogues. It requires an examination of existing approaches of stress-strain state analysis of iron ore mass, as well as theoretical and experimental studies. In this regard, particular importance is sustainability assessment of exposures in the workings physically nonlinear deformable ore and backfill mass of Yakovlevskoye deposit. The numerical simulation of the finite element method (FEM) in spatial statement was made in this work, given the wide range of influencing factors, such as physical nonlinearity of iron and backfill mass and sequence of extraction and filling operations. As result, established possible zones of destruction around the preparatory mines and treatment mines conducted entirely under the separation between the concrete runways. The simulation results can be used in selecting the type of lining and defining its rational parameters.

Keywords: strata, stress, Yakovlevsky deposit, strain nonlinearity.

Геомеханические процессы, протекающие в рудном и закладочном массиве вокруг очистных и подготовительных выработок, проводимых под защитным перекрытием в условиях Яковлевского железорудного месторождения, не имеют аналогов и не позволяют использовать точные аналитические решения [3].

Для изучения вопроса оценки устойчивости обнажений в мартит-гидрогематитовых рудах было использовано численное моделирование с применением метода конечных элементов (МКЭ).

В качестве объекта изучения выбран Блок № 6, в котором в настоящий момент активно ведутся очистные и закладочные работы во втором слое, когда закладка первого слоя выступает в качестве искусственной кровли [6]. Проходка очистных выработок на данном участке сопровождается интенсивными проявлениями горного давления в виде вывалообразований и обрушений руды с боков по всей длине выработок, что создает угрозу безопасности ведения горных работ.

Модель представляет собой систему подготовительных и очистных выработок (заходок), которые последовательно проходятся и закладываются твердеющей смесью [2]. Заходки разделены на выработки первой, второй, третьей и четвертой очереди. Выполнено объемное моделирование горизонтов – 370 м, - 374 м, -378 м блока № 6, состоящих из двух подготовительных выработок на каждом горизонте – слоевых штреков и 10 очистных заходок. Закладка очистных заходок нулевого слоя горизонта -370 м моделируется с учетом недозаклада 0,4 м от кровли выработок.

Физико-механические свойства, использованные при моделировании, представлены в таблице 1. Нелинейный характер диаграммы деформирования задается обобщенной экспериментальной зависимостью между наибольшим сдвигом и максимальным касательным напряжением, которая установлена по результатам лабораторных испытаний образцов гидрогематит-мартитовой руды на прессовом оборудовании [4,5]. Данная зависимость представлена на рис. 1. Физико-механические свойства закладочного материала получены в ходе лабораторных и натурных исследований на базе Яковлевского рудника.

Таблица 1

Физико-механические свойства руды и закладочного материала

Название материала	Модуль деформации E, МПа	Коэффициент Пуассона $\mu$	Удельный вес $\rho$ , МН/м <sup>3</sup>	Сцепление C, МПа	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град
Гидрогематит-мартитовая руда	1740	0,26	0,032	-	-
Закладочный материал	6000	0,26	0,019	3,84	28

Напряжённое состояние определяется исходя из того, что система выработок расположена на глубине 500 м и задается неравнокомпонентным полем напряжений. Таким образом, вертикальные напряжения составляют  $\sigma_z = 5$  МПа, а боковые и продольные  $\sigma_x = \sigma_y = 2,5$  МПа.

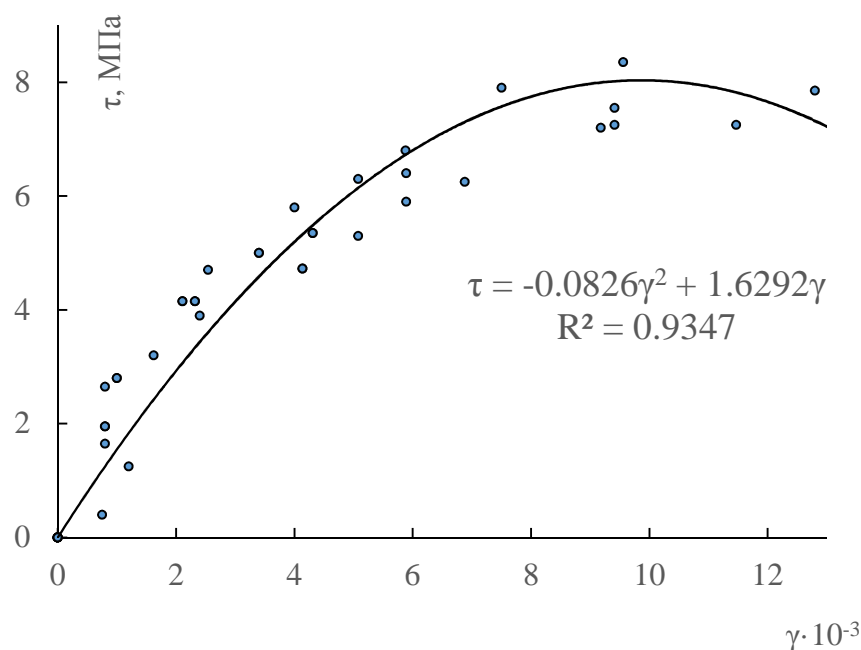
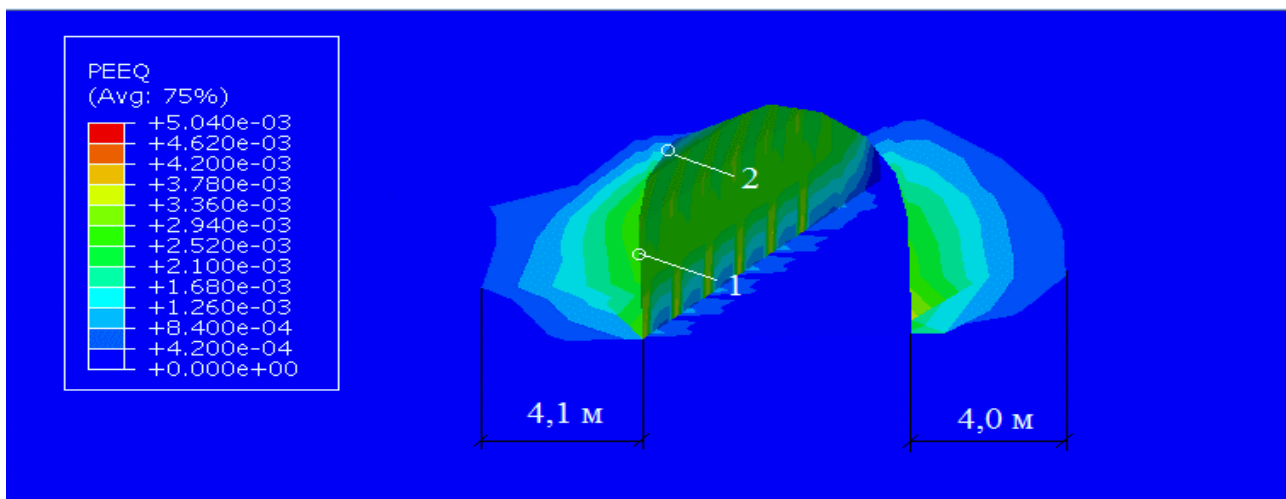


Рис. 1. Обобщенная экспериментальная зависимость между наибольшим сдвигом и максимальными касательными напряжениями для гидрогематит-мартитовой руды средней прочности

В результате моделирования установлены зоны разрушений в боках подготовительной выработки, которые могут быть определены зонами активных пластических деформаций в железорудном массиве.

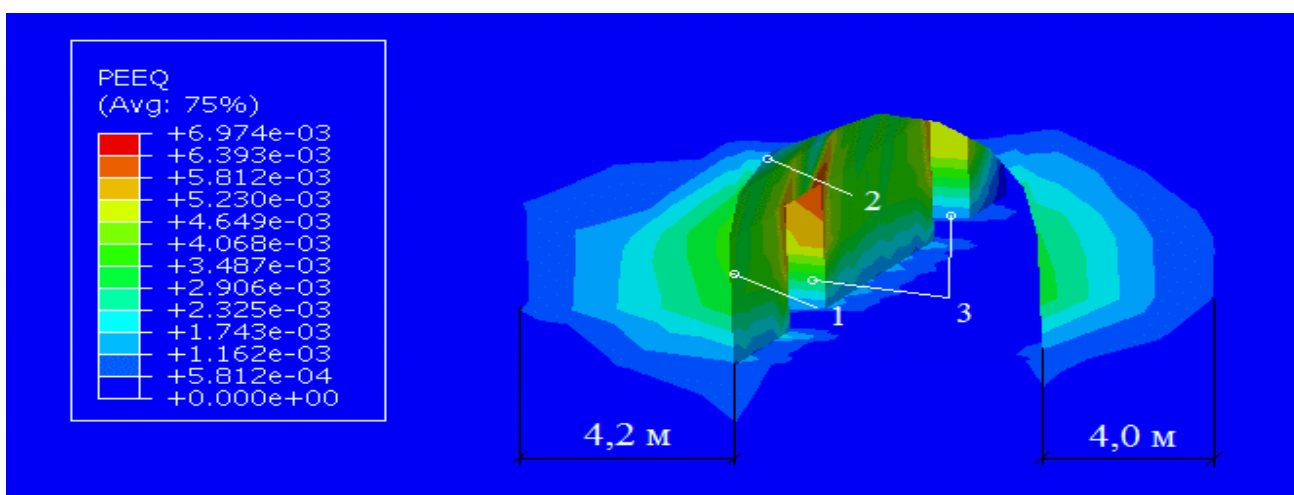
Наличие и интенсивность пластических деформаций оцениваются показателем РЕЕQ. Характер распределения данного показателя соответствует конфигурации зон неупругих деформаций, то есть области массива, в которой отсутствует однозначная линейная связь между напряжениями и деформациями. Конфигурация данных зон позволяет установить области, потенциально опасные по обрушениям и вывалообразованию.

На рис. 2 приведены зоны неупругих деформаций, возникающие вокруг подготовительного штрека после его проходки. В областях рудного массива, имеющих цвет, отличный от синего, возникают пластические деформации, значение которых оценивается показателем РЕЕQ. Как видно из рисунка, максимальная ширина зоны пластических деформаций на этапе проходки штрека составила 4,1 м, а интенсивность –  $2,52 \cdot 10^{-3}$ . На рис. 3 представлены зоны неупругих деформаций, возникающие вокруг подготовительного штрека и в закладочном массиве при проведении очистных заходок по разделительному целику между бетонными полосами.



**1 – контур выработки; 2 – пята свода**

Рис. 2. Конфигурация зон пластических деформаций вокруг подготовительного штрека после его проходки в гидрогематит-мартитовой руде средней прочности



**1 – контур выработки; 2 – пята свода; 3 – очистные заходки**

Рис.3. Конфигурация зон пластических деформаций вокруг подготовительного штрека в гидрогематит-мартитовой руде средней прочности в момент ведения очистных работ

Как видно из рисунка, происходит незначительное увеличение ширины зоны пластических деформаций вокруг штрека до 4,2 м в левом боку, а интенсивности – до  $3,44 \cdot 10^{-3}$ . На участке сопряжения очистной заходки и закладочного массива интенсивность показателя PEEQ достигает  $6,39 \cdot 10^{-3}$ . После проходки выработки по разделительному целику между бетонными полосами пластические деформации развиваются наиболее интенсивно в угловых целиках, что можно наблюдать на рис. 3.

Адекватность показателя PEEQ подтверждается натурными наблюдениями. При обследовании выработок выявлено, что отслоения и вывалы руды происходят в основном в боках и пята свода, а отслоения закладочного массива – в угловых целиках. Показатель

РЕЕQ с высокой степенью точности указывает на зоны возможного разрушения рудного и закладочного массива, не являясь однозначным критерием появления зон разрушения.

В настоящее время оценка устойчивости обнажений в выработках Яковлевского рудника осуществляется по предложенному О.В. Тимофеевым критерию  $\Pi_b$ [1]. На сегодняшний день данный критерий определяется без учета влияния нелинейного характера деформирования руд средней прочности и прочных по формуле:

$$\Pi_b = \frac{\sigma \cdot K_1 \cdot K_2}{R \cdot K_c}, \quad (1)$$

где:  $\sigma$  – статическое вертикальное (для кровли выработки) и горизонтальное (для боков выработки) напряжение в нетронутом массиве в месте расположения выработки, МПа;  $K_1$  – коэффициент концентрации напряжений вследствие проведения выработки;  $K_2$  – коэффициент изменения напряжений в результате влияния других выработок и ведения очистных работ;  $R$  – среднее значение сопротивления пород в образце одноосному сжатию;  $K_c$  – коэффициент структурного ослабления массива.

После определения значений критерия напряженности элемента выработки  $\Pi_b$  по его величине устанавливается категория устойчивости участка выработки. Возможные состояния устойчивости разделены на 4 категории (таблица 2).

Таблица 2

Классификация устойчивости руд в обнажениях подготовительных выработок

Критерий напряженности бока выработки, $\Pi_b$	Категория и состояние устойчивости обнажения	Признаки состояния устойчивости обнажений
$\Pi_b < 1,0$	I категория; Устойчивое состояние	Допредельное линейное и нелинейное деформирование массива. Контур выработки сохраняет устойчивое состояние без крепи. При взрывных работах и различных включениях возможны незначительные отслоения и просыпания руды.
$\Pi_b = 1,0-1,3$	II категория; Предельное состояние	Возможны отслоения руды с боков и кровли выработки, а также образование заколов. В течение времени продолжается разуплотнение и отслоение руды. Требуется оборка обнажений в кровле и боках.
$\Pi_b = 1,3-3$	III категория; Неустойчивое состояние	Во вмещающем рудном массиве происходят процессы разуплотнения, с формированием зоны разрушенных пород, ограничивающейся сводом естественного равновесия, незначительно увеличивающейся с увеличением площади подработки.
$\Pi_b > 3$	IV категория; Весьма неустойчивое состояние	Под влиянием напряжений в массиве в кровле и боках руда отслаивается. Процесс обрушения продолжается после проходки выработки. Нагрузка на крепь возрастает, поэтому устойчивость выработки должна обеспечиваться крепью, способной создать отпор, необходимый для удержания отслоившейся руды.

Данный критерий нуждается в корректировке, так как нелинейный характер деформирования железорудного массива в окрестности подготовительной выработки никак не учитывается. Кроме того, отсутствует учет влияния этапа очередности ведения очистных работ. Коэффициент  $K_1$  не зависит от проходки смежных выработок и одинаков для одиночных и серии выработок.

Для учета этих факторов в формуле (1) коэффициент  $K_1$  заменяется на коэффициент комплексного влияния  $K_{вл}$ , величина которого обоснована результатами компьютерного моделирования и лабораторных испытаний. Тогда формула (1) примет вид:

$$P_B = \frac{\sigma K_{вл} K_2}{R K_c}, \quad (2)$$

где  $K_{вл}$  – коэффициент концентрации напряжений вследствие проведения выработки, зависящий от нелинейного характера деформирования рудного массива и порядка проходки очистных заходок.

В таблице 3 представлены значения для сравнительного расчета эталонного критерия напряженности  $P_{вэт}$  и комплексного критерия напряженности  $P_{ком}$ :  $K_{1эт}$  – эталонный коэффициент концентрации вертикальных напряжений, предложенный в работе [1];  $K_{вл}$  – коэффициент комплексного влияния; сравнение коэффициентов концентрации напряжений для эталонной;  $K_2$  – коэффициент изменения напряжений в результате влияния других выработок и ведения очистных работ;  $R$  – среднее значение сопротивления пород в образце одноосному сжатию;  $\sigma$  – статическое вертикальное (для кровли выработки) и горизонтальное (для боков выработки) напряжение в нетронутом массиве в месте расположения выработки, МПа;  $K_c$  – коэффициент структурного ослабления массива.

Таблица 3

Значения коэффициента  $K_{вл}$  и критерия напряженности ( $P_B$ ) для боков и кровли одиночной подготовительной выработки сводчатой формы поперечного сечения

Участок контура	$K_{1эт}$	$K_{вл}$	$K_2$	$R$ , МПа	$\sigma$ , МПа	$K_c$	$P_{вэт}$ /Категория устойчивости	$P_{ком}$ /Категория устойчивости
<b>Руды железослюдково-мартитовые хлоритизированные средней прочности</b>								
Кровля	1,25	0,86	1,0	14,24	11,20	0,60	1,64/III	1,13/II
Бока	1,35	0,90	1,0	14,24	6,60	0,60	1,04/II	0,70/II
<b>Руды железослюдково-мартитовые карбонизированные плотные</b>								
Кровля	1,25	0,78	1,0	31,0	11,20	0,70	0,65/II	0,40/I
Бока	1,35	1,37	1,0	31,0	4,32	0,70	0,27/I	0,27/I
<b>Руды гидрогематитовые средней прочности</b>								
Кровля	1,25	0,80	1,0	8,0	11,20	0,40	4,38/V	2,80/IV
Бока	1,33	0,81	1,0	8,0	7,20	0,40	2,99/IV	1,82/III
<b>Руды гидрогематитовые карбонизированные плотные</b>								
Кровля	1,25	0,70	1,0	41,13	11,20	0,70	0,49/I	0,27/I
Бока	1,33	1,08	1,0	41,13	4,46	0,70	0,21/I	0,17/I

Результаты оценки устойчивости обнажений в рудном и в закладочном массиве должны учитываться при выборе типа крепи и определении ее рациональных параметров, таких как типоразмер спецпрофиля и шаг расстановки для рамной крепи. Выбор рациональных параметров рамной крепи КМП-А3 сводится к проверке соответствия типоразмера спецпрофиля арочной крепи и плотности расстановки арок (расстояния между арками) условиям поддержания выработки.

С использованием представленных результатов выполнены расчеты параметров рамной крепи подготовительных выработок Яковлевского месторождения в зоне влияния очистных работ [7,8]. В таблице 4 представлены параметры крепления, которые должны уточняться результатами практического применения и расчетом.

Таблица 4

Конструкции и параметры крепи подготовительных выработок Яковлевского рудника в физически-нелинейном железорудном массиве

Тип руды	Категория и состояние устойчивости обнажения	Критерий напряженности бока выработки, $P_b$	Типы и параметры крепи
Железнослюдков о-мартитовая карбонатизированная прочная	I категория; Устойчивое состояние	$P_b < 1,0$	Контур выработки сохраняет устойчивое состояние без крепи.
Железнослюдков о-мартитовая средней прочности	III категория; Неустойчивое состояние	$P_b = 1,3-3$	Крепь КМП-А3 с затяжкой кровли и боков просечным листом и забутовкой закрепного пространства. Шаг расстановки рам 1 м.
Гидрогематит-мартитовая карбонатизированная прочная	I категория; Устойчивое состояние	$P_b < 1,0$	Контур выработки сохраняет устойчивое состояние без крепи
Гидрогематит-мартитовая средней прочности	III категория; Неустойчивое состояние	$P_b = 1,3-3$	Крепь КМП-А3 с затяжкой кровли и боков просечным листом и забутовкой закрепного пространства. Шаг расстановки рам 1 м.

### Список литературы

1. Баклашов И.В. Тимофеев И.В. Конструкции и расчет крепей и обделок. – М.: Недра, 1979. – 263 с.
2. Курленя М.В., Опарин А.П., Тапсиев А.П., Аршавский В.В. Геомеханические процессы взаимодействия породных и закладочных массивов при отработке пластовых рудных залежей. – Новосибирск: Наука. Сиб., предприятие РАН, 1997. – 175 с.

3. Протосеня А.Г. Физически нелинейно-пластическая задача о распределении напряжений вокруг выработки кругового очертания. // Изв. вузов. Горный журнал. – 2014. – № 2. – С. 43-48.
4. Протосеня А.Г., Семенов В.И. Оценка напряженно-деформированного состояния вокруг одиночной выработки при физически нелинейном деформировании горных пород // Записки Горного института. – 2013. – Т.204. – С. 209-213.
5. Протосеня А.Г., Семенов В.И., Супрун И.К. Расчет нагрузок на крепь выработок и тоннелей, сооружаемых в физически нелинейных массивах // Записки Горного института. – 2012. – Т. 199. – С. 173-175.
6. Протосеня А.Г., Трушко В.Л. Прогноз устойчивости выработок в низкопрочных железных рудах Яковлевского месторождения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – № 4. – С. 49-61.
7. Руководство по расчету и выбору параметров крепи КАМП-А3 горных выработок Яковлевского рудника. – СПб.: СПГГИ, 2007.
8. Инструкция по выбору рамных податливых крепей горных выработок. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб., 1991.

**Рецензенты:**

Протосеня А.Г., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой строительства горных предприятий и подземных сооружений Национального минерально-сырьевого университета «Горный», г. Санкт-Петербург;

Долгий И.Е., д.т.н., профессор кафедры строительства горных предприятий и подземных сооружений Национального минерально-сырьевого университета «Горный», г. Санкт-Петербург.