

УДК 622.023

**ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ ВЫРАБОТОК В НИЗКОПРОЧНЫХ  
ЖЕЛЕЗНЫХ РУДАХ ЯКОВЛЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

**А. Г. Протосеня, В. Л. Трушко**

*Национальный минерально-сырьевой университет “Горный”  
21 линия, 2, 199026, г. Санкт-Петербург, Россия*

Изучаются в комплексе следующие вопросы: физико-механические свойства руд и пород месторождения, измерения смещений вокруг выработок, оценка их устойчивости, выбор типов и параметров крепей. В качестве объекта исследования выбрано Яковлевское месторождение.

*Руда, крепь, свод, напряжение, деформация, выработка, устойчивость, прочность*

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РУД И ПОРОД ЯКОВЛЕВСКОГО  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Яковлевское железорудное месторождение является уникальным по запасам и высокому содержанию железа в руде (более 65 %), а также по сложности горно-геологических и гидро-геологических условий. Яковлевское месторождение характеризуется высокой степенью обводнения. Подземные воды на месторождении развиты в отложениях осадочного чехла, в пределах которого выделяют семь водоносных горизонтов (сверху вниз): маастрихт-туронский, сеноман-альбский, апт-неокомский, волжский, келловей-батский, нижнекаменноугольный (нижнекарбонный), рудно-кристаллический, приуроченный к докембрийским образованиям — богатых железных руд и вмещающих их породам — железистым кварцитами, сланцам, гранитам и пр. Общая мощность обводненной зоны превышает 700 м. Все водоносные горизонты имеют высокие напоры.

Непосредственно над рудным телом располагается высоконапорный нижнекаменноугольный (нижнекарбонный) водоносный горизонт с напорами 420–440 м, приуроченный к известнякам, в нижней части разреза которых прослеживаются невыдержанные глинистые прослои.

Рудный массив представлен мощной толщей переслаивающихся разностей руд с прослойками железисто-слюдковых маргитовых, тонкополосчатых железисто-слюдковых кварцитов и жильного кварца мощностью от долей до нескольких метров. Залегание рудоносной толщи наклонное, почти крутое, протяженность рудного тела по трассе квершлагов 240–280 м и более. Массив расчленен на блоки несколькими крупными геологическими нарушениями. Физико-механические характеристики пород и руд рудно-кристаллического комплекса приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Обобщенные показатели свойств пород и руд рудно-кристаллического комплекса

Наименование пород и руд	Удельный вес $\gamma \cdot 10^{-4}$ , Н/м <sup>3</sup>	Объемная масса $\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	Пористость $n$ , %	Угол внутреннего трения, град	Удельное сцепление $C$ , МПа	$\sigma_{сж}$ , МПа	$\sigma_r$ , МПа	Модуль упругости $E \cdot 10^{-6}$ , Па	Коэффициент Пуассона
Руда хлорит-пирит-мартитовая, среднеблочная, плотная	$\frac{3.25-4.70}{3.77}$	$\frac{2.73-3.53}{3.13}$	$\frac{3.08-24.90}{15.70}$	$\frac{41-43}{42}$	$\frac{2.30-17.00}{9.22}$	$\frac{10.23-41.76}{29.77}$	$\frac{1.83-8.42}{5.99}$	$\frac{1.64-2.50}{2.07}$	0.27
Руда гидрогематит-мартитовая, тонкозернистая, крепкая	$\frac{4.29-5.12}{4.70}$	$\frac{3.01-3.84}{3.42}$	$\frac{15.8-29.5}{22.65}$	$\frac{35-42}{39}$	$\frac{2.51-7.00}{4.78}$	$\frac{7.80-31.94}{20.63}$	$\frac{1.71-6.28}{4.00}$	$\frac{2.2-3.0}{2.6}$	$\frac{0.20-0.22}{0.21}$
Руда мартит-железно-слодковая, рыхлая	$\frac{2.98-5.01}{4.38}$	$\frac{2.73-3.90}{3.34}$	$\frac{8.32-29.9}{21.4}$	$\frac{27-38}{34}$	$\frac{0.17-0.40}{0.28}$	$\frac{0.62-1.70}{1.10}$	$\frac{0.17-0.41}{0.27}$	1.3	—
Руда железно-слодково-мартитовая, хлоритизированная	$\frac{4.38-5.01}{4.70}$	$\frac{3.31-3.67}{3.49}$	$\frac{24.4-26.7}{25.6}$	$\frac{36-44}{40}$	$\frac{1.65-1.67}{1.66}$	$\frac{6.35-6.39}{6.37}$	$\frac{0.99-1.64}{1.31}$	$\frac{1.9-4.5}{3.2}$	$\frac{0.17-0.24}{0.20}$
Руда железно-слодково-мартитовая, карбонатизированная, плотная	$\frac{4.47-4.90}{4.68}$	$\frac{3.15-3.63}{3.38}$	$\frac{25.9-29.4}{27.8}$	$\frac{42-43}{42}$	$\frac{3.51-7.20}{5.32}$	$\frac{15.81-23.53}{18.66}$	$\frac{2.54-4.82}{3.48}$	$\frac{3.10-3.92}{3.52}$	$\frac{0.25-0.30}{0.27}$
Сланцы хлорит-серпичитовые, железистые	$\frac{3.20-4.21}{3.72}$	$\frac{2.88-3.12}{3.00}$	$\frac{10.0-28.5}{23.0}$	$\frac{34-42}{37}$	$\frac{5.20-11.70}{9.17}$	$\frac{19.9-50.20}{37.27}$	$\frac{5.34-11.16}{8.71}$	$\frac{2.80-2.95}{2.90}$	$\frac{0.15-0.30}{0.22}$
Железистые кварциты мартит-железно-слодковые	$\frac{3.85-4.02}{3.92}$	$\frac{3.13-3.55}{3.40}$	$\frac{9.0-18.2}{14.8}$	$\frac{38-41}{39.6}$	$\frac{12.46-27.80}{17.35}$	$\frac{55.49-121.3}{76.44}$	$\frac{11.53-24.50}{15.57}$	$\frac{6.0-14.1}{11.3}$	$\frac{0.21-0.28}{0.23}$

Из табл. 1 следует, что свойства руд разного минералогического состава существенно различаются. Хлорит-лимонит-мартитовые, гидрогоматит-мартитовые, железослюдково-мартитовые руды более плотные и прочные. Пределы прочности при сжатии в среднем от 18.6 до 29.7 МПа, углы внутреннего трения 39–42°, сцепление 4.7–9.2 МПа. Прочность железистых кварцитов выше. Низкими показателями характеризуются прочностные свойства железослюдково-мартитовых хлоритизированных и, особенно, рыхлых мартит-железослюдковых руд. Пределы прочности при сжатии последних составляют всего 0.62–1.7 МПа, сцепление 0.13–0.40 МПа, углы внутреннего трения от 22 до 36°.

Возможно и эти, очень низкие, показатели завышены. При отборе образцов самые слабые прослойки разрушаются и не испытываются. При проходке ортов гор. –425 м местами вскрыты прослойки рыхлых руд, представляющих собой слабосвязную, склонную к вывалам массу, требующую возведения крепи до груди забоя и даже опережающего крепления. Такие различия правомерно отнести к VIII категории по классификации М. М. Протодьяконова — “землистые породы”, с коэффициентом крепости 0.6, и даже к IX категории — “сыпучие породы” (0.5).

Все руды месторождения отличаются высокой пористостью. Средние значения пористости находятся в пределах 15.7–27.8 %, для рыхлых руд 21.4 %. По этому показателю можно предварительно прогнозировать характер дилатансионных процессов в рудах. В работе [1] указывается, что при пористости 7.4 % породы обладают отрицательной дилатансией (разрыхляются), при пористости более 18 % — уплотняются. Породы с пористостью от 7.4 до 18 % объем при сдвиге практически не изменяют. В нашем случае сдвиг и другие деформации вокруг выработок будут сопровождаться уплотнением руд. Это обстоятельство затрудняет образование эффективных сил отпора разрушенных пород по контуру свода естественного равновесия и может быть отнесено к числу неблагоприятных факторов, способствующих развитию зоны неупругих деформаций.

Для исследования закономерностей деформирования железослюдково-мартитовой, хлоритизированной руды выполнены ее испытания на жестком прессе по методике, изложенной в [2].

Испытания проводились при одноосном и объемном напряженном состоянии на образцах цилиндрической формы. Размеры образцов: диаметр  $55 \pm 1$  мм, высота  $100 \pm 1$  мм. Непараллельность торцов образца составляла 0.02 мм. Образец с закрепленным на нем датчиком поперечной деформации устанавливали между плитами. Для снятия концентраций напряжений и равномерного распределения их по торцу образца между торцом и верхней давящей поверхностью рамы пресса помещали отожженную фольгу толщиной 0.1 мм. Продольную деформацию измеряли по всей длине образца с помощью балочки с наклеенными тензодатчиками. Продольную и поперечную деформации регистрировали с помощью тензоусилителя “ТОПАЗ-3” с записью на двухкоординатном графопостроителе Н-307.

Для определения нарушенности (трещиноватости) образцов исследуемых пород и влияния ее на механические характеристики проведено ультразвуковое прозвучивание образцов приборами УКП-10 М (частота 60 кГц) и прибором “КАНОН” производства ОЭЗ ВНИМИ (частота 25 кГц). Установлено, что скорость распространения продольных УЗ-волн почти в 3 раза превышает скорость распространения поперечных УЗ-волн. Данные наблюдения скорости распространения УЗ-волн позволяют сделать вывод о наличии естественной трещиноватости вдоль оси образцов по вертикали.

Экспериментальные исследования в условиях сложного напряженного состояния проводились на образцах с естественной влажностью (лабораторной) и гидроизоляцией от проникновения масла, создающего давление в камере с образцом.

Вид напряженного состояния создавался по схеме Кармана ( $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$ ). При анализе результатов использовано дифференциальное нормальное напряжение, определяемое по уравнению

$$\Delta\sigma_1 = \sigma_1 - \sigma_2,$$

где  $\sigma_1$  — главное напряжение;  $\sigma_2$  — давление всестороннего сжатия.

В табл. 2 приведены главные напряжения  $\Delta\sigma_1^{\max}$ ,  $\Delta\sigma_1^{\text{ост}}$  на участке остаточной прочности, коэффициент Пуассона, значения модуля упругости  $E$ , спада  $M$  и напряжения  $\sigma_2$ .

ТАБЛИЦА 2. Результаты исследований прочностных и деформационных характеристик пород. Руда — железнослюдково-мартитовая, хлоритизированная с гидрогематитом, массивного и неяснополосчатого строения, брекчированная трещиноватая

$\Delta\sigma_1^{\max}$ , МПа	$\Delta\sigma_1^{\text{ост}}$ , МПа	$E \cdot 10^{-4}$ , МПа	$\nu$	$M \cdot 10^{-4}$ , МПа	$\sigma_2$ , МПа
10.8	7.0	0.56	0.06	0.15	0
14.2	7.2	0.76	0.10	0.51	0
21.8	14	0.4	0.08	0.26	0
44.5	14.13	1.08	0.19	1.04	0
34.5	12.4	1.15	0.15	0.29	0
6.4	4.7	0.25	0.11	0.11	1
12.5	7.9	0.17	0.08	0.076	2
39.9	28.5	0.41	0.08	0.2	5
12.5	12.5	0.057	—	—	5
14.82	11.02	0.13	—	0.0068	10
33.26	22.68	0.655	—	0.0246	10

*Анализ наблюдений позволяет сделать следующие выводы.*

1. Исследованные руды можно отнести к породам низкой прочности (прочность меньше либо равна 30 МПа).

2. Разрушение образцов руд происходит по формирующимся вертикальным трещинам.

3. Низкие значения коэффициента Пуассона  $\nu$  (определены по нагрузочной кривой) и разброс по скоростям распространения УЗ-волн свидетельствуют о том, что руды весьма трещиноваты, с преимущественным развитием трещин в вертикальном направлении вдоль оси действия главного напряжения  $\sigma_1$ .

4. Поведение руд в условиях напряженного состояния неадекватно даже для пород низкой прочности. В условиях напряженного состояния (давление всестороннего сжатия изменялось от 1 до 15 МПа) прочность образцов практически равна таковой образцов на одноосное сжатие (см. табл. 2), т. е. отсутствует эффект упрочнения от действия давления всестороннего сжатия. Модуль упругости с ростом давления всестороннего сжатия уменьшается. Такое поведение руд в условиях напряженного состояния характерно для пород с хорошо развитой системой трещиноватости и слабосцементированных. Вероятнее всего, что при создании объемного напряженного состояния происходит нарушение целостности образцов и их уплотнение. При сжатии в условиях сложного напряженного состояния происходит дробление образцов с образованием мозаичной структуры, а для слабых руд (высокая пористость, низкие значения скорости распространения УЗ-волн  $\leq 2500$  м/с) характерно дробление до пылеватых обломков.

Результаты экспериментальных исследований образцов гидрогематитовой руды при одноосном сжатии на жестком прессе представлены на рис. 1.

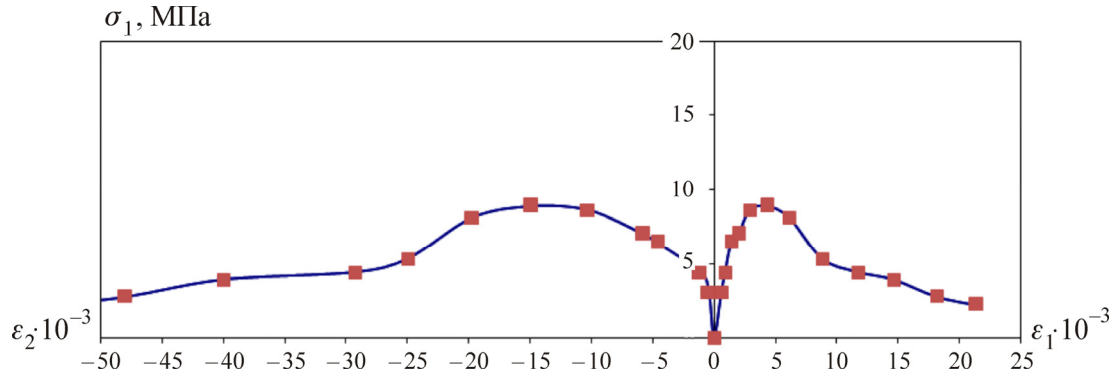


Рис. 1. Экспериментальные зависимости между напряжениями и деформациями для гидрогематитовой руды:  $\varepsilon_1 \cdot 10^{-3}$  — продольные относительные деформации;  $\varepsilon_2 \cdot 10^{-3}$  — поперечные;  $\sigma_1$  — нормальные напряжения сжатия, МПа

Анализ экспериментальных зависимостей между напряжениями и деформациями свидетельствует о том, что в допредельной области она имеет нелинейный характер. На рис. 2 приведена экспериментальная зависимость между наибольшим касательным напряжением  $\tau = 0.5(\sigma_1 - \sigma_3)$  и наибольшей деформацией сдвига в допредельной области.

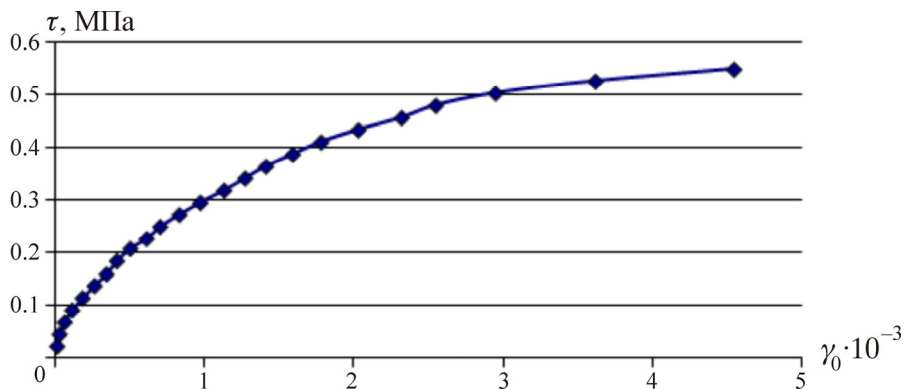


Рис. 2. Зависимость изменения наибольшего касательного напряжения  $\tau$  маргит-железнослюдковой рыхлой руды от наибольшей деформации сдвига  $\gamma_0$

### НАТУРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗА ДЕФОРМИРОВАНИЕМ РУДНОГО МАССИВА ВОКРУГ ВЫРАБОТОК, РАСПОЛОЖЕННЫХ В ПЛОТНОЙ ЖЕЛЕЗНОСЛУДКОВОЙ МАРТИТОВОЙ РУДЕ

Для исследования деформированного рудного массива на гор. –420 м Яковлевского рудника в экспериментальной выработке оборудованы реперные замерные станции контурных и глубинных реперов.

Экспериментальная выработка проведена по простиранию рудного тела, закреплена различными типами крепей. Контурные и глубинные реперы установлены в лежачем и висячем боках рудного тела и в кровле выработок. Глубинные реперы расположены на расстоянии 0.8, 1.3 и 2.0 м от контура. В процессе наблюдений проводились измерения смещений глубинных реперов относительно контурных и конвергенции боков.

Реперная замерная станция на участке экспериментальной выработки сечением  $11.2 \text{ м}^2$  с крепью КМП-А3 размещалась в плотной железослюдковой мартитовой руде. На рис. 3 представлены результаты смещений контура выработки. Наблюдения велись на станции в течение

240 сут после проведения выработки. Наибольшие смещения отмечались на контуре кровли и в среднем превышали величину конвергенции боков выработки на 30 % (рис. 3). Скорость конвергенции боков примерно в 2 раза меньше, чем смещения кровли, и реализуется за более длительный срок (0–90 сут). Смещения контура лежачего бока превышают смещения висячего бока. В интервале 140–240 сут скорость смещения имеет малую величину, но тенденция к росту сохраняется.

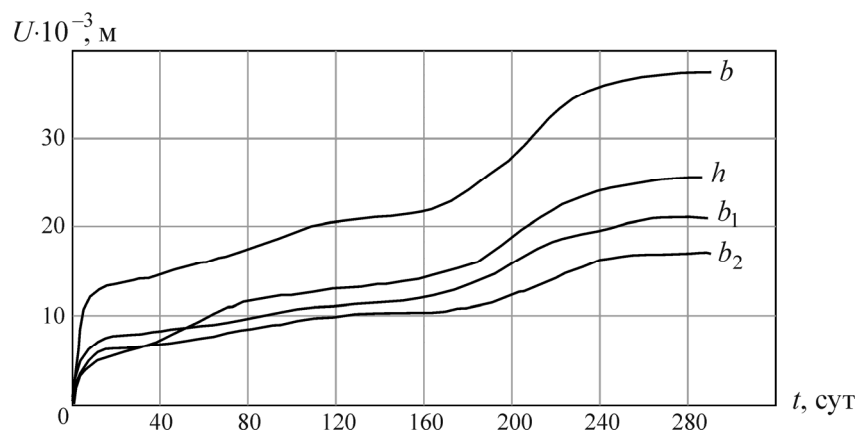


Рис. 3. Средние смещения  $U$  контура экспериментальной выработки сечением в свету  $11.2 \text{ м}^2$ , закрепленной крепью КМП-А3:  $h$  — кровля;  $b_1$  — лежачий бок;  $b_2$  — висячий бок;  $b$  — конвергенция боков

Рудный массив лежачего бока интенсивно разуплотнялся в первые 60–80 сут после проведения выработки, когда реализовывалось 80–90 % смещений (рис. 4). На расстоянии 1.3–2.0 м от контура смещения практически одинаковы и в 2 раза меньше, чем на контуре (рис. 3). Вместе с тем характер процесса смещений различен. На глубине 1.3 м существует тенденция к стабилизации, а на глубине 2.0 м рост смещений сохраняется. В течение 120–160 сут после проведения выработки приконтурная зона размером 0.7–0.8 м смещается с небольшой скоростью как единый массив. На участке 0.8–1.8 м смещения резко уменьшаются. С удалением от контура смещения продолжают уменьшаться, но с меньшей интенсивностью.

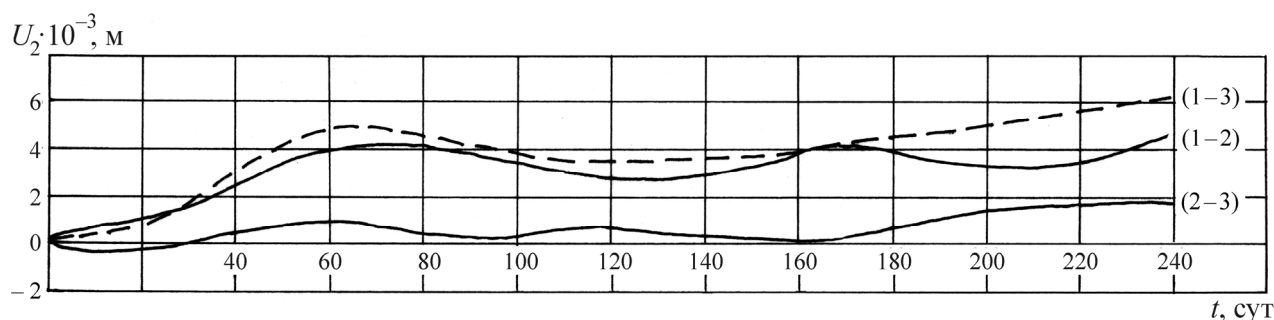


Рис. 4. Абсолютные смещения рудного массива  $U$  на различных участках лежачего бока выработки: (1–2) — участок 0.8–1.3 м; (2–3) — участок 1.3–2.0 м; (1–3) — участок 0.8–2.0 м

После 60 сут на участке 0.8–1.3 м от контура выработки значения абсолютного и относительного разуплотнения рудного массива практически не изменились и составили  $\Delta U = 4.0 - 4.4 \text{ мм}$ ,  $\Delta \varepsilon = (8.2 - 9.0) \cdot 10^{-3}$ , а на участке 1.3–2.0 м возросли. Приведенные данные позволяют прогнози-

ровать размер зоны смещений рудного массива в лежачем боку выработки в 2.6–2.7 м или  $(1.2–1.3)R_{пр}$ .

Вид и интенсивность деформации рудного массива изменяется с глубиной и во времени (см. рис. 4). Так, если на участке 0.8–1.3 м от контура выработки рудный массив уплотняется, то на участке 1.3–2.0 м — разуплотняется. С течением времени вид деформации меняется на противоположный с уменьшением ее силы, что выражается в волнообразном характере деформирования рудного массива во времени и с удалением от контура выработки.

Процесс смещений контура висячего бока выработки имеет три периода времени с различными видами деформации рудного массива (см. рис. 3). Период 0–30 сут характеризуется ростом смещений до 3 мм с тенденцией снижения скорости. В этот период скорость смещений вначале возросла практически в 2 раза, затем уменьшилась к концу периода. Смещения возросли в 3 раза — до 8 мм. В последующие 90–240 сут рост смещений незначительный (на 1 мм) и с постоянной скоростью. Наблюдения за смещением рудного массива висячего бока выработки велись в течение 120 сут. До установки замерной станции приконтурный слой рудного массива разуплотнился. В последующие 10 сут деформация разуплотнения сменилась деформацией уплотнения с дальнейшим (10–30 сут) снижением интенсивности деформации и переходом в деформацию разуплотнения (рис. 5).

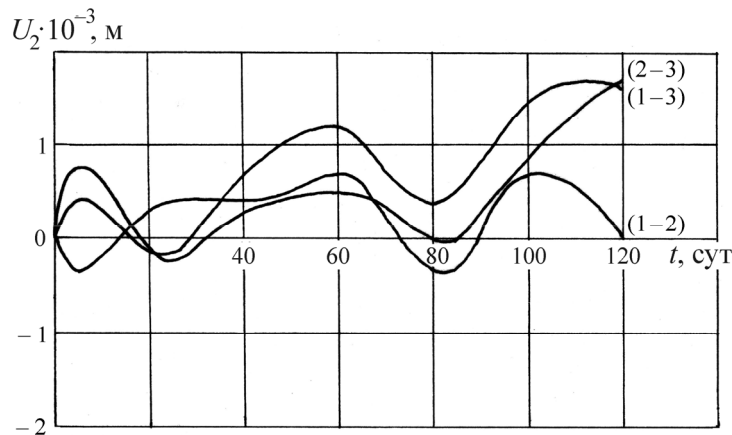


Рис. 5. Абсолютные смещения  $U$  рудного массива висячего бока экспериментальной выработки на расстоянии от контура: (1–2) — участок 0.8–1.3 м; (2–3) — участок 1.3–2.0 м; (1–3) — участок 0.8–2.0 м

Сохраняется волнообразный характер смещения рудного массива. С удалением от контура выработки изменяется вид деформации рудного массива (рис. 5). Так, на участке 0.8–1.3 м в начальный период рудный массив уплотнялся и одновременно на участке 1.3–2.0 м — разуплотнялся. С течением времени на рассматриваемых участках вид деформаций сменился на противоположный.

В период 25–90 сут приконтурная зона не менее 2 м уплотнялась. Наиболее интенсивная деформация уплотнения зафиксирована на расстоянии 0.8–1.3 м от контура выработки. Скорость деформирования на участке 0.8–2.0 м изменялась во времени, оставаясь практически постоянной по длине участка.

Характер смещений и деформации вмещающего рудного массива позволит прогнозировать размер зоны деформаций в 2.8–3.0 м или  $(1.3–1.4)R_{пр}$  (рис. 6).

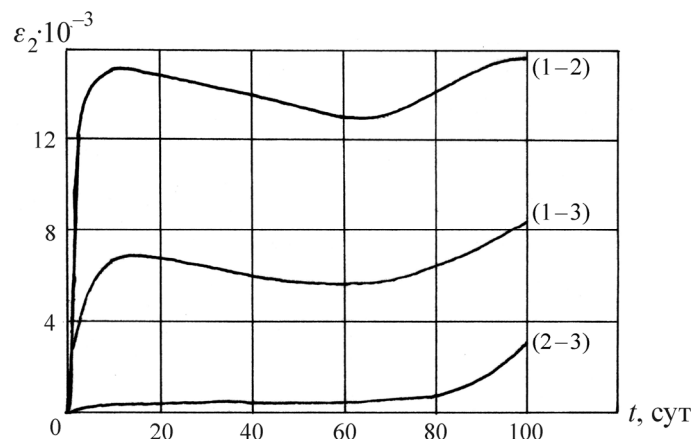


Рис. 6. Относительные деформации  $\epsilon$  рудного массива кровли экспериментальной выработки на расстоянии от контура: (1–2) — участок 0.8–1.3 м; (2–3) — участок 1.3–2.0 м; (1–3) — участок 0.8–2.0 м

Процесс смещения контурного репера кровли аналогичен смещениям висячего и лежащего боков выработки. Также можно выделить три характерных периода времени: 0–20, 20–120 и 120–240 сут (см. рис. 3). Наибольшая скорость смещения отмечена в первые 10 сут после проведения выработки, когда реализовалось практически 50 % смещений. В дальнейшем скорость сдвигов уменьшилась более чем в 2 раза и наметилась тенденция к их стабилизации.

В зоне смещений рудный массив кровли разуплотнялся при сохранении волнообразного характера деформаций (рис. 6). В первые 10 сут после проведения выработки на участке 0.4–0.9 м рудный массив практически не деформировался при одновременном росте деформаций на участке 0.8–1.3 м. Через 80–90 сут смещения контурного репера относительно реперов на глубине 0.8 м резко возросли и вызвали интенсивное разуплотнение массива. На расстоянии более 1.0–1.2 м от контура выработки скорость смещений значительно снизилась (рис. 3). Относительные деформации на участках 0.4–0.9 и 0.9–1.6 м различаются в 2 раза. Это объясняет также неработоспособность репера на расстоянии 0.9 м от контура выработки из-за свободного перемещения его на 100–150 мм вдоль шнура.

Таким образом, приконтурная зона размером 1.0–1.2 м подвержена деформациям растяжения, близким к разрушающим. Размер зоны деформации рудного массива оценивается в 2.2–2.4 или  $(1.0–1.1)R_{пр}$ .

#### ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ВОКРУГ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ЯКОВЛЕВСКОГО РУДНИКА

Приведенные закономерности деформирования руд (см. рис. 1, 2), полученные при испытаниях на жестком прессе, показывают, что зависимости между напряжениями и деформациями нелинейные.

Для практики представляет интерес нахождение наибольшей концентрации тангенциальных напряжений на контуре выработок при использовании нелинейных зависимостей. Это позволит оценить область применимости модели физически нелинейного тела, найти реальные значения коэффициентов концентрации напряжений на основе нелинейной диаграммы между напряжениями и деформациями и в конечном итоге, вследствие снижения этих коэффициентов, уменьшить затраты на обеспечение устойчивости горных выработок.



Для исследования напряженно-деформированного состояния массива вокруг горных выработок за пределом упругости наибольшее распространение получила в настоящее время деформационная теория пластичности:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \psi(\sigma_1 - \sigma_2); \quad \varepsilon_2 - \varepsilon_3 = \psi(\sigma_2 - \sigma_3); \quad \varepsilon_3 - \varepsilon_1 = \psi(\sigma_3 - \sigma_1),$$

где  $\psi$  — скалярная функция, определяемая на основе экспериментальных данных;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  — главные деформации;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  — главные напряжения.

Анализ экспериментальных данных (рис. 1, 2) о деформировании пород в условиях объемных напряженных состояний показывает, что зависимость между наибольшим сдвигом  $\gamma$  и максимальным касательным напряжением  $\tau$  для деформационной теории пластичности может быть записана выражением

$$\gamma = 2B\tau^{m+1}, \quad (1)$$

где  $B, m$  — постоянные.

В этом случае на основании аппроксимации (1) значение скалярной функции  $\psi = B\tau^{m+1}$ .

Перейдем к наблюдению напряженно-деформированного состояния вокруг выработок основных форм поперечных сечений, заложенных в нелинейном изотропном массиве с начальным гидростатическим напряженным состоянием. Задача сводится к изучению напряженного состояния в бесконечной плоскости с отверстием, сжимаемой усилиями  $\gamma H$  на бесконечности, где  $\gamma$  — средний удельный вес толщи пород;  $H$  — глубина заложения выработки.

В работе [2] методом малого параметра исследовано напряженное состояние физически нелинейного массива вокруг выработок круглой, эллиптической, сводчатой, квадратной и полигональной форм поперечного сечения.

Для выработки круглой формы поперечного сечения, сооружаемой в физически нелинейном массиве с начальным гидростатическим напряженным состоянием, компоненты радиального  $\sigma_r$  и тангенциального  $\sigma_\theta$  напряжений имеют вид

$$\sigma_r = \gamma H - (\gamma H - p)r^{-\frac{2}{1+m}}; \quad \sigma_\theta = \gamma H + (\gamma H - p)\left(\frac{1-m}{1+m}\right)r^{-\frac{2}{1+m}},$$

где  $r$  — безразмерная радиальная координата;  $p$  — отпор крепи.

Коэффициент концентрации напряжений  $K$  на контуре выработки зависит от показателя нелинейности  $m$  и отпора крепи:

$$K = \frac{\sigma_\theta}{\gamma H} = \frac{2}{1+m} - \frac{1-m}{1+m} \frac{p}{\gamma H}.$$

Найдем коэффициент концентрации напряжений для выработки, сооружаемой в железно-сланцевых рыхлых рудах (рис. 2). Из аппроксимации (1) экспериментальной зависимости (рис. 2) следует, что  $m = 1.16$ . Тогда  $K$  при  $p = 0$  будет равен  $K = 0.92$ , т. е. концентрации тангенциальных напряжений не будет.

Данный результат имеет большое практическое значение и подтверждается практикой поддержания выработок. При весьма слабых рудах, предел прочности которых на одноосное сжатие изменяется от 1.1 до 6.4 МПа, выработки на глубине 600 м должны быть разрушены. Однако они находятся в удовлетворительном состоянии и эксплуатируются несколько лет.

#### ВЫЯВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА ДЕФОРМИРОВАНИЯ РЫХЛЫХ РУД ВОКРУГ ВЫРАБОТОК

Для определения характера деформирования рыхлых руд вокруг выработок проведены специальные экспериментальные исследования. Результаты натурных наблюдений за состоя-

нием обнажений кровли экспериментальной выработки в рыхлых рудах показывают, что контур обнажений имеет форму вертикального свода (рис. 7). Поэтому для расчета нагрузок на крепь выработок в рыхлых рудах можно воспользоваться теорией свода.

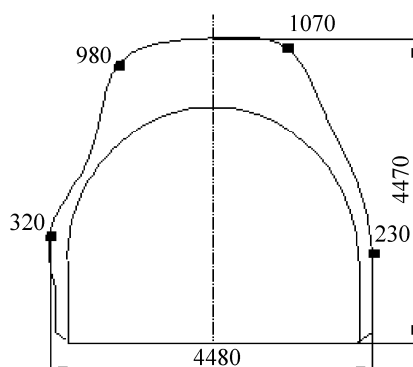


Рис. 7. Очертание обнажения контура горной выработки

Предельное состояние рыхлых руд в объемном напряженном состоянии, согласно экспериментальным исследованиям, описывается условием прочности Кулона.

Высота свода обрушения над выработкой в рыхлых рудах естественной влажности, согласно П. М. Цимбаревичу, определяется по формуле

$$h_c = \frac{B}{2 \operatorname{tg} \beta}, \quad (2)$$

где  $B$  — ширина выработки;  $\beta$  — кажущийся угол внутреннего трения, связанный с углом внутреннего трения зависимостью

$$\frac{C}{\sigma_n} + \operatorname{tg} \rho = \operatorname{tg} \beta. \quad (3)$$

Для получения соотношения (3) используем натурные наблюдения за размером свода предельного состояния, полученные в экспериментальной выработке в рыхлых рудах на гор. – 420 м Яковлевского рудника.

В табл. 3 приведены измеренные в натуре ширина свода выработки  $B$ , его высота  $h_c$  и их соотношение. Измерения выполнены зондированием закрепного пространства выработки, закрепленного крепью КМП-А-3 сечением в свету  $18.8 \text{ м}^2$ , пролетом вчерне  $5.1 \text{ м}$  и высотой свода вчерне  $1.84 \text{ м}$ . Из данных табл. 3 следует, что  $h_c = 0.42B$ .

Наличие влаги приводит к снижению прочностных характеристик руд.

Для оценки характеристик сцепления и угла внутреннего трения для железнослюдково-мартитовых и мартитовых руд во времени (Р. Э. Дашко) проведены их испытания при влажности от  $10$  до  $16.5 \%$ . Испытания до  $0.5$  мес выполнены на образцах, отобранных в выработках, испытания через  $1.5$ – $2$  мес и более — на образцах после их хранения и водонасыщения. Результаты проверок на образцах богатых рыхлых руд, отобранных из транспортного орта при влажности ( $11.4$ – $13.6 \%$ ), показали, что сцепление  $C = 0.52$ – $0.57 \text{ МПа}$ , а угол внутреннего трения  $\rho = (8$ – $9)^\circ$ .

Найдем значение  $\operatorname{tg} \beta$  кажущегося угла внутреннего трения по формуле (3) для влажных рыхлых руд при  $C = 0.28 \text{ МПа}$  и  $\rho = 6^\circ$ . Расчет по вышеприведенной методике показывает, что для указанных значений  $C$  и  $\rho$   $\operatorname{tg} \beta = 0.72$ . При данном угле  $\beta$  соотношение между шириной выработки и высотой свода обрушения, найденное по формуле (2), составляет  $h_c = 0.69B$ .

ТАБЛИЦА 3. Натурные данные высоты свода обрушения

Порядковый номер арки от орта № 2	Ширина свода выработки в проходке $B_{\phi}$ , м	Высота свода $h_c$ , м	Соотношение $h_c / B_{\phi}$
2	6.50	2.70	0.42
4	6.54	2.88	0.43
6	6.78	2.43	0.42
8	6.04	2.46	0.41
10	6.21	2.95	0.47
22	6.29	2.69	0.43
24	6.38	2.80	0.44
26	6.88	2.88	0.42
28	6.38	2.41	0.38
Среднее значение			0.42

По теории свода вертикальная равномерно распределенная нагрузка  $P_b$  на поддерживающую крепь горных выработок находится по формуле  $P_b = 2/3\gamma h_c$ .

Горизонтальная равномерно распределенная нагрузка  $P_2$  на поддерживающую крепь определяется так:  $P_2 = \gamma(h_c + 0.5h)tg^2(45 - \beta/2)$ , где  $h$  — высота выработки.

#### ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ВЫРАБОТОК И ВЫБОР ТИПОВ И ПАРАМЕТРОВ КРЕПИ

В настоящее время известно много критериев оценки устойчивости обнажений [3], предложенных различными авторами, всю совокупность которых можно разделить на два класса. К первому классу относятся критерии, основанные на прочностном расчете устойчивости обнажений выработок, т. е. на оценке их прочности; ко второму — критерии, основанные на деформационном подходе, т. е. оценка устойчивости производится по величине предельных деформаций или перемещений контура выработок.

Смещения пород в выработках для рудных месторождений намного меньше их значений для пластовых месторождений, где они могут достигать десятки сантиметров.

В СНиП II-94-80 для оценки устойчивости горизонтальных выработок принят деформационный критерий, поскольку перемещения контура значительны. Прочностной критерий принят как показатель устойчивости вертикальных выработок.

Наибольшее распространение для оценки устойчивости обнажений выработок при разработке рудных месторождений получил прочностной критерий. По нашему мнению, это объясняется тем, что смещения пород в выработках относительно небольшие, а их устойчивость определяется прочностью, структурными особенностями и трещиноватостью массива пород.

Состояние статической устойчивости незакрепленной горной выработки будем оценивать критерием напряженности элементов выработки (кровли и боков), выражающим соотношение в них расчетных напряжений (числитель) и расчетной прочности (знаменатель) [4, 5]:

$$\Pi_B = \frac{\sigma K_1 K_2}{RK_c \xi_B},$$

где  $\sigma$  — статическое вертикальное напряжение в нетронутым массиве в месте расположения выработки, МПа;  $K_1$  — коэффициент концентрации напряжений вследствие проведения выработки;  $K_2$  — коэффициент изменения напряжений в результате влияния других выработок;

$R$  — среднее значение сопротивления пород в образце одноосному сжатию при кратковременном нагружении, МПа;  $K_c$  — коэффициент структурного ослабления массива за счет трещиноватости, слоистости и микронеоднородности, определяемой по СНиП II-94-8;  $\xi_v$  — коэффициент, учитывающий снижение сопротивления породы вследствие водонасыщения и равный отношению пределов прочности в водонасыщенном и естественном состояниях.

Типы и параметры крепей подготовительных выработок в зависимости от категории устойчивости рудного массива приведены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. Типы и параметры крепи подготовительных выработок в рудном массиве

№ п/п	Величина $P_v$ , категория и состояние устойчивости пород	Типы и параметры постоянной крепи
1	$P_v < 1.0$ I категория — устойчивое состояние	Постоянная крепь не требуется. Регулярные осмотры состояния выработок с оборкой контура в местах заколообразований. На участках вероятного заколообразования — анкерная крепь по кровле из анкеров Swellex длиной 1.8 м с опорными плитками и металлической сеткой-затяжкой по кровле. Сетка анкерования от 0.9×0.9 до 1.1×1.1 м
2	$P_v = 1.0 - 1.3$ II категория — предельное состояние	Анкерная крепь с металлической сеткой-затяжкой по кровле и бокам выработки. Анкеры типа Swellex длиной 1.8 м. Сетка анкерования от 0.7×0.7 до 1.0×1.0 м. Расстояние от нижнего ряда анкеров до почвы выработки до 1.2 м. Металлическая арочная податливая крепь типа КМП-А3 из спецпрофиля СВП с металлической решеткой-затяжкой и забутовкой закрепного пространства. Шаг арок 1.0 м. Металлическая рамная трапециевидная крепь из СВП с затяжкой из арматурной сетки из арматуры А-II, А-III $\varnothing 10 - 12$ мм. Шаг рам 0.75 м
3	$P_v = 1.3 - 3.0$ III категория — неустойчивое состояние	Металлическая арочная податливая крепь типа КМП-А3 из СВП-22 и СВП-27 с металлической решетчатой затяжкой кровли и боков. Забутовка закрепного пространства. Шаг арок от 0.75 м до 1.0 м. Металлическая трапециевидная рамная крепь из СВП-22, СВП-27 с затяжкой кровли и боков выработки. Шаг рам 0.5 – 1.0 м. Комбинированная анкерная крепь с подхватами и с металлической сеткой-затяжкой по кровле и бокам выработки. Анкеры типа Swellex длиной 1.8 м. Сетка анкерования от 0.7×0.7 до 0.8×0.8 м. Расстояние от нижнего ряда анкеров до почвы выработки до 1.0 м
4	$P_v > 3.0$ IV категория — весьма неустойчивое состояние	Металлическая арочная крепь со сварной металлической решетчатой затяжкой и забутовкой закрепного пространства. Применение предохранительной крепи. Расстояние между арками 0.5 – 0.75 м. Элементы крепи из СВП-22, СВП-27 с опорными площадками под стойки. Межрамные стяжки (стойки, верхняк). Металлическая трапециевидная крепь из СВП-22, СВП-27 со сварной металлической решетчатой затяжкой и забутовкой закрепного пространства. Предохранительная крепь. Шаг рам 0.5 м. Опорные площадки под стойки, 3 – 4 межрамные стяжки. В зонах тектонических нарушений, в зонах контакта рыхлых и плотных руд и в зонах значительного водопритока металлическая арочная крепь (см. п. 1) с применением передовой крепи

Приведенные типы и параметры крепей приняты техническим руководством Яковлевского рудника, включены в технический регламент по креплению и обеспечивают устойчивость горных выработок.

#### **ВЫВОДЫ**

Приведены экспериментальные данные по прочностным и деформационным характеристикам различных типов руд. Представлены результаты натурных исследований по деформированию рудного массива вокруг горных выработок.

Определены критерии для оценки устойчивости обнажений выработок Яковлевского рудника и зависимости для расчета вертикальных и горизонтальных нагрузок на их крепь в рыхлых рудах, основанные на теории свода. Предложены типы и параметры крепей выработок рудного массива.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Ставрогин А. Н., Протосеня А. Г.** Механика деформирования и разрушения горных пород. — М.: Недра, 1992.
2. **Ставрогин А. Н., Протосеня А. Г.** Пластичность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. — М.: Недра, 1985.
3. **Булычев Н.С., Амусин Б. З., Оловянный А. Г.** Расчет крепи капитальных горных выработок. — М.: Недра, 1974.
4. **Инструкция** по выбору крепи для подготовительных и горизонтальных выработок и шахт ОАО “Севералюкситруд” / СПГТИ. — СПб., 2010.
5. **Трушко В. Л., Протосеня А. Г., Матвеев П. Ф., Совмен Х. М.** Геомеханика массивов и динамика выработок глубоких рудников. — СПб.: Наука, 2000.

*Поступила в редакцию 21/III 2013*