

## ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ БОГАТЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД ЯКОВЛЕВСКОГО РУДНИКА (КМА)

Яковлевское месторождение КМА известно большими запасами и высоким качеством железных руд, которые являются продуктом химического выветривания железистых кварцитов в допалеозойское время. Богатые железные руды (БЖР) представляют собой недоуплотненные разности с высокой пористостью и даже макропористостью. Глубина их залегания более 500 м. В статье проведен анализ гранулометрического состава, физических свойств и параметров прочности различных типов БЖР. Выполнен расчет допустимого гидродинамического напора с учетом мощности целика (53 м) при различной ширине пролета одиночной выработки. Дан прогноз времени перетекания подземных вод из вышележащего нижнекаменноугольного водоносного горизонта на горизонт –370 м. Сделаны выводы о негативном влиянии перетекания подземных вод, приводящем к вторичному увлажнению БЖР, резкому снижению их прочности, что создает условия для формирования прорывов.

The Yakovlevsky deposit of the Kursk Magnetic Anomaly (KMA) is characterized with large reserves and high grades of iron ores which are products of chemical weathering of ferruginous quartzites in Pre-Paleozoic period. High-grade iron ores (HGIO) are non-compacted variations with high porosity and even macroporosity. Their occurrence depth is over 500 m. The article analyses granulometric composition, physical properties and strength parameters of various high-grade iron ore types. Acceptable level of hydrodynamic pressure is calculated with the view of the pillar width, which is equal to 53 m, and various widths of individual working spans. Forecast time of underground waters penetration from the overlying Low Carboniferous aquifer horizon to the -370 m horizon is calculated. Conclusions are made on negative impact of underground waters penetration which leads to secondary watering of the high-grade iron ores, a sharp decrease in their durability that creates preconditions for inrush formation.

Яковлевское месторождение расположено в юго-восточной части КМА. Рудная залежь общей протяженностью до 75 км располагается на западном крыле синклинальной складки, имеющей крутое восточное падение под углом 70-80°. Наиболее детально месторождение изучено в пределах 10 км вблизи с. Яковлево. Строение рудного тела имеет сложный характер, основная масса руд образует мощное клинообразное тело, прослеживаемое на глубину до 500 м, считая от кровли архей-протерозойских пород, которые перекрыты мощным чехлом палеозойских и мезо-кайнозойских отложений.

Богатые железные руды – продукт химического выветривания железистых квар-

цитов в допалеозойское время – представляют собой недоуплотненные разности, в которых процессы растворения и выщелачивания силикатов способствовали достаточно высокой пористости и в отдельных случаях даже макропористости.

Для оценки устойчивости БЖР, прежде всего, необходимо остановиться на характеристике гранулометрического состава, физического состояния и параметров прочности исследованных руд. Для гранулометрического состава руд свойственно преобладание фракций крупной пыли (0,05-0,01 мм) от 50 до 79 %, что позволяет отнести их к образованиям, для которых характерны пльвинные свойства при отсутствии в них цементационных связей.

Показатели физических свойств БЖР нами определялись на образцах ненарушенного сложения, отобранных из экспериментальной выработки и транспортного орта. Следует отметить высокую пористость: в осушенных рудах в условиях их разуплотнения может превышать 50 %.

Остаточные влажности после дренирования БЖР варьируют в довольно широких пределах – от 4,1 до 10,8 %, что свидетельствует о различной степени гидрофильности руд, которая определяет их способность к полному осушению.

Для оценки прочности осушенных образцов БЖР ненарушенного сложения были проведены испытания по определению параметров сопротивления руд сдвигу (угол внутреннего трения и сцепление). Угол внутреннего трения для БЖР в осушении составил 23°. Это свидетельствует об относительном

постоянстве гранулометрического состава испытанных руд. Сцепление варьировало (0,025-0,8 МПа) в зависимости от прочности остаточных структурных связей, положения слоистости по отношению к направлению сдвигающего усилия, а также плотности, характеризующей плотностью скелета руды. Следует отметить, что в неосушенных рудах ненарушенного сложения угол внутреннего трения БЖР снижается до 8°, вторичное увлажнение таких осушенных руд приводит к образованию пльвунов. Исследование сжимаемости богатых руд в условиях одноразмерного сжатия без возможности бокового расширения показало сложный характер зависимости модуля общей деформации от показателей физических свойств руд, а также характера и длительности увлажнения в нагруженном состоянии. Сравнительная оценка деформационных характеристик осушенных и увлажненных БЖР представлена в табл.1.

Таблица 1

Сравнительная оценка значений деформационных характеристик осушенных и вторично увлажненных БЖР

Ветвь загрузки при интервале давлений, МПа	Модуль общей деформации $E_0$ , МПа			
	Осушенные образцы		Водонасыщенные образцы после уплотнения	
	2	3	2	3
0-0,2	6,1	3,6	16,0	8,4
0,2-0,6	14,0	9,5	18,2	15,4
0,6-1,7	21,2	13,8	48,3	28,0

На состояние и параметры свойств БЖР большое влияние оказывает жизнедеятельность микроорганизмов, которые были обнаружены в результате проведенных работ в 2003-2005 гг. Микроорганизмы и продукты их метаболизма обычно сорбируются на поверхности минеральных частиц, омываемых поровым раствором, а также внутри агрегатов частиц, являясь одним из компонентов их структуры. Формирующиеся бактериальные пленки обволакивают частицы породы, тем самым снижая угол внутреннего трения руд  $\phi$  с высоким содержанием фракции 0,05-0,002 мм, что подтвердилось результатами исследований:

$\phi$	Состояние руды и БМ
$\leq 6-7^\circ$	Увлажненная, БМ более 100 мкг/г
$10-15^\circ$	Увлажненная, БМ 100-50 мкг/г
$20-23^\circ$	Воздушно-сухая, БМ менее 50 мкг/г

**Примечание.** Угол внутреннего трения определяли методом медленного сдвига переуплотненных образцов в одноплоскостном срезном приборе.

Угол внутреннего трения увлажненной руды при содержании бактериальной массы (БМ) более 100 мкг/г в 3-4 раза меньше, чем у руды в воздушно-сухом состоянии. БМ определялась по методу Бредфорда\* (табл.2).

\* Bradford M.M. A Rapid and sensitive method for the Quantitation of microgram Quantities of Protein Utilising the Principle of Protein Dye Binding // Ann. Biochem., 1976. Vol.72. P.248-254.

Показатели сопротивления сдвигу БЖР ненарушенного сложения в зависимости от их микробной пораженности

Сцепление $c$ , МПа	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град.	Место отбора образцов	БМ, мкг/г	Материал
0,53	8°	Транспортный орт	71,0-123,1	Образцы естественной влажности
0,25-0,8	23	Экспериментальная выработка	33,2-35,0	Осушенные образцы
0,22	< 8	То же	90,0-110,2	Вторично увлажненные образцы

С целью обеспечения устойчивости выработок особенно важным является определение безопасной мощности целика между кровлей подземной выработки и подошвой нижнекаменноугольного водоносного горизонта. Градиент напора определяет гидродинамическое давление как силовое воздействие на разделяющий целик. Определение предельного напора  $H_{пр}$  было выполнено по формуле В.А.Мироненко – В.М.Шестакова

$$H_{пр} = \frac{m}{\gamma_v} \left( \gamma + \frac{2c}{b - \operatorname{tg}\varphi m \zeta} \right),$$

где  $m$  – мощность целика, разделяющего одиночную выработку от напорного горизонта,  $m = 53$  м;  $\gamma_v$  и  $\gamma$  – объемные веса воды и пород (руд) целика соответственно;  $c$  и  $\varphi$  – параметры сопротивления сдвигу пород целика: сцепление и угол внутреннего трения;  $\zeta$  – коэффициент бокового давления в толще пород (руд), измеренный *in situ*,  $\zeta = 0,67$ ;  $b$  – ширина одиночной выработки.

Расчет предполагает, что деформации целика развиваются в форме поперечного сдвига. Такие деформации обычно происходят, когда ширина одиночной выработки соизмерима или значительно меньше мощности целика. Последний вариант рассматривается в нашем случае. Этот метод расчета позволяет получить наиболее высокие значения критических (предельных) напоров, при превышении которых возрастает вероятность прорывов вод из неосушенного нижнекаменноугольного горизонта.

Расчетные параметры сопротивления сдвигу брались по результатам эксперимен-

тальных исследований. При варьировании параметра сцепления вторично увлажненных БЖР (ширина пролета выработки 13 м, плотность руды  $3 \text{ т/м}^3$ ) с действующим напором  $H_d \geq 440$  м получены следующие значения  $H_{кр}$ :

Сцепление, МПа	Предельно допускаемый напор подземных вод $H$ , м
0,22	~ 450,5
0,15	~ 358
0,025	192

При проектной ширине выработки 13 м прорыв подземных вод только в полностью осушенном рудном теле невозможен. Однако вторичное увлажнение БЖР создает условия для реализации прорыва подземных вод из нижнекаменноугольного водоносного горизонта при неблагоприятном разрезе толщи, который преобладает в разрезе БЖР. Расширение фронта горных работ и разуплотнение БЖР в кровле выработки способствуют увеличению площади перетекания подземных вод из нижнекаменноугольного водоносного горизонта на горизонт – 370 м.

Расчет времени перетекания  $t$  (табл.3) может быть выполнен по формуле Цункера

$$t = \frac{n\Delta H}{K} \left[ \frac{m}{\Delta H} - \ln \left( 1 + \frac{m}{\Delta H} \right) \right],$$

где  $n$  – пористость руд;  $\Delta H$  – действующая разность напоров в нижнекаменноугольном и рудно-кристаллическом горизонтах;  $K$  – коэффициент фильтрации;  $m$  – мощность целика.

Таблица 3

**Расчет времени перетекания подземных вод  
из нижнекаменноугольного горизонта  
на горизонт –370 м**

Мощность целика $m$ , м	Пористость БЖР $n$ , %	Коэффициент фильтрации $K$ , м/сут	Время перетекания $t$ , сут
53	40	0,04	44
	45	0,005	396
	50	0,008	275
60	35	0,004	1100
	40	0,001	1760
	50	0,002	1100

**Примечание.** Расчет произведен при  $\Delta H = 440$  м.

Результаты расчета времени перетекания подтверждают, что даже минимальные коэффициенты фильтрации не обеспечивают гарантии отсутствия вторичного увлажнения БЖР в период отработки рудного тела в первые годы при функционировании выработок на горизонте – 370 м. Следовательно, в пределах участка первоочередной отработки необходима организация гидрогеохимического мониторинга по установлению первых характерных признаков перетока воды из нижнекаменноугольного водоносного горизонта: присутствие  $H_2S$ , снижение содержания хлоридов и уменьшение минерализации воды. В таких зонах необходима организация усиленного дренажа рудного тела.

Научный руководитель д.г.-м.н. проф. Р.Э.Дашко