

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОРЫВОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ИЗ НИЖНЕКАМЕННОУГОЛЬНОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА В ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ ЯКОВЛЕВСКОГО РУДНИКА

Рассмотрены общие положения возможности формирования прорывов вод при ведении горных работ под водными объектами, в том числе неосушенными водоносными горизонтами. Приведен пример аварийных ситуаций при проходке подземных выработок ниже уровня моря. Выполнены расчеты допустимых напоров с использованием реальных характеристик прочности БЖР и проектных пролетов одиночных выработок. Показано, что только в условиях полного осушения руд можно гарантировать устойчивость потолочины при ведении горных работ на горизонте –370 м. Рассчитано возможное время перетекания вод из нижнекаменноугольного водоносного горизонта в рудную толщу. Предложена организация специального мониторинга перетекания подземных вод по гидрохимическим показателям.

General conditions of an opportunity of water breakouts formation during the mining operations under water objects, including not drained aquifers are considered. The example of emergencies during tunnel construction below sea level is given. Permissible water pressures calculations with using of real parameters high grade iron ore sear strength and design span of single mine working are executed. It is shown, that only in conditions of full ores drainage it is possible to guarantee of sailing stability during mining on horizon –370 m. Possible time of water overflowing from low-carbonous aquifer to the ore body is calculated. The organization of special monitoring of water overflowing on hydrochemical parameters is offered.

В настоящее время разработка Яковлевского месторождения богатых железных руд (БЖР) ведется при условии дренирования только рудного тела опережающими горизонтальными либо наклонными самоизливающимися скважинами. Осушение высоконапорных водоносных горизонтов, расположенных над рудной залежью, не предусматривается. Непосредственно над рудным телом прослеживается нижнекаменноугольный водоносный горизонт, напоры в котором достигают 440 м. Между водоносным горизонтом и залежью отсутствуют выдержанные водоупорные слои. Существование прямой гидравлической связи между водоносным горизонтом и рудным телом предполагает возможность активного перетекания подземных вод и вторичного увлажнения богатых железных руд, что будет способствовать существенному снижению их

прочности и соответственно повышению вероятности формирования прорывов.

Проходка подземных горных выработок и последующая выемка полезного ископаемого под неосушенными водоносными горизонтами аналогична ведению горных работ под водными объектами и всегда сопряжена с определенными осложнениями. Основная причина этих осложнений связана с увеличением водопроницаемости подрабатываемой толщи в результате сдвижения горных пород и, соответственно, с вероятностью прорывов воды из водных объектов или водоносных горизонтов в горные выработки.

Для безопасной добычи полезного ископаемого под водными объектами требуется аргументированный выбор системы отработки, а также необходимость проведения предварительного прогноза возможных прорывов воды в разрабатываемые горизонты.

Выбор того или иного способа отработки полезного ископаемого в значительной степени может определяться особенностями гидрогеологических условий месторождения.

При эксплуатации Яковлевского железорудного месторождения планируется применение системы горных разработок с закладкой выработанного пространства быстротвердеющим материалом. Подобный метод отработки месторождения способствует предотвращению интенсивного сдвижения подрабатываемых толщ, предупреждает разуплотнение и трещинообразование в породах кровли. Соответственно, закладка выработанного пространства снижает вероятность прорывов подземных вод в горные выработки и существенно сказывается на уменьшении водопритоков в рудник. Опыт привлечения полной закладки в европейских шахтах свидетельствует о возможности значительного повышения безопасности подземных горных работ, проводимых в весьма сложных гидрогеологических условиях, и сокращения интенсивности сдвижения поверхности на 70-90 % [1].

При разработке месторождений полезных ископаемых в сложных горно-геологических условиях первоочередная проблема сводится к прогнозированию возможности внезапных прорывов в отрабатываемые подземные выработки. При этом основным фактором, определяющим степень опасности прорывов воды, в первую очередь являются защитные свойства «потолочины», отделяющей горные выработки от подошвы водоносных горизонтов с высокими напорами.

При разработке месторождений подземным способом активно проявляются процессы деформации и сдвижения значительного объема пород при ведении очистных работ. Характер и интенсивность таких деформаций зависят, прежде всего, от размеров выработки, степени ее закладки, а также от прочности пород потолочины и материала закладки.

Например, наблюдения за развитием деформационных процессов при разработке угольных месторождений свидетельствуют о возможности развития трещин на весьма значительную высоту от кровли очистной

выработки. При этом трещины могут пересекать все вышележащие слои до подошвы неосушенного водоносного горизонта или водного объекта и, соответственно, обеспечить водоприток в выработку в недопустимых объемах.

При отработке полезного ископаемого с частичным или полным обрушением кровли образование трещин в кровле подработанного массива горных пород в значительной степени зависит от их физико-механических свойств и вынимаемой мощности пласта.

Практика наблюдений за прорывами вод в подземные выработки свидетельствует о том, что основной поток направлен по трещинам с достаточно большим их раскрытием, либо при фильтрационном выносе заполнителя из трещин, когда формируются зоны сквозных полостей и пустот. Наиболее показателен в этом случае опыт проходки подводного тоннеля Сейкан в Японии между островами Хоккайдо и Хонсю под проливом Цугару. В процессе строительства тоннеля наблюдалось четыре прорыва морских вод (I-IV). Все аварийные участки были приурочены к тектоническим разломам и в тоннельную выработку поступала морская вода.

Используя данные таблицы, можно ориентировочно оценить коэффициент фильтрации пород зоны прорыва с учетом значений водопритоков, площади прорыва и градиентов напора, рассчитываемых с использованием глубины морской акватории и мощности целика. Для участков II и IV, где известны площади прорывов, расчетный коэффициент фильтрации пород защитного целика варьирует в пределах 138-223 м/сут.

Необходимо отметить, что японские специалисты одной из причин затоплений на рассматриваемых участках считали недостаточную эффективность применяемого метода предварительного укрепления. На аварийных участках I и II из-за трудности введения раствора жидкого стекла в глинистый заполнитель трещин, инъецирование не было выполнено, а на аварийных участках III и IV количество используемого инъекционного раствора было намного меньше, чем в среднем по трассе. Следовательно,

Местоположение и характеристика аварийных участков в тоннеле Сейкан в период строительства
[3, с дополнениями]

Характеристика участка	Номер аварийного участка			
	I	II	III	IV
Дата аварии	13.02.1969	08.01.1974	05.12.1974	06.05.1976
Место аварии	Наклонная шахта	Сервисный тоннель	Сервисный тоннель	Сервисный тоннель
Расстояние от о.Хонсю, м	1233	16890	31669	32747
Глубина моря в зоне прорыва, м	25	78	76	58
Мощность пород в кровле, м	215	102	128	134
Площадь зоны прорыва, м ²	Нет данных	75	Нет данных	525
Характеристика пород на аварийном участке	Андезит, зона разломов и трещиноватости	Туф, базальтовые пласты	Туф, зона разломов и трещиноватости	Туф, зона разломов и трещиноватости
Величина максимального водопритока, м ³ /мин	16	12	10	70

малая прочность заполнителя повлекла за собой его вынос, за которым последовал прорыв морских вод в выработку.

При отработке полезного ископаемого Яковлевского рудника должна быть полностью исключена возможность перетекания из вышележащего нижнекаменноугольного водоносного горизонта и соответственно возможность вторичного увлажнения БЖР, приводящая, как уже отмечалось ранее, к резкому снижению прочности.

Однако в пределах первоочередного участка отработки месторождения существует специфика горно-геологических условий, определяемая не только варьированием отметок подошвы нижнекаменноугольного водоносного горизонта, что диктует мощность защитной толщи, но также особенности разреза отложений нижнего карбона. Анализируя строение этой толщи, необходимо подчеркнуть, что наиболее неблагоприятные условия существуют на тех участках, в пределах которых в нижней части разреза преобладают известняки и отсутствуют глинистые породы.

Как показал анализ разреза по разведочным выработкам, пройденным еще в 1958 г., в пределах площади первоочередных работ в верхней части разреза рудного тела отсутствуют также бокситы – наиболее надежная водоупорная толща, а также достаточно прочная порода, в значительной степени определяющая устойчивость целика над выработкой.

Согласно результатам исследований А.Н.Цибизова, который выполнил построение схематических карт для выявления особенностей залегания БЖР по различным горизонтам, можно констатировать, что в контактной зоне нижнекаменноугольного горизонта с рудным телом водоносные известняки непосредственно залегают на БЖР, создавая единую гидродинамическую систему с «отдельными окнами» [2]. Такие «гидро-геологические окна» служат участками постоянного перетекания подземных вод из нижнекаменноугольного водоносного горизонта в подземные выработки. В зависимости от особенности строения рудной толщи выше гор.-370 м такие проницаемые зоны могут оказывать влияние на примыкающие к ним толщи, вызывая расширение зон перетекания по площади.

По данным [2] была построена схематическая карта распространения различных типов железных руд под подошвой каменноугольного водоносного горизонта, позволяющая оценить также относительную их проницаемость (см. рисунок). Зоны повышенной и средней проницаемости занимают около 25 % площади. Глиноподобные руды и породы, которые при действующем градиенте напора, превышающем 4-5, будут обладать относительно невысокой проницаемостью показаны на рисунке (п.б). Схематическая карта на рисунке предполагает возможность наиболее оптимального варианта размещения дренажных скважин, а также точек гидрогеомеханического мониторинга.

В настоящее время особенно важным является определение безопасной мощности целика между кровлей подземной выработки и подошвой нижнекаменноугольного водоносного горизонта при условии ведения работ на гор. –370 м.

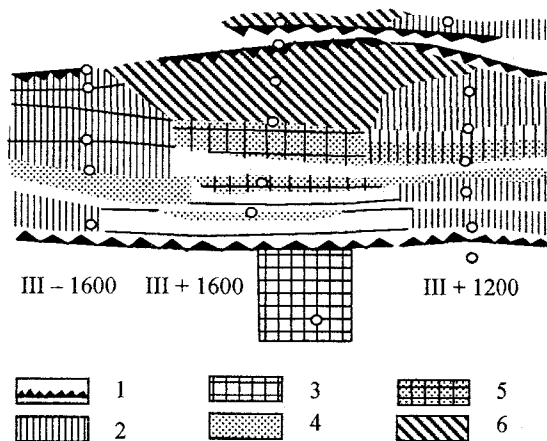
На участке проведения первоочередных работ по добыче БЖР отсутствуют бокситовые руды и цементированные железные руды. Наиболее низкая абсолютная отметка контакта известняков с рудным телом в пределах лежащего бока составляет –317,38 м. Следовательно, минимальная реальная мощность целика будет равна $[-317 - (-370)] = 53$ м на ограниченном участке. Определение предельной величины напора может быть выполнено по формуле В.А.Мироненко – В.М.Шестакова:

$$H_{\text{пр}} = \frac{m}{\gamma_{\text{в}}} \left(\gamma + \frac{2c}{b - \text{tg } \varphi \cdot m\zeta} \right),$$

где m – мощность целика, разделяющего одиночную выработку от напорного горизонта, $m = 53$ м; $\gamma_{\text{в}}$ и γ – удельный вес воды и пород (руд) целика; c и φ – параметры сопротивления сдвигу пород целика – сцепление и угол внутреннего трения; ζ – коэффициент бокового давления в толще пород (руд); b – ширина одиночной выработки, м.

Величина b принята равной 13 м. Это значение взято из рабочего проекта института «СУБР-проект» и получено расчетом по методу эквивалентных пролетов, разработанного проф. В.Д.Слесаревым.

Значения расчетных параметров сопротивления сдвигу берутся по результатам экспериментальных исследований, проведенных на кафедре гидрогеологии и инженерной геологии СПбГИ в 2005 г. Расчет произведен в предположении, что руды осушены и в таком случае $\varphi = 23^\circ$ ($\text{tg } \varphi = 0,424$), а величина сцепления меняется в зависимости от положения слоистости к направлению сдвигающего усилия, а также степени плотности руды. Коэффициент бокового давления был замерен *in situ* в условиях Яковлевского рудника и составил $\zeta = 0,67$.



Схематическая карта распространения различных типов железных руд под подошвой нижнекаменноугольного водоносного горизонта (по А.Н.Цибизову с дополнениями)

1 – остаточные руды; 2 – скальные относительно крепкие руды и породы (временное сопротивление сжатию более 400 кг/см²; проницаемость зависит от степени трещиноватости толщи); 3 – скальные слабые руды и породы (временное сопротивление сжатию более 100–400 кг/см²; проницаемость зависит от степени трещиноватости толщи); 4 – полурыхлые руды; повышенная и средняя проницаемость толщи; 5 – чередование рыхлых руд со скальными и полускальными; средняя проницаемость толщи; 6 – глиноподобные руды и породы; проницаемость толщи зависит от градиента напора

Кроме того, расчет произведен в предположении, что наблюдается перетекание из нижнекаменноугольного горизонта и БЖР следует рассматривать как водонасыщенные руды, при этом возрастает величина удельного веса руд, снижается угол внутреннего трения и величина сцепления.

Анализ приведенной формулы показывает, что расчет предельного (безопасного) напора может быть выполнен только при условии, что $b > \text{tg } \varphi \cdot m\zeta$. При обратном соотношении $b < \text{tg } \varphi \cdot m\zeta$ прорыв подземных вод невозможен.

Расчет по формуле В.А.Мироненко – В.М.Шестакова ведется в предположении, что деформации целика развиваются в форме поперечного сдвига. Такие деформации обычно характерны для условий, 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 превыше-

нии которых возрастает вероятность прорывов вод из неосушенного нижнекарбонового горизонта.

Если толща потолочины находится в осушенном состоянии и $\varphi = 23^\circ$ ($\operatorname{tg} \varphi = 0,424$), то произведение $\operatorname{tg} \varphi \cdot m \zeta = 0,424 \cdot 53 \cdot 0,67 = 15,06$ м. В этом случае прорыв невозможен, поскольку по проекту $b = 13,0$ м.

Соответственно расчет имеет смысл производить в условиях неосушенных руд, когда угол внутреннего трения снижается для БЖР до 8° ($\operatorname{tg} \varphi = 0,14$). В таком случае значение трехчленного компонента формулы для определения $H_{\text{пр}}$ будет составлять $\operatorname{tg} \varphi \cdot m \zeta = 0,14 \cdot 53 \cdot 0,67 = 4,97 \approx 5,0$ м, т.е. $b > \operatorname{tg} \varphi \cdot m \zeta$.

При условии обводнения $\gamma_{\text{руды}} = 34,5$ кН/м³. Для оценки величины $H_{\text{пр}}$ принципиальное значение имеет величина сцепления руды, которая в зависимости от степени сцементированности БЖР может изменяться. Согласно исследованиям, проведенным на образцах ненарушенного сложения в состоянии полного водонасыщения, которые были отобраны в транспортном орте, средняя величина сцепления составляет 500 кПа (0,5 МПа). Определение $H_{\text{пр}}$ с использованием приведенных параметров ($\varphi = 8^\circ$; $c = 0,5$ МПа; $\gamma = 34,5$ кН/м³; $b = 13,0$ м; $m = 53$ м; $\zeta = 0,67$) показали, что предельно-допускаемый напор каменноугольного горизонта не должен превышать 845 м, что почти в два раза выше действующего напора.

В приведенном расчете использованы значения водонасыщенных БЖР в условиях их естественного сложения при отсутствии вторичного увлажнения.

Наиболее опасная ситуация возникает при вторичном увлажнении БЖР. В условиях разуплотнения и повышения проницаемости толщи целика БЖР может наблюдаться процесс перетекания под действием высоких напоров, которые в настоящее время превышают 440 м. Вторичное увлажнение вероятно при ведении очистных работ широким фронтом, когда резко возрастает разуплотненность БЖР, сопровождающаяся

повышением их пористости. О значительном повышении пористости осушенных БЖР свидетельствуют данные определения этого показателя на образцах ненарушенного сложения в экспериментальном штреке.

Как показали экспериментальные исследования сопротивления сдвигу вторично увлажненных БЖР, величина сцепления снижается до 220 кПа (0,22 МПа) и менее. Разуплотнение сказывается также на величине γ . При максимальном разуплотнении осушенных БЖР, величина сцепления уменьшается до 150 кПа (0,15 МПа), а при вторичном увлажнении разуплотненных руд до 25 кПа (0,025 МПа).

Расчеты $H_{\text{пр}}$ выполнены при $\varphi = 8^\circ$ и $c = 220$ кПа; 150 кПа и 25 кПа. При этом величина b остается постоянной и равной 13,0 м. Значения $H_{\text{пр}}$ при варьировании параметра сцепления вторично увлажненных БЖР показаны ниже:

Ширина пролета выработки, м	Удельный вес руды, кН/м ³	Величина сцепления, МПа	Предельно допускаемый напор подземных вод H , м
13,0	30,0	0,22	~450,5
		0,15	~358
		0,025	192

Примечание. Действующий напор $H_d \geq 440$ м.

Следовательно, вторичное увлажнение БЖР при остаточной мощности потолочины 53 м и ширине пролета одиночной выработки 13,0 м, будет создавать условия для реализации прорыва подземных вод из нижнекаменноугольного водоносного горизонта при неблагоприятном разрезе толщи – преобладающем развитии БЖР.

Обеспечение устойчивости подземных выработок в ходе ведения очистных работ возможно при снижении величины b либо увеличении мощности потолочины. Гарантия отсутствия прорыва подземных вод возможна, если пролет одиночной выработки будет снижен до 5,0 м, что подтверждается расчетом. Если $b = \operatorname{tg} \varphi \cdot m \zeta$, то величина знаменателя в формуле для определения $H_{\text{пр}}$

будет стремиться к нулю: $b = 0,14 \cdot 0,67 \cdot 53 = 4,97 \approx 5,0$ м (расчет выполнен для водонасыщенных БЖР при $\varphi = 8^\circ$). Увеличение мощности потолочины при прочих равных условиях способствует росту безопасных пролетов. Следовательно, при проектной ширине выработки $b = 13,0$ м прорыв подземных вод невозможен только в полностью осушенном рудном теле.

Расширение фронта очистных работ и разуплотнение БЖР в кровле выработки будет способствовать увеличению площади перетекания подземных вод из нижнекаменноугольного водоносного горизонта на гор.-370 м.

Расчет времени перетекания 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; ΔH – действующая разность напоров в нижнекаменноугольном и рудно-кристаллическом горизонтах; K – коэффициент фильтрации; m – мощность целика.

Результаты расчетов времени перетекания подземных вод из нижнекаменноугольного горизонта на гор.-370 м:

Мощность целика, м	Пористость БЖР, %	Коэффициент фильтрации, м/сут	Время перетекания, сут
53	40	0,04	44
	45	0,005	396
	50	0,008	275
60	35	0,004	385
	40	0,001	1760
	50	0,002	1100

Примечание. Расчет произведен в предположении, что величина $\Delta H = 440$ м.

Как следует из результатов расчета времени перетекания, даже минимальные коэффициенты фильтрации не обеспечивают гарантии отсутствия вторичного увлажнения БЖР в период отработки рудного тела в первые годы функционирования выработок на гор.-370 м.

Согласно действующему СНиП 2.06.14-85 «Защита горных выработок от подземных и поверхностных вод» при проектировании водопонижения с применением внешахтных водопонизительных устройств и наличии водоупора, отделяющего толщу пород, в которых проектируются подземные выработки, от вышележащего водоносного слоя, понижение уровня подземных вод в этом слое допускается назначать с учетом соблюдения условия:

$$H \leq 5m,$$

где H – остаточный напор, отсчитываемый от кровли разделяющего слоя водоупорных пород, м; m – толщина не нарушаемого при разработке разделяющего слоя водоупорных пород, м.

Но в этом случае можно утверждать, что условия безопасного ведения работ на Яковлевском руднике не выполняются, поскольку $5m = 265$ м, в то время как величина действующего напора нижнекаменноугольного горизонта составляет 440 м. Однако опасности прорыва при надлежащей работе дренажных устройств в рудно-кристаллическом горизонте не существует, о чем свидетельствует отсутствие каких-либо признаков развития фильтрационных деформаций в кровле выработки на гор.-370 м.

По нашему мнению, формула для оценки безопасных напоров в действующем СНиП 2.06.14-85 должна быть пересмотрена и заменена зависимостями, отражающими реальные условия работы потолочин, разделяющих выработку от неосушенного напорного водоносного горизонта. Следует также принимать во внимание, что очистные работы будут вестись под защитой бетонной потолочины, создающей резерв прочности кровли. Однако и в этом случае необходимо предусмотреть специальный мониторинг за перетеканием подземных вод из нижнекаменноугольного горизонта для предупреждения вторичного увлажнения БЖР. Переход руд в плавунное состояние выше бетонной потолочины может значительно уменьшить безопасность производства горных работ.

В зонах возможного перетекания рекомендуется организовать гидрогеохимический мониторинг, с помощью которого устанавливаются первые характерные признаки перетока воды из нижнекаменноугольного водоносного горизонта по появлению H_2S , снижению содержания хлоридов и уменьшению минерализации воды. В зонах постоянного перетока необходимо оборудование дополнительных дренажных скважин.

ЛИТЕРАТУРА

1. МIRONENKO В.А. Горнопромышленная гидрогеология / В.А.Мироненко, Е.В.Мольский, В.Г.Румынин. М.: Недра, 1989.
2. Цибизов А.Н. Опыт инженерно-геологического анализа структуры рудного тела Яковлевского месторождения (по материалам разведки). В сб.: Вопросы геологии, инженерной геологии и гидрогеологии месторождений КМА. М.: Ростехиздат, 1962.
3. Tsuji H., Sawada T., Tarizawa M. Extraordinary inundation accidents in the Seikan undersea tunnel. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering. 1996. 119.