

**ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ БЕТОННОЙ КРЕПИ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ
ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СОЛЕЙ**

В. В. Тарасов¹, В. Н. Аптуков^{1,2}, О. В. Иванов¹, П. В. Николаев¹

¹АО “ВНИИ Галургии”, E-mail: Vladislav.Tarasov@uralkali.com,
ул. Сибирская, 94, 614000, г. Пермь, Россия

²Пермский государственный национальный исследовательский университет,
E-mail: Aptukov@psu.ru, ул. Букирева, 15, 614000, г. Пермь, Россия

В шахтных ствалах Верхнекамского месторождения в соляной (необводненной) части разреза наиболее распространена крепь из монолитного бетона и железобетона, которая должна обеспечивать необходимую несущую способность и водонепроницаемость в условиях ползучести вмещающих пород. Длительные наблюдения за состоянием крепи в период эксплуатации шахтных стволов показали формирование характерных закономерностей ее разрушения, вызванного реологическими свойствами соляного массива при действии горного давления. Оценка текущей работоспособности конструкций крепи и армировки шахтных стволов основывается на комплексном обследовании крепи, включая измерение трещин, площадей коррозионных зон и вывалов; уточнении фактических геометрических размеров крепи с помощью лазерных измерений; определении остаточной прочности крепи; математическом моделировании; определении интегральных показателей надежности конструкции. Предложена методика по определению категорий технического состояния бетонной крепи шахтного ствола, эксплуатируемого в условиях ползучести вмещающих (солевых) пород. Представлен пример применения предложенной методики, сделаны выводы по комплексу мероприятий проведения ремонтных работ.

Верхнекамское месторождение солей, шахтный ствол, бетонная крепь, жесткая армировка, категория состояния крепи, методика оценки состояния крепи

DOI: 10.15372/FTPPI20240107

EDN: BNQZMV

Вертикальные стволы всех горнорудных предприятий являются основными вскрывающими выработками и наиболее ответственными сооружениями, связывающими подземный и поверхностный комплекс шахты в единую систему. На Верхнекамском месторождении солей в необводненной (солевой) части разреза используется крепь из монолитного бетона и железобетона, относящаяся к одному из важных элементов шахтной конструкции, обеспечивая ее прочность и безопасность. Оценка текущей работоспособности конструкций крепи и армировки шахтных стволов — главная задача для безопасной работы калийных рудников.

Существующая в этой области нормативная база устарела, а по ряду позиций не разработана. Не изучены в должной мере вопросы оценки остаточной работоспособности крепи стволов в условиях длительной эксплуатации. Ряд исследований в этой области выполнен отечественными учеными С. В. Сергеевым, А. Ю. Прокоповым, И. И. Савиным, А. А. Жуковым [1–4].

Тем не менее задача по оценке остаточной работоспособности конструкции крепи шахтных стволов и обеспечению безопасности работ до сих пор не решена. В настоящее время оценка текущего состояния крепи стволов проводится с помощью визуального наблюдения и инструментальных измерений.

На основании визуального осмотра стенок бетонной крепи определяют длину и ширину раскрытия трещин, выявляют область коррозии материалов крепи, а также площадь отслоений и вывалов. Фиксирование данных по визуальному обследованию выполняется на схематической развертке. Недостатком оценки состояния крепи при визуальном обследовании является фактор профессиональной подготовки специалистов, в результате чего оценка может быть субъективной и зависеть от опыта и квалификации инспектора. К тому же визуальное обследование может не всегда обнаружить скрытые дефекты или проблемы, которые могут возникнуть внутри конструкции.

Инструментальные измерения по оценке крепи шахтных стволов включают в себя: профилирование шахтных стволов с помощью отвесов; установку струнных датчиков деформации; съемку с помощью лазерных сканирующих систем, монтаж волоконно-оптических датчиков деформации [5, 6]. Для оценки влияния фактических геометрических параметров крепи на ее НДС проводится сопоставительное моделирование участка ствола с проектными параметрами. На основе обследований и выполненных математических расчетов принимаются обоснованные решения по ремонту крепи. Важное значение имеет формулировка объективной оценки текущей работоспособности крепи и армировки, выбора и обоснования оптимальных методов воздействия на восстановление работоспособности стволов.

Основным документом, регламентирующим проведение оценки технического состояния, является РД 03-422-01 “Методические рекомендации по проведению экспертических обследований шахтных подъемных установок”. Рекомендации документа построены на методологических предпосылках метода экспертных оценок и предполагают применение минимального набора инструментальных исследований состояния крепи и армировки. В более современных методиках данный подход считается устаревшим и предлагается использовать нелинейные модели прогноза остаточной надежности конструкций, а также современный математический аппарат теории надежности [7–9].

В [10] предложен комплексный метод оценки технического состояния стволов, однако с учетом специфики эксплуатации стволов в сложных горно-геологических условиях Верхнекамского месторождения необходимость разработки и внедрения собственной методики оценки технического состояния бетонной крепи шахтных стволов.

В основу разработанной методики заложены результаты многолетних наблюдений за деформацией и разрушением бетонной крепи шахтных стволов, анализ фактического состояния бетонной крепи с учетом экспертных оценок, результаты профилирования и данные лазерного сканирования внутренних стенок крепи ствола. Установлено, что результаты интерпретации лазерного сканирования более качественно проявляются на длительном промежутке времени, так как на одно-двухлетнем горизонте измерений проблематично установить закономерности деформирования крепи, учитывая погрешность измерений лазерным оборудованием [11]. Точность измерения деформации и разрушения внутренней поверхности крепи зависит от наличия отдельных локальных выбоин бетона и соляных наростов.

При анализе фактического состояния бетонной крепи в процессе оценки ее остаточной работоспособности выбор участка крепи для детальных обследований определяется доступностью мест их проведения, поэтому не всегда удается получить достаточное количество данных для статистической обработки. Совместное применение указанных методов позволяет нивелировать их отдельные недостатки.

ОПИСАНИЕ ПРОЯВЛЕНИЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ БЕТОННОЙ КРЕПИ

В результате многолетних наблюдений за состоянием бетонной крепи шахтных стволов Верхнекамского месторождения выявлены основные характерные нарушения ее сплошности — появление и развитие (раскрытие) трещин; рост площадей коррозии материала крепи; формирование заколов и отслоений, частичных и сквозных вывалов (рис. 1). Со временем отмечается общая тенденция развития этих нарушений — постепенное увеличение количества и размера трещин, областей коррозии материала крепи, площади отслоений и вывалов, окружной деформации ствола [12].



Рис. 1. Нарушения целостности бетонной крепи шахтного ствола

Причина роста деформации бетонной крепи ствола — реологические свойства соляного массива, проявляющиеся в виде ползучести при действии горного давления [13–15]. Развитие процессов ползучести в соляном массиве приводит к возникновению значительных смещений контура массива как в ходе строительства, так и при эксплуатации, в следствие чего ухудшается техническое состояние крепи и армировки стволов [16–18].

Параллельно визуальному обследованию крепи проводились измерения смещений внутренней поверхности крепи с помощью переносного лазерного сканера модели Leica RTC360, при оценке текущей деформации крепи использовались данные исполнительной документации [19]. Данные обработки мониторинговых измерений геометрии внутренней поверхности ствола представлены в виде диаграмм радиальных перемещений в горизонтальных сечениях ствола с шагом по высоте 1–4 м и по углу $\sim 3.5^\circ$ относительно некоторой начальной идеальной окружности.

Далее определялась окружная деформация ε_θ на поверхности ствола:

$$\varepsilon_\theta = \frac{U_r}{R} = \frac{\Delta D}{D_o}, \quad (1)$$

где U_r — радиальное перемещение точек поверхности ствола; R — радиус ствола; D_o — начальный диаметр ствола; ΔD — уменьшение диаметра ствола.

На рис. 2 показано распределение по глубине средней окружной деформации бетонной крепи воздухоподающего клетевого ствола Березниковского рудоуправления. Значение окружной деформации определяет уровень разрушения наружной и внутренней поверхности бетонной крепи ствола, который не всегда может быть выявлен визуальным осмотром. Предельные деформации бетона при сжатии стандартных кубических образцов имеют диапазон 0.4–0.5 % [20]. Отсюда следует, что при деформациях 1.0–1.5 % и более области трещиноватости бетона распространяются внутрь крепи и могут достигнуть границы контакта с соляными породами.

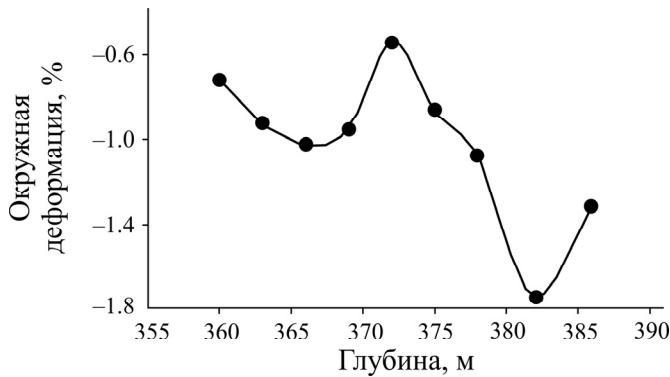


Рис. 2. Распределение окружной деформации по глубине ствола

Как показывают эксперименты по определению прочности поверхности бетона ударно-импульсным методом с помощью измерителя прочности стройматериалов ИПС МГ4.01, наблюдается корреляция между окружной деформацией бетонной крепи и остаточной прочностью бетона.

Методами численного моделирования с использованием различных программных комплексов можно оценить временной рост по уменьшению поперечного сечения и разрушения бетонной крепи ствола. Подобный подход интенсивно развивается в исследовательских работах [21 – 23]. Авторами настоящей статьи разработана расчетная модель для оценки напряженно-деформированного состояния бетонной крепи ствола и окружающего породного массива во времени [24 – 26]. Верификация расчетной модели осуществлялась на основе обработанных данных лазерных измерений внутреннего диаметра крепи ствола. Для оценки скорости уменьшения внутреннего диаметра бетонной крепи ствола, уровня его поврежденности и времени устойчивого состояния рассмотрены горизонтальные сечения в некоторых ярусах в плоской постановке.

Математическая постановка задачи и граничные условия представлены в [24 – 26]. Использована упругопластическая модель материала бетона с учетом трехлинейной диаграммы; для материала породного массива учитываются как упругопластические деформации, так и деформации ползучести. Вычисления проводились для бетона марки В35 с начальным модулем упругости 34.5 ГПа, коэффициентом Пуассона 0.2 и пределом прочности на сжатие 25.5 МПа. При продолжительном действии нагрузки значение длительного модуля упругости бетона определялось по формуле:

$$E_{b,\tau} = \frac{E_b}{1 + \varphi_{b,cr}}, \quad (2)$$

где $\varphi_{b,cr}$ — коэффициент ползучести бетона; E_b — начальный модуль упругости бетона; $E_{b,\tau}$ — длительный модуль упругости бетона.

Согласно [20], при уровне относительной влажности выше 75 % для бетона марки В35 коэффициент ползучести бетона $\varphi_{b,cr} = 1.5$, тогда из (2) $E_{b,\tau} = 13.8$ ГПа. Ниже представлены результаты расчета конвергенции крепи ствола для сечения в окрестности яруса № 78 (породный массив сложен карналлитом, глубина 314 м), свойства породного массива с модулем упругости 4 ГПа и пределом прочности на сжатие 8 МПа. На рис. 3 показаны кривые уменьшения диаметра бетонной крепи клетевого ствола для яруса № 78, данные мониторинга отмечены тем-

ным кружком. Штриховая линия — линейная аппроксимация зависимости временной конвергенции, по которой определяется изменение диаметра крепи на данном ярусе в ближайшие годы $\Delta D = 15 + 1.78 T$ (ΔD — уменьшение диаметра ствола; T — период времени наблюдений).

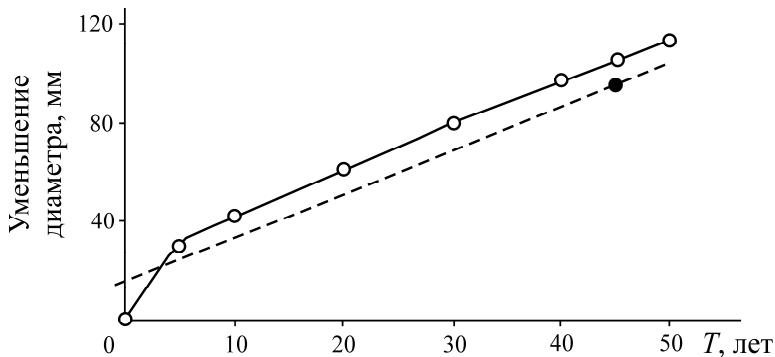


Рис. 3. Временная зависимость изменения диаметра бетонной крепи ствола (ярус № 78, пересечение с карналлитом)

Установлено, что скорость уменьшения диаметра крепи клетевого ствола на ярусе № 78 составляет 1.8 мм/год. Наиболее существенные изменения диаметра бетонной крепи ствола происходят в первые 5–7 лет, затем скорость диаметра крепи уменьшается. Подобный механизм разрушения наблюдается при обследовании других шахтных стволов Верхнекамского месторождения.

Таким образом, состояние бетонной крепи шахтных стволов Верхнекамского месторождения характеризуется развитием процессов трещинообразования и разрушения, выражаемых в росте различного рода нарушений сплошности крепи: трещин, заколов, вывалов. В результате увеличивается деформация бетонной крепи и понижается остаточная прочность бетона. Развитие процессов поврежденности бетона снижают уровень работоспособности и безопасности крепи, а также оказывают существенное влияние на жесткую армировку — систему расстрелов и проводников.

Многообразие форм качественных и количественных признаков изменения свойств бетонной крепи ствола можно классифицировать в виде основного критерия — категории технического состояния бетонной крепи ствола.

ОЦЕНКА КАТЕГОРИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ БЕТОННОЙ КРЕПИ ШАХТНОГО СТВОЛА

С учетом специфики развития разрушений бетонной крепи шахтных стволов разработана методика определения категорий их технического состояния, отражающая четыре этапа развития деформаций материала крепи; терминология соответствует регламенту РД 03-422-01 (рис. 4).

I категория (исправное состояние). В крепи ствола визуально отсутствуют нарушения, вызванные геомеханическими воздействиями, при этом в результате интерпретации данных лазерного сканирования относительное уменьшение диаметра крепи ствола не превышает 0.5 %. На поверхности самой крепи наблюдаются волосяные трещины с раскрытием до 5 мм и протяженностью не более 5 м, отмечаются следы коррозии бетона на глубину 15–20 мм.

II категория (рабочеспособное состояние). Относительное уменьшение диаметра крепи ствола находится в диапазоне от 0.5 до 1 %. Отмечается рост раскрытия трещин различной направленности от 5 до 20 мм, протяженностью от 5 до 10 м. Подобные трещины свидетельствуют о геомеханическом воздействии. Поверхность бетона выветрена на 20–50 мм и более, а на стыках бетонных заходок на значительном протяжении. Наблюдаются процессы пучения и выкрашивания бетона.

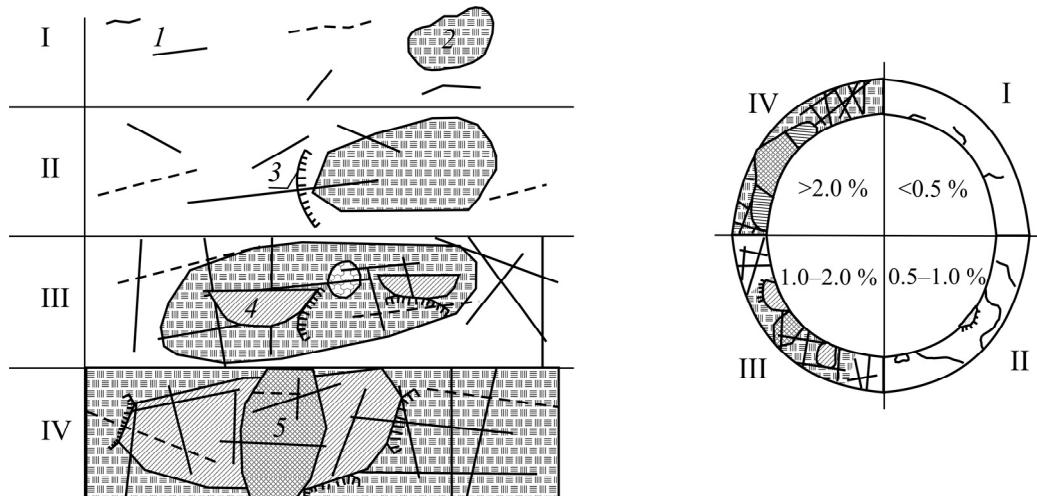


Рис. 4. Категории (I–IV) состояния бетонной крепи по видам и характеру нарушений: 1 — трещины; 2 — зона коррозии; 3 — отслоения/заколы; 4 — вывалы; 5 — сквозные отверстия; в процентах указана окружная деформация

III категория (частично работоспособное состояние) — интервалы крепи с относительным уменьшением диаметра крепи ствола в пределах 1–2 % и с повреждениями, также вызванными геомеханическими воздействиями: трещины (система трещин) с раскрытием более 20 мм, различной ориентации и величиной на одну заходку и более; образование заколов, одиночных вывалов площадью 1–5 м² (суммарная площадь всех нарушений не более 20 м²); коррозионная зона наблюдается на большей части крепи в зонах нарушений; расстрелы и проводники деформированы настолько, что требуется их частичная замена.

IV категория (предаварийное состояние участка крепи) — наиболее поврежденные интервалы бетонной крепи с относительным уменьшением диаметра крепи ствола более 2 %, на которых зафиксированы отслоения и скальвания на значительной площади поверхности, превышающей 20–30 м²; большая часть площади покрыта коррозией, происходит выпадение кусков бетонной крепи при скальвании или под действием собственного веса, фиксируются деформации расстрелов, связанные с нарушением допустимых зазоров; присутствует повышенный износ расстрелов и проводников; деформация крепи и армировки происходит активно, отмечаются значительные водопритоки в ствол.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ

Предложенная методика апробирована на ствалах ПАО “Уралкалий”, эксплуатируемых длительное время.

В рамках практического применения разработанной методики выполнена экспертная оценка технического состояния бетонной крепи воздухоподающего клетевого ствола Березниковского рудоуправления. По результатам анализа многолетних наблюдений, осуществляемых на протяжении 45 лет с момента ввода ствола в эксплуатацию, проведения современных исследований по лазерному сканированию ствола с определением окружной деформации, оценке прочностных и деформационных свойств с прогнозом остаточной работоспособности методами математического моделирования дана оценка технического состояния бетонной крепи. На рис. 5 показан фрагмент развертки бетонной крепи шахтного ствола с характерными нарушениями целостности и результатами определения категорий технического состояния.

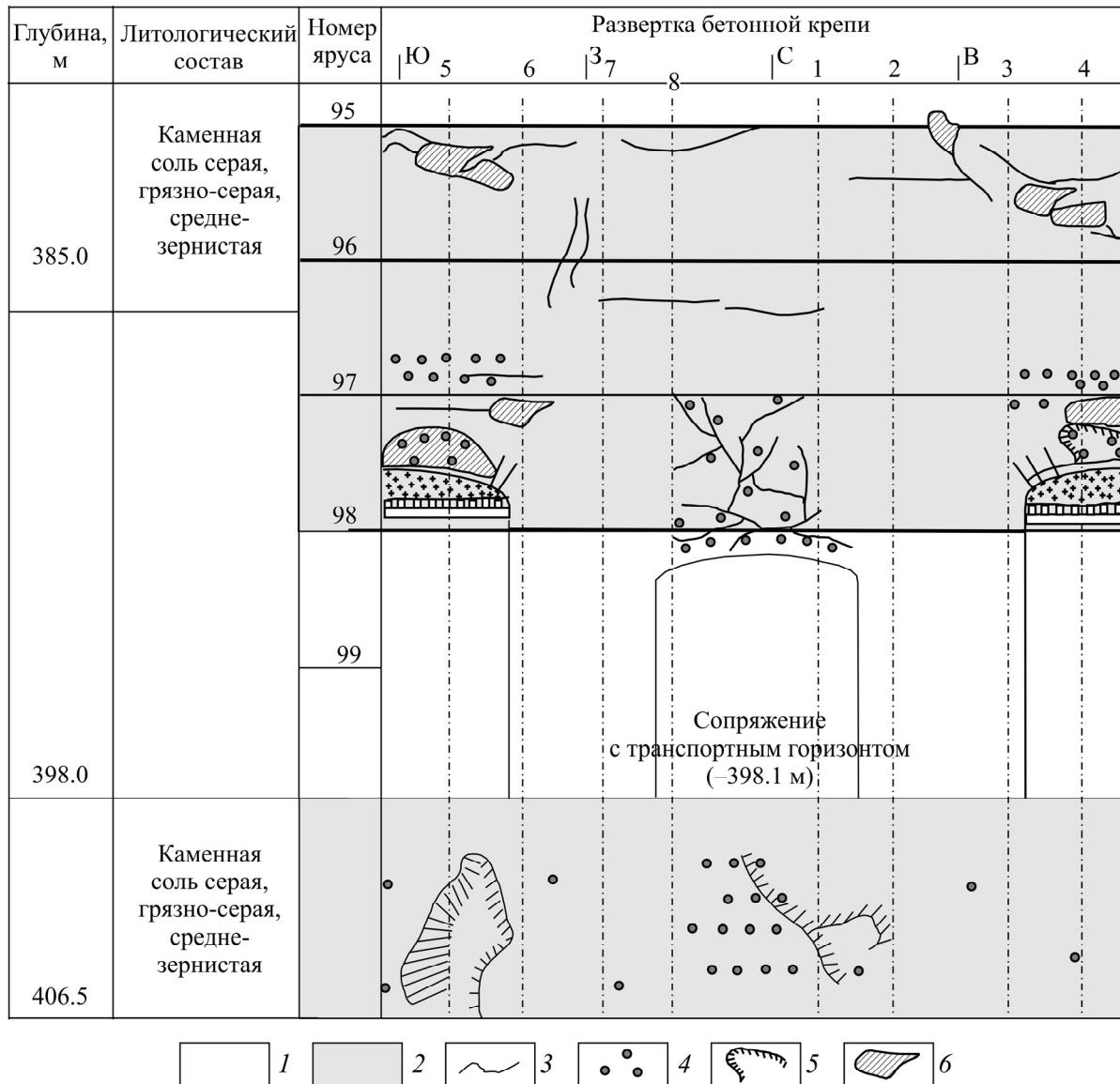


Рис. 5. Фрагмент развертки бетонной крепи с категориями технического состояния: 1 — II категория; 2 — III категория; 3 — трещина; 4 — сетка анкерного крепления; 5 — закол; 6 — зона вывалов

В результате выделены следующие категории технического состояния ствола и предложены меры по устранению выявленных нарушений:

II категория (работоспособное состояние) соответствует 32 % рассмотренного интервала бетонной крепи — проводится оборка поверхности крепи, рихтовка расстрелов и проводников;

III категория (частично работоспособное состояние) — 68 % интервала крепи: проведено ранее или необходимо выполнить вновь частичный ремонт крепи с применением анкеров или подхватов с анкерами, заменив расстрелы или деформированные проводники.

Определение сроков выполнения комплекса подготовительных мероприятий и периода остановки ствола для проведения ремонтных работ осуществляется техническим руководством рудника в зависимости от загруженности производства.

Благодаря методике комплексной оценки фактического состояния крепи с выделением отдельных категорий, разработаны мероприятия локального характера по усилению нарушенной бетонной крепи, предложен комплекс мероприятий для проведения ремонтных работ капитального плана.

В отличие от известного способа экспертной оценки крепи, обозначенных в РД 03-422-01, разработанная методика позволяет более комплексно, с широким набором инструментов оценивать текущее состояние бетонной крепи шахтных стволов, а также выполнять прогноз ее устойчивого состояния.

ВЫВОДЫ

Выполнен анализ состояния бетонной крепи шахтных стволов на Верхнекамском месторождении при длительной эксплуатации. Рассмотрен широкий спектр работ по детальному исследованию фактического состояния бетонной крепи.

Разработана унифицированная методика по определению категорий технического состояния бетонной крепи шахтных стволов, позволяющая выполнять оценку остаточной работоспособности крепи в условиях длительной эксплуатации, определять принципиальные подходы к выбору конструктивно-технологических решений по обследованию и ремонту крепи и армировки, а также рекомендуемым режимам работы шахтных стволов.

Для разработки методики использованы следующие результаты исследований:

- детальное визуальное обследование состояния бетонной крепи с измерением линейных размеров трещин, площадей коррозии и вывалов;
- уточнение фактических геометрических размеров конструкции крепи с помощью лазерного сканирования;
- определение прочностных свойств материала крепи;
- расчетные методы оценки деформаций бетонной крепи;
- математическое моделирование с применением специализированных программных комплексов и определение интегральных показателей надежности конструкций.

Представлен конкретный пример применения разработанной методики с определением категорий технического состояния крепи ствола и мероприятиями по проведению ремонтных работ.

Разработанная методика поможет повысить объективность и надежность оценки состояния крепи, что приведет к увеличению безопасности работ в шахтных стволях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сергеев С. В., Воробьев Е. Д. Информационно-измерительная система мониторинга напряженно-деформированного состояния несущих строительных конструкций и элементов // Науч. ведомости БГУ. Естественные науки. — 2017. — № 25 (274). — С. 116–122.
2. Прокопов А. Ю., Прокопова М. В., Ткачева К. Э. Обоснование параметров блочной крепи зумпфов углубляемых вертикальных стволов // Науч. обозрение. — 2014. — № 11–3. — С. 768–772.
3. Савин И. И., Свиридин В. А., Лукашин С. Б. Метод обработки результатов измерения разнотипных компонентов напряженно-деформированного состояния крепи горных выработок // Изв. ТГУ. Науки о Земле. — 2012. — № 1. — С. 171–177.
4. Жуков А. А. Разработка и адаптация технологии диагностики бетонной крепи шахтных стволов калийных рудников // ГИАБ. — 2016. — № 8. — С. 245–254.

5. Волохов Е. М., Новоженин С. Ю., Нгуен С. Б. Современные системы контроля сдвижений и деформаций при строительстве подземных сооружений // Зап. Горн. ин-та. — 2012. — Т. 199. — С. 253–259.
6. Баловцев С. В., Шевчук Р. В. Геомеханический мониторинг шахтных стволов в сложных горно-геологических условиях // ГИАБ. — 2018. — № 8. — С. 77–83.
7. Fahle L., Holley E., Walton G., Petruska A., and Brune J. Analysis of slam-based lidar data quality metrics for geotechnical underground monitoring, Min., Metal. Explor., 2022, Vol. 39, No. 5. — P. 1939–1960.
8. Li X., Xue W., Fu C., Yao Z., and Liu X. Mechanical properties of high-performance steel-fibre reinforced concrete and its application in underground mine engineering, Materials, 2019, Vol. 12, No. 15. — 2470.
9. Jakubowski J. and Fiolek P. Probabilistic structural reliability assessment of underground shaft steel-work, Tunnel. Underground Space Technol., 2022, Vol. 130.
10. Shmelev G. D., Kononova M. S., and Maleva N. A. Reliability, durability and service life of buildings and their structural components, Zhilishchnoe Khozyaystvo i Kommunalnaya Infrastruktura, 2019, Vol. 9, No. 2. — P. 34–42.
11. Панкратенко А. Н., Машин А. Н., Насонов А. А., Паринов Д. С. Особенности оценки технического состояния шахтных стволов с большим сроком эксплуатации // Горн. журн. — 2023. — № 1. — С. 20–26.
12. Иванов О. В., Аптуков В. Н., Тарасов В. В., Пестрикова В. С. Особенности эксплуатации сопряжений в сложных горно-геологических условиях калийных рудников // Изв. ТГУ. Науки о Земле. — 2022. — № 3. — С. 93–106.
13. Константинова С. А., Аптуков В. Н. Некоторые задачи механики деформирования и разрушения соляных пород. — Новосибирск: Наука, 2013. — 192 с.
14. Агеенко В. А., Скворцов А. А. Изучение реологических свойств каменной соли в условиях сверхдлительного одноосного нагружения // ГИАБ. — 2019. — № 11. — С. 27–34.
15. Tang M., Wang Z., and Ding G. Experimental study of full process of strain of rock salt and silt-mudstone interlayer in Huai'an salt mine, Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao, 2010, Vol. 29. — P. 2712–2719.
16. Liang G., Huang X., Peng X., Tian Y., and Yu Y. Investigation on the cavity evolution of underground salt cavern gas storages, J. Natural Gas Sci. Eng., 2016, Vol. 33. — P. 118–134.
17. Lie J., Wu F., Zou Q., Chen J., Ren S., and Zhang C. A variable-order fractional derivative creep constitutive model of salt rock based on damage effect, Geomechanics and Geophysics for geo-energy and geo-resources, 2021, Vol. 7, No. 2. — P. 1–16.
18. Качурин Н. М., Афанасьев И. А., Тарасов В. В., Стась П. П. Мониторинг устойчивости вертикальных стволов калийных рудников // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. — 2020. — № 3. — С. 304–317.
19. Тарасов В. В., Аптуков В. Н. Мониторинг деформации бетонной крепи шахтных стволов с помощью лазерного сканирования // ФТПРПИ. — 2022. — № 5. — С. 188–195.
20. СП 63.13330.2018, СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.
21. Козловский Е. Я., Журавков М. А. Исследование напряженно-деформированного состояния различных типов крепи шахтного ствола в массиве карналлитовых пород // Механика машин, механизмов и материалов. — 2023. — № 2 (63). — С. 53–60.
22. Jing L. A review of technics, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2003, Vol. 40, No. 3. — P. 283–353.
23. Yao Z., Xu Y., Zhang P., Fang Y., Wang C., Diao N., and Hu K. Mechanical characteristics of hybrid-fiber-reinforced concrete shaft wall structure under uneven load, Int. J. Concrete Structures and Materials, 2022, Vol. 16, No. 1. — P. 1–15.

24. Соловьев В. А., Аптуков В. Н., Ваулина И. Б. Поддержание горных выработок в породах соленосной толщи. — Новосибирск: Наука, 2017. — 264 с.
25. Тарасов В. В., Аптуков В. Н., Пестрикова В. С. Особенности деформирования и разрушения бетонной крепи вертикального ствола на сопряжении с горизонтальными выработками // ФТПРПИ. — 2020. — № 5. — С. 54–59.
26. Аптуков В. Н., Волегов С. В. Моделирование процесса формирования остаточных напряжений и поврежденности в образцах соляных пород, полученных из керна // ФТПРПИ. — 2020. — № 3. — С. 3–11.

Поступила в редакцию 13/X 2023

После доработки 20/I 2024

Принята к публикации 24/I 2024