

Скипочка С. И. /д. т. н./, Сергиенко В. Н. /к. т. н./
Институт геотехнической механики НАН Украины

Контроль состояния кольцевой бетонной крепи шахтных стволов

Изложена комплексная методика оценки состояния крепи вертикальных стволов, которая включает ее визуальный осмотр и виброакустический контроль. Исследована реакция секции крепи на ударное воздействие. Определен информативный параметр виброакустического метода. Предложены критерии оценки состояния крепи по данным комплексного контроля. Приведен пример использования методики на железорудном комбинате. Ил. 3. Табл. 4. Библиогр.: 6 назв.

Ключевые слова: кольцевая бетонная крепь, визуальный осмотр, виброакустический контроль, оценка состояния

The complex procedure of evaluation of supports of vertical shafts, which includes its visual inspection and vibroacoustic control is offered. The reaction of support section on shock influence is investigated. The informative parameter of vibroacoustic method is defined. The criteria for evaluation of supports state from data of complex control are offered. The example of the method use on the iron-ore combine is resulted.

Keywords: circular concrete support, visual inspection, vibroacoustic control, evaluation

В результате длительной эксплуатации на крепи вертикальных стволов большинства горнодобывающих предприятий образовались различного рода дефекты и нарушения, которые оказывают негативное влияние, как на работу шахтного подъема, так и на безопасность горнорабочих. К наиболее часто встречаемым нарушениям относятся: участки отколов бетона (в том числе и с обнажением арматуры), деформации контура ствола и фильтрации шахтных вод, поверхностная коррозия (преимущественно сульфатация), трещины, расслоения. Существенное влияние на устойчивость крепи оказывают также полости, образовавшиеся в контактирующем с крепью массиве.

Предусмотренный правилами безопасности регулярный осмотр крепи ствола, к сожалению, может только констатировать образование нарушения и только на внутренней поверхности крепи. Определить участки нарушенности внутри бетонной крепи и в закрепной области массива, а также спрогнозировать появление и развитие дефектов можно только с использованием инструментальных методов неразрушающего контроля, наиболее разработанным из которых является виброакустический метод [1-2].

Для обоснования информативных параметров виброакустического метода применительно к задаче контроля состояния системы «кольцевая бетонная крепь – массив» была рассмотрена ее упрощенная математическая модель, иллюстрируемая на рис. 1. Здесь заходка моделируется цилиндрической оболочкой конечной высоты h . Внутренний радиус R оболочки на-

много больше толщины d ее стенок. Материал оболочки считается однородным с плотностью ρ , и динамическим модулем растяжения-сжатия E . Внешнее давление p на оболочку предполагается гидростатическим и усредненным по всей площади заходки. Предполагается, что окружающая среда (плотностью ρ^* , динамической вязкостью η^* и скоростью звука c^*) оказывает упруго-вязкое сопротивление малым радиальным перемещениям внешней границы оболочки.

При точечном ударном возбуждении оболочки в ней возникают различные виды затухающих колебаний. Наиболее простой классический вариант для тонкостенной оболочки, не имеющей контакта с демпфирующей средой, рассмотрен в работе [3]. Известны также решения, где рассматриваются колебания оболочки в вязко-упругой среде [4-6]. Однако граничные условия в упомянутых работах не соответствуют предложенной модели.

В рассматриваемом нами случае выполнен учет влияния внешних сил со стороны вязко-упругой среды, контактирующей с наружной поверхностью оболочки, в частности: упругого $p_2 = -k_y \rho^* c^* \partial \chi / \partial t$ и вязкого $p_3 = -k_\delta \eta^* \partial \chi / \partial t$ сопротивлений среды, а также гидростатического давления $p_1 = \rho^* g H$. Здесь k_y и k_δ – коэффициенты пропорциональности.

В предположении, что влияние внутреннего трения материала оболочки на затухание колебательного процесса существенно меньше, чем демпфирования средой, и, что оболочка достаточно тонкая, а материал абсолютно упругий, получено следующее уравнение колебательного процесса

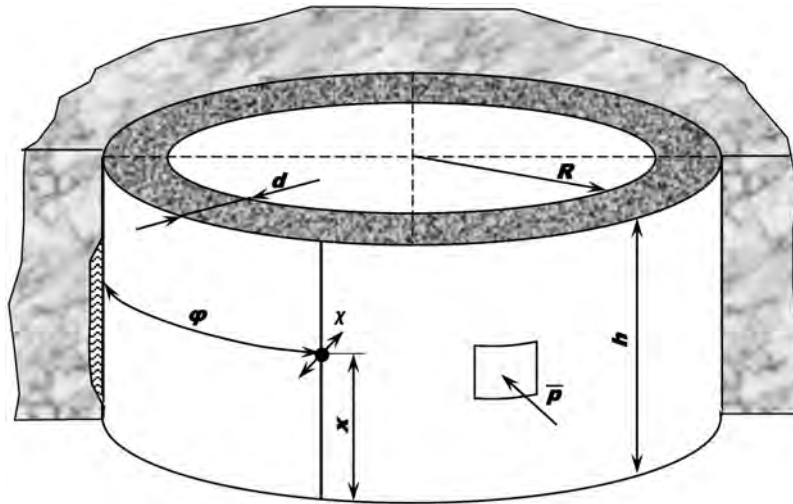


Рис. 1. Модель системы «кольцевая бетонная крепь – массив»

$$\nabla^2 \Phi = \frac{12}{d^2} (1 - \nu^2) \nabla_k^2 (\nabla_k^2 \Phi) - \rho d \frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2} - \rho^* g H + (k_y \rho^* c^* + k_\theta \eta^*) \frac{\partial \chi}{\partial t} = 0,$$

где Φ – промежуточная функция, определяемая системой соотношений:

$$\begin{aligned} \chi &= \nabla^4 \Phi; \\ \varphi &= E d \nabla_k^2 \Phi. \end{aligned}$$

Решение уравнения распадается на несколько, характеризующих различные типы колебаний, каждый из которых описывается набором функций вида

$$A_{mn}(t) = A_{mn}^0 e^{-\delta_{mn} t} \sin(\omega_{mn} t + \theta_{mn}) + A_0.$$

Здесь первое слагаемое описывает собственно колебательный процесс, а член A_0 не зависит от времени и представляет собой статический прогиб оболочки в радиальном направлении, являющийся функцией координат и параметров, задающих граничные условия. Показатель затухания спектральных составляющих δ_{mn} для двух основных видов колебаний имеет общий множитель, определяемый из выражения

$$\delta_{mn} = k_{mn} (k_y \rho^* c^* + k_\theta \eta^*),$$

где k_{mn} – коэффициент пропорциональности, зависящий от толщины оболочки и свойств ее материала.

Из матмодели следует, что плотный контакт оболочки с окружающей средой определяет высокую степень затухания свободных колебаний. При наличии полостей за оболочкой оба слагаемых в скобках уменьшаются и, соответственно, уменьшается суммарное затухание. Специально выполненные экспериментальные исследования показали, что доминирующее значение в колебательном процессе имеет основная частота. Т. е. косвенной характеристикой степени затухания колебаний может служить их количе-

ство в пределах временного диапазона, при котором их амплитуда A_1 уменьшается в заданное число раз от начального значения A_0 .

Определение указанного информативного параметра реализовано в разработанном нами многопрофильном виброакустическом индикаторе ДИКОН (рис. 2) при его работе в режиме «контроль конструкции». В комплект аппаратуры ДИКОН кроме индикатора входят возбуждатель колебаний и приемник вибрации, выполненные на удлинительных штангах, позволяющих обеспечить контакт с внутренней поверхностью кольцевой крепи при нахождении оператора на клети.



Рис. 2. Индикатор «ДИКОН»

Перед визуальным обследованием на специальный пластиковый планшет предварительно наносят устойчивую к воде развертку обследуемого участка ствола. Для фотографирования дефектных участков используют фотоаппарат,

предназначенный для подводной съемки. Ориентацию в горизонтальной плоскости определяют горным компасом, а вертикальную координату – путем прямой связи с оператором подъемной машины.

Обследование выполняют с крыши клетки или скипа, специально подготовив их для выполнения данной работы с учетом требований безопасности. Работы выполняют поэтапно. Вначале производят предварительный осмотр ствола на скорости ревизии с фиксацией вертикальной координаты наиболее значимых дефектов. Затем выполняют детальный визуальный осмотр поверхности ствола с документированием всех выявленных нарушений. На третьем этапе осуществляют виброакустический контроль доступной поверхности бетонной крепи. После чего производят предварительную обработку полученных данных, а, в случае неясностей, возникших на этапе предварительной обработки данных, осуществляют фрагментарный повторный контроль отдельных участков ствола.

Шаг контроля по вертикали составляет: 4 м при обзорном контроле для выявления наиболее значимых дефектов; 2 м при обычном штатном контроле; 1 м при детальном контроле в пределах сильно нарушенного участка. В стволах диаметром до 6 м угловой шаг принимают равным 45°, свыше 6 м – 30°.

При документировании источников фильтрации выделяют точечные, протяженные, с напорной и безнапорной фильтрацией. Фотографирование дефектов осуществляют с регистрацией их координат.

Скрытые расслоения, а также полости в массиве на границе с крепью определяют методом виброакустического контроля. При этом удар наносят перпендикулярно поверхности крепи. Приемник вибрации устанавливают на расстоянии примерно 1 м от точки удара. Поверхность бетона в точке установки приемника должна быть очищенной. В каждой точке выполняют по три определения информативного параметра. При существенном разбросе это количество увеличивают до пяти. Полученные результаты усредняют. Критериальная оценка состояния системы «кольцевая бетонная крепь – мас-

сив» определяется толщиной крепи и свойствами ее материала. Например, для стволов Запорожского железорудного комбината (ЗЖРК) она представлена в табл. 1.

Для оценки состояния крепи ствола и системы «крепь – массив» в целом по совокупности данных, полученных путем визуального осмотра и виброакустического контроля, рекомендуется использовать разработанные в ИГТМ НАН Украины критерии, приведенные в табл. 2.

В качестве примера ниже приведены результаты детального обследования верхней части северного вентиляционного ствола диаметром 6 м шахты «Эксплуатационная» ЗЖРК.

Схема расположения точек контроля, выбранная из условий безопасности и эргономики, представлена на рис. 3.

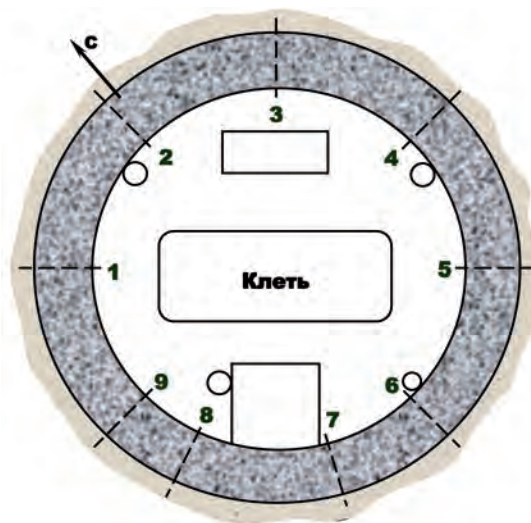


Рис. 3. Точки контроля в сечении ствола

Виброакустический контроль выполнен в 207 точках, по результатам которого скрытых заголов и расслоений в крепи не обнаружено. Однако выявлен один участок с локальной полостью (доля контактной площади крепи с полостью в приконтурном грунтовым массиве – около 6 %). Кроме того, обнаружено 36 точек неплотного прилегания крепи к массиву (доля суммарной площади 17,4 %). При интерпретации данных учитывали различную толщину бетона на отдельных участках ствола. На отрезках 0-2 м и 5-16 м она составляет 1 м, на остальных – 0,5 м.

Критерии состояния системы «крепь-массив» по результатам показаний виброакустического индикатора «ДИКОН»

Состояние системы	Показания при толщине крепи, м		Графическое обозначение
	0,5	1,0	
Плотный контакт крепи с массивом	0-10	0-5	
Неплотное прилегание крепи к массиву	11-15	6-10	
Наличие полостей в массиве за крепью	свыше 15	свыше 10	

Критерии оценки состояния крепи и системы «крепь-массив»

Показатели нарушенности	
1-я категория, состояние - исправное	2-я категория, состояние - работоспособное
На поверхности бетона возможно наличие волосяных трещин. Допустимы локальные участки коррозии бетона на глубину не более 20 мм. Возможно наличие локальных безнапорных источников фильтрации с сопутствующей сульфатацией поверхности бетона. Механическое повреждение поверхности бетона, а также его вздутие отсутствует. Доля площади внешней поверхности крепи, контактирующей с полостями в околоствольном грунтовом или породном массиве от обследованной (далее – контактной площади крепи с полостями в прилегающем массиве) не превышает 5 %.	На поверхности бетона могут присутствовать участки коррозии глубиной до 50 мм, сопровождающиеся вздутием и высыпанием ослабленного слоя. Возможно наличие единичных отколов бетона с глубиной не более половины толщины крепи и площадью до 1 м ² . Трещины, кроме волосяных, отсутствуют. Возможно наличие локальных безнапорных и слабонапорных источников фильтрации с сопутствующей сульфатацией поверхности бетона и осаждением выносимого из-за крепи материала на ее внутренней поверхности. Доля контактной площади крепи с полостями в прилегающем массиве не превышает 10 %.
Показатели нарушенности	
3-я категория, состояние – ограниченно работоспособное	4-я категория, состояние – неработоспособное
Наличие единичных трещин на поверхности крепи раскрытием до 2 см в пределах заходки. Имеют место единичные отколы бетона на всю толщину крепи с площадью до 5 м ² , но без выпуска породы. Возможно наличие точечных источников напорной фильтрации с сопутствующими обширными участками коррозии и сульфатации бетона. Наблюдаются деформации крепи на границах заходок и сопряжениях с горизонтальными выработками. Доля контактной площади крепи с полостями в прилегающем массиве не превышает 30 %.	Трещины с раскрытием свыше 2 см образуют систему, формируя блочную структуру крепи и провоцируя вывалы отдельных блоков, а также их взаимные радиальные смещения. Имеют место обильные водопритоки. Доля контактной площади крепи с полостями в прилегающем массиве более 30 %.

Результаты визуального контроля представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты визуального контроля

Положение дефекта		Описание дефекта
глубина Н, м	номер точки	
1-2	4-6	2 локальных откола бетона глубиной до 0,25 м
4-5	4	откол бетона глубиной до 0,25 м
4-5	8	локальный участок сульфатации
6	по контуру	безнапорная фильтрация воды по границе заходки
12-13	по контуру	точечные очаги слабонапорной фильтрации
15-17	4-5	грунтовые наносы на поверхности бетона
19	1	локальные участки сульфатации
21	7-8	локальное вздутие бетона порядка 0,1 м
26-27	4-6	откол бетона глубиной до 0,2 м
29	2-3	локальное вздутие бетона порядка 0,1 м

Результаты виброакустической диагностики, скорректированные с учетом критериев, указанных в табл. 1, схематично отображены в табл. 4.

По результатам виброакустического контроля был выявлен потенциально опасный участок в диапазоне глубин 6-12 м (сектор между точками 1 и 2), характеризующийся потерей контакта крепи с массивом.

По комплексу показателей нарушенности, в соответствии с критериями оценки категории состояния крепи и системы «крепь – массив» состояние обследованного участка классифицируется как работоспособное (категория 2).

Аналогичные обследования, результаты которых составили основу проектов ремонтно-восстановительных работ, разрешительных документов на дальнейшую эксплуатацию либо расконсервацию, ранее были проведены в стволе шахты им. Орджоникидзе Кривбасса, а также 12-ти стволах шахт Восточного и Центрального районов Донбасса. Предлагаемая методика зарекомендовала себя как весьма эффективная и может быть тиражирована на все горнодобывающие предприятия Украины.

Таблица 4

Результаты виброакустического контроля

Глубина Н, м	Значение параметра на кольцевом профиле в точке номер:								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	11	6	0	9	4	0	5	14	9
3	11	9	-	11	8	0	0	3	8
4	8	7	-	8	3	0	0	1	4
5	7	6	-	0	0	0	0	0	0
6	7	7	-	0	0	0	0	1	3
7	10	9	-	0	0	0	0	2	8
8	8	8	-	3	4	4	2	3	6
9	8	9	-	5	6	8	4	3	5
10	10	8	-	3	4	4	2	3	3
11	13	7	-	0	0	0	1	1	0
12	9	6	4	5	3	3	0	2	3
13	5	4	7	10	5	4	0	2	6
14	5	4	5	7	4	6	3	4	6
15	6	7	5	4	5	8	6	8	8
16	5	6	8	6	4	5	5	8	7
17	5	4	10	7	3	3	6	10	9
18	4	7	9	6	4	6	5	7	7
19	6	11	7	6	7	10	7	5	6
20	5	8	7	7	6	7	6	7	5
22	4	7	10	9	7	6	8	9	6
24	7	9	6	6	9	4	0	0	0
26	8	7	11	5	8	5	4	5	5
29	6	8	0	12	6	4	4	6	8
32	5	6	2	6	4	2	3	3	5

Библиографический список

1. Руководство по геофизической диагностике состояния системы «крепь – породный массив» вертикальных стволов: Утв. Минуглепромом Украины 14.10.1998 / А. Ф. Булат, Б. М. Усаченко, С. И. Скипочка и др. – Донецк: ООО «Лебедь», 1999. – 42 с.
2. Діагностика стану систем «кріплення-массив» та «підйомна посудина-жорстке армування» шахтних стовбурів. Порядок та методика виконання: ГР-032-2004. Видання офіційне: затв. Мінпромполітики України: надано чинності з 1 вересня 2004 / А. Булат, Б. Усаченко, С. Скипочка, С. Ільїн, В. Сергієнко та ін. - Дніпропетровськ: НВП «Економіка», 2004. - 40 с.
3. Гонткевич В. С. Собственные колебания пластинок и оболочек. Справочник / В. С. Гонткевич. – К.: Наукова думка, 1964. – 287 с.
4. Львовский В. М. Установившиеся колебания цилиндрической оболочки в упругой среде под действием подвижной нагрузки / В. М. Львовский, В. И. Онищенко, В. И. Пожурев // Вопросы прочности и пластичности. – Днепропетровск: ДГУ, 1974. – С. 98-110.
5. Гуляев В. И. Распространение гармонических волн в цилиндрической оболочке (модель С. П. Тимошенко) / В. И. Гуляев, П. З. Луговой, Н. А. Лысюк // Прикладная механика. – К.: ИМ НАНУ, 2003. – Т. 39. – № 4. – С. 108-116.
6. Бочкарев С. А. Собственные колебания круговой цилиндрической оболочки с жидкостью / С. А. Бочкарев // Вычислительная механика сплошных сред. – 2010. – Т. 30. – № 2. – С. 24-33.

Поступила 06.07.2015

**Metallurgical and Mining
Industry**

www.metaljournal.com.ua