УДК 550.834

Колмакова Анастасия Анатольевна
(ЗАО «Углеметан Сервис», г. Кемерово)
Anastasia A. Kolmakova
(ZAO Uglemetan Service, Kemerovo)

Соколов Сергей Владиславович, к. т. н.,
(ЗАО «Углеметан Сервис», г. Кемерово)
Sergey V. Sokolov, candidate of technical sciences
(ZAO Uglemetan Service, Kemerovo)

Варфоломеев Евгений Леонидович
(ЗАО «Углеметан Сервис», г. Кемерово)
Evgeny L. Varfolomeev
(ZAO Uglemetan Service, Kemerovo)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНЫХ ПОРОД НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСА СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ ДАННЫХ

DETERMINATION OF GEOMECHANICAL CHARACTERISTICS OF ROCKS BASED ON A COMPLEX OF SEISMIC DATA

Аннотация. Рассмотрен вопрос обоснования связи между параметрами сейсмического сигнала и геомеханическими характеристиками массива. Представлены результаты оценки состояния кровли выемочного пласта на основе данных шахтной сейсморазведки. Определена зависимость между геомеханическими параметрами пород кровли выемочного столба и регистрируемыми значениями скоростей сейсмических волн.

Abstract. The issue of substantiating the relationship between the parameters of the seismic signal and the geomechanical characteristics of the rock mass is considered. The results of assessing the condition of the roof of the mining seam based on data from mine seismic exploration are presented. The dependence between the geomechanical parameters of the roof rocks of the mining pillar and the recorded values of seismic wave velocities has been determined.

Введение. От совокупности факторов, определяющих комплекс горно-геологических условий, действующих в границах отрабатываемого

выемочного столба, во многом зависит безопасность и непрерывность добычи угля [1]. Для их учета особенно важна своевременно полученная информация о состоянии разрабатываемого углепородного массива. Среди отмеченных факторов можно выделить устойчивость кровли, которая оказывает существенное влияние на процесс добычи угля [2]. Одним из инструментальных методов определения геомеханических характеристик кровли и выявления в ней аномальных тектонических зон и других участков изменения ее характеристик является сейсмическое просвечивание из подземных горных выработок [3, 4], основанное на искусственной генерации сейсмических волн, проходящих в горных породах, и оценке особенностей их распространения. Одним из недостатков данного подхода является то, что в ходе оценки состояния кровли не обеспечивается определение численных значений ее геомеханических характеристик [5, 6]. Таким образом, выявление и обоснование связи между геомеханическими характеристиками углепородного массива и параметрами распространения в нем сейсмического сигнала является актуальной задачей, возникающей при прогнозировании его состояния.

Методика. Для обоснования связи между геомеханическими характеристиками и параметрами распространения сейсмического сигнала в кровле выемочного столба использованы результаты геофизических исследований и данные лабораторных исследований по оценке физико-механических параметров углепородного массива.

Геофизические работы проведены на участке оконтуренного выемочного столба протяженностью 1120 м методом сейсмического просвечивания на проходящих волнах. Для выполнения геофизических работ использован комплект специализированного геофизического оборудование, сформированный на базе автономных сейсмических станций «Р-1» и геофонов GS-20DX [3, 4, 6].

После выполнения полевого этапа геофизических измерений и этапа камеральной обработки сейсмических данных получены результаты, оформленные в виде горизонтального геофизического разреза распределения скоростных характеристик в активной кровле исследованного выемочного столба (рисунок 1).

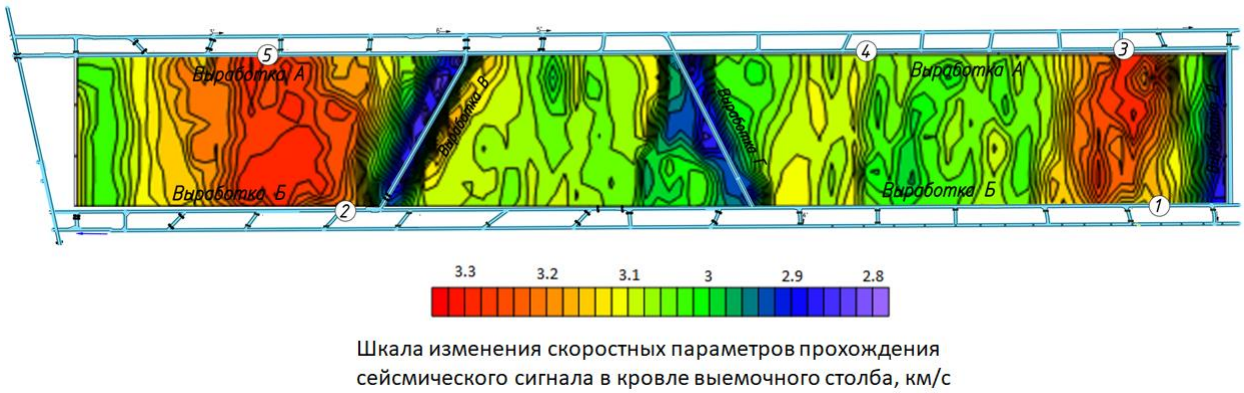

Рисунок 1 – Геофизический разрез распределения скоростных характеристик в пределах активной кровли исследуемого выемочного столба

Среди изменений физико-механических свойств пород активной кровли выемочного столба, характеризующихся градацией фиксируемых сейсмических скоростей контрастно выделяются зоны возрастания и снижения. В зонах пониженных скоростей распространения сейсмических волн предполагается снижение устойчивости пород непосредственной кровли. Зоны повышенных скоростей обусловлены залеганием более прочных относительно прочих участков выемочного столба пород.

Полученные результаты позволили оценить общее состояние кровли в пределах всей площади обследованного участка выемочного столба. При этом по итогам исследования не были определены какие-либо численные значений ее геомеханических характеристик.

Также в границах исследованного участка выемочного столба выполнен отбор образцов керна пород кровли в 5 точках из выработок А, Б (обозначены цифрами 1-5 на рисунке 1) с применением керноотборника и бурового станка. После чего выполнены их лабораторные исследования в соответствии с ГОСТ 21153.3-85 и ГОСТ 22733-2016, позволившие определить такие широко используемые численные параметры как плотность горных пород и предел прочности на сжатие. Стоит отметить, что возможность определения представленных параметров по результатам лабораторного анализа керна в шахтных условиях значительно ограничена необходимостью наличия горных выработок и соответствующих технологических средств в них для отбора образцов. Это делает лабораторную оценку плотности и предела прочности на сжатие горных пород, залегающих в центральной области выемочного столба маловозможной.

Известно, что изменение скорости распространения сейсмических волн, а также коэффициенты их поглощения в той или иной мере характеризуют литологический состав горных пород в массиве, их состояние, характер осадконакопления. Значения скоростей распространения упругих волн в различных минералах и горных породах

могут изменяться в широких интервалах. Это обусловлено влиянием одновременно действующих факторов геологического и физического происхождения [7].

Среди прочего, на скорость распространения сейсмических волн в массиве влияет плотность слагающих его пород. С увеличением плотности горных пород скорость распространения упругих волн в них возрастает [8-10]. Это объясняется тем, что уплотненные породы за счет горного давления, процессов метаморфизма и т.п. в большей степени повышают численные значения модулей упругости, и тем самым увеличивает значения скоростей распространения упругих волн. С между скоростью и плотностью горных пород и скоростью распространения в них сейсмических волн могут существовать различного рода корреляционные зависимости. Так, существует линейная зависимость между скоростью распространения продольных упругих волн в породе и их плотностью [11]:

$$V_p \left[\frac{\text{км}}{\text{с}}\right] = 6 * \rho \left[\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right] - 11 . \quad (1)$$

Известно также, что зависимость сейсмических свойств горных пород от структурных особенностей определяет связь с прочностными характеристиками, из которых наиболее часто используется предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$, представляющий собой величину напряжения, которое должно быть приложено к образцу для его разрушения в условиях одноосного сжатия. Данная зависимость показана в общем уравнении регрессии для всех пород, отражающем существующую нелинейную корреляционную связь (при коэффициенте корреляции r = 0,89) [12]:

$$lg \cdot \sigma_{сж} = 0{,}255 \cdot V_p + 1{,}708. \quad (2)$$

Для обоснования связи между геомеханическими характеристиками кровли выемочного столба и параметрами прохождения сейсмического сигнала выполнен расчет скоростей распространения в ней продольных сейсмических волн на основе представленных зависимостей и проведено сопоставление результатов расчета со значениями сейсмических скоростей, полученными в результате проведения сейсмической разведки. Таким образом данные зависимости могут быть использованы для расчетов численных значений таких характеристик как плотность и предел прочности на сжатие горных пород, слагающих углепородный массив на основе значений скоростей распространения в нем продольных сейсмических волн, определяемых в рамках его сейсмического просвечивания.

Результаты. В таблице 1 представлены сводные результаты, включающие параметры и расчеты, полученные на основе лабораторного исследования плотности и предела прочности на сжатие горных пород, залегающих в кровле выемочного столба, а также значения скоростей, зафиксированные в рамках оценки ее состояния на основе сейсмического просвечивания.

Таблица 1 – Сопоставление результатов лабораторного исследования горных пород, залегающих в кровле выемочного столба и значений скоростей распространения сейсмических волн, зафиксированных в рамках геофизической оценки ее состояния

Номер точки отбора проб	Предел прочности на сжатие, МПа	Плотность, г/см^3	Расчетная скорость распространения продольных волн (в зависимости от предела прочности на сжатие), км/с	Расчетная скорость распространения продольных волн (в зависимости от плотности пород), км/с
1	51,97	2,58195	3,952	4,492
2	54,09	2,58938	4,020	4,536
3	61,44	2,53821	4,237	4,229
4	35,00	2,55400	3,279	4,324
5	26,85	2,59010	2,827	4,541

Полученные данные о скоростях прохождения продольных упругих волн в исследуемых породах приведены к средним значениям по 2 расчетным методам и сопоставлены с результатами геофизических исследований (таблица 2).

Таблица 2 – Скорости распространения продольных сейсмических волн в кровле выемочного столба, определенные по результатам лабораторных исследований и геофизических работ

Номер точки отбора проб	Средняя скорость распространения продольных волн, определенная по результатам лабораторных исследований, км/с	Скорость распространения продольных волн, определенная по результатам геофизических исследований, км/с
1	4,22	3,16
2	4,28	3,18
3	4,23	3,3
4	3,80	3,1

5	3,68	3,02

В таблице 2 представлены скорости распространения продольных сейсмических волн, определенные по итогам геофизического обследования кровли выемочного столба и усредненные значения скоростей, рассчитанных на основе значений плотности и предела прочности на сжатие горных пород, определенных в рамках лабораторных исследований. Из данных таблицы следует, что сопоставляемые значения несколько отличаются между собой, что можно объяснить тем фактом, что при сейсмическом просвечивании кровли выемочного столба сигнал распространялся по горным породам, на состояние которых влияет комплекс дополнительных факторов, не учитывающихся при выполняемых расчетах: оконтуренный массив, наличие пустот и трещин, влияния горного давления и т.д. Для частичного учета перечисленных факторов на основе анализа зависимости между скоростями распространения продольных сейсмических волн, полученных на основе лабораторных и геофизических исследований, предложен следующий поправочный коэффициент:

$$V_Л/V_Г = 1{,}2815,$$

где: Vл – средняя скорость распространения продольных волн, рассчитанная на основе данных лабораторных исследований, км/с; $V_Г$ – скорость распространения продольных волн, определенная по результатам геофизических исследований, км/с.

Таким образом, определение в рамках оценки состояния углепородного массива значений скоростей распространения в нем сейсмических волн с последующей их коррекцией (на основе анализа связей между ними и данными лабораторных исследований) обеспечивает возможность определения численных значений плотности и предела прочности на сжатие слагающих его пород на всей площади исследуемого выемочного столба.

Выводы. По результатам анализа результатов комплекса выполненных исследований подтверждена связь между геомеханическими характеристиками углепородного массива и параметрами распространения в нем сейсмического сигнала. На основе данной зависимости представлен и обоснован подход к определению численных значений плотности и предела прочности на сжатие слагающих его пород для всей площади исследуемого выемочного столба. Для его реализации предложено применение корректирующих коэффициентов, определяемых на основе анализа связей между ними и данными лабораторных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фомин А.И., Казанцев В.Г., Ботвенко Д.В., Халявина М.Н., Ермолаев А.М. Управление рисками при разработке угольных месторождений подземным способом // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности – 2018. – № 4. – С. 54-62.

2. Трунов Л.Ф., Горелов А.В. Об установлении категории устойчивости непосредственной кровли угольных целиков // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. — 2026. — №1. — С. 21-27.

3. Тайлаков, О.В. Определение аномальных тектонических зон, характеристик устойчивости и управляемости кровли методом сейсмического просвечивания на проходящих волнах / О.В. Тайлаков, С.В. Соколов, А.В. Герасимов, А.А. Колмакова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № S49. – С. 275–282.

4. Оценка влияния направленного гидроразрыва на изменение объема порово-трещинового пространства кровли выемочного столба массива на основе применения сейсмического просвечивания. Соколов С.В, Колмакова А.А. Сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Кемерово, 2021. С. 10903.1-10903.6.

5. Тайлаков О.В., Соколов С.В., Застрелов Д.Н., Ярош А.С. Обеспечение безопасности угледобычи на основе данных наземной сейсморазведки методом общей глубинной точки // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности, Кемерово, 2015. – №4. – С. 34 – 37.

6. Тайлаков О.В., Застрелов Д.Н., Колесниченко С.Е., Соколов С.В., Роут Г.Н. Определение участков трещиноватых пород с измененными фильтрационными свойствами в кровле выемочного столба на основе сейсморазведки // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2021. - №7. С. 329 – 332.

7. Бондарев В.И. Основы сейсморазведки. Екатеринбург: Издательство УГГГА, 2003.

8. Экспериментальные исследования влияния трещиноватости горных пород и модельных материалов на скорость распространения продольной волны. В.С. Жуков, Ю.О. Кузьмин Физика Земли, 2020, № 4, стр. 39-50.

9. Жуков В.С. Оценка трещиноватости коллекторов по скорости распространения упругих волн. Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России до 2030 г. М.: ООО “Газпром ВНИИГАЗ”. 2012. С. 148–152.

10. Баюк И.О., Рыжков В.И. Определение параметров трещин и пор карбонатных коллекторов по данным волнового акустического каротажа // Технологии сейсморазведки № 3. 2010. С. 32–42.

11. Методы и объекты сейсмических исследований. Введение в общую сейсмологию. Автор: Пузырев Н.Н. Издательство: СО РАН, НИЦ ОИГГМ Год: 1999 г. с.299.

12. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред. М.: Гостехтсортиздат, 19594. 789 с.