УДК 550.8

ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ УГЛЕВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Гриб Н.Н., Кузнецов П.Ю., Сясько А.А., Качаев А.В.

Технический институт (филиал) ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», Нерюнгри, e-mail: kuznetsov.pavel.yu@gmail.com

В статье рассмотрена методика прогнозирования устойчивости горных пород на основе данных о литологическом составе углевмещающих пород и их физико-механических свойствах, полученных по геолого-геофизической информации в процессе разведки угольных месторождений Южно-Якутского бассейна. Установлены основные факторы, влияющие на определение достоверных показателей прочностных свойств и литологического состава горных пород. Представлены результаты опробования геолого-геофизического метода изучения литологии в разрезах скважин и доказана возможность применения данного подхода. Также установлены корреляционные связи между геофизическими параметрами и основными физико-механическими свойствами пород угольных месторождений Южно-Якутского бассейна. Приведены данные свидетельствующие о возможности использования полученных корреляционных связей (уравнений) для прогноза физико-механических свойств горных пород по данным геофизических исследований разведочных скважин. Показана возможность применения разработанной методики прогнозирования устойчивости горных пород для построения прогнозных карт устойчивости при разведке угольных месторождений.

Ключевые слова: устойчивость горных пород, углевмещающие горные породы, геофизические исследования скважин, литологический тип, физико-механические свойства горных пород, геолого-геофизический метод прогнозирования устойчивости горных пород

THE FORECAST OF COAL CONTAINING ROCKS SUSTAINABILITY ON THE BASIS OF GEOPHYSICAL DATA

Grib N.N., Kuznetsov P.Y., Syasko A.A., Kachaev A.V.

Technical Institute (branch) FSAEI VPO «North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov», Nerungry, e-mail: kuznetsov.pavel.yu@gmail.com

The developed methodology of rocks stability forecasting on the basis of coal containing rocks lithological composition and their physic-mechanical properties obtained with the involvement of geological-geophysical information, allows to produce a reliable forecast of coal containing rocks sustainability. The article reveals the main factors affecting the determination of reliable indicators of the strength properties and lithological composition of the South-Yakut coal basin rocks. The analysis of the geological-geophysical methods testing results in the study of lithology in sections of the wells has shown an opportunity to use this approach in the exploration of coal deposits. The correlations between the geophysical parameters and the main physical and mechanical properties of coal deposits of the South – Yakut basin were presented. The article presents the data showing the possibility of using the obtained correlations (equations) for the prediction of physical-mechanical properties of rocks according to the data of geophysical research and wells exploration. The possibility of application of the developed forecasting technique of mining rocks stability for making predictive maps of stability in the coal deposits exploration is demonstrated.

Keywords: rocks sustainability, coal containing rocks, geophysical study of wells, lithological type, physic-mechanical properties of rocks, geologic-geophysical method of rocks sustainability forecasting

При разведке и разработке угольных месторождений, учитывая постоянно возрастающие требования к обеспечению эффективной и безопасной разработки месторождений, возникает необходимость в получении и обеспечении прогнозирования достоверной горно-геологической информации при минимилизации затрат на ее получение. Повысить полноту и достоверность горно-геологической информации при соблюдении условия минимилизации затрат на исследования возможно за счёт привлечения геофизических методов и разработки на основе их специализированных методик получения дополнительной информации по месторождению.

Рассматриваемая в статье разработанная методика прогноза устойчивости углевмещающих пород по геофизическим данным включает в себя методы изучения литологического состава углевмещающих пород, их физико-механических свойств (ФМС) и прогнозирования устойчивости горных пород по геолого-геофизическим данным. Методика апробирована для условий Южно-Якутского угольного бассейна, а также может быть адаптирована для угольных месторождений других бассейнов.

При определении в пределах массива литологического типа горных пород необходимо учитывать, что каждый литологический тип характеризуется не только определенным гранулометрическим составом, соотношением глинистого, карбонатного и кластического материала, но и определенной степенью вторичных изменений (эпигенетических) их физических свойств.

Интерпретация материалов геофизических исследований углеразведочных скважин (ГИС) осуществлялась на основе

петрофизических закономерностей, установленных в параметрических скважинах [2].

В основе интерпретации ГИС лежит петрофизическая модель:

$$\begin{cases} \Delta t_p = \Delta t_p^{ф} \cdot C_ф + \Delta t_p^{орг} \cdot C_{орг} + \Delta t_p^{кл} \cdot C_{кл} + \Delta t_p^{гл} \cdot C_{гл} + \Delta t_p^{кар} \cdot C_{кар} \\ \delta_0 = \delta_ф \cdot C_ф + \delta_{орг} \cdot C_{орг} + \delta_{кл} \cdot C_{кл} + \delta_{гл} \cdot C_{гл} + \delta_{кар} \cdot C_{кар} \\ I_\gamma = I_\gamma^{ф} \cdot C_ф + I_\gamma^{орг} \cdot C_{орг} + I_\gamma^{кл} \cdot C_{кл} + I_\gamma^{гл} \cdot C_{гл} + I_\gamma^{кар} \cdot C_{кар} \\ \sigma_n = \sigma_ф \cdot C_ф + \sigma_{орг} \cdot C_{орг} + \sigma_{кл} \cdot C_{кл} + \sigma_{гл} \cdot C_{гл} + \sigma_{кар} \cdot C_{кар} \end{cases} \quad (1)$$

$$C_ф + C_{орг} + C_{кл} + C_{гл} + C_{кар} = 1, \quad (2)$$

где Δt_p, $t_p^{ф}$, $t_p^{орг}$, $\Delta t_p^{кл}$, $\Delta t_p^{гл}$, $\Delta t_p^{кар}$, δ_0, $\delta_ф$, $\delta_{орг}$, $\delta_{кл}$, $\delta_{гл}$, $\delta_{кар}$, I_γ, $I_\gamma^{ф}$, $I_\gamma^{орг}$, $I_\gamma^{кл}$, $I_\gamma^{гл}$, $I_\gamma^{кар}$, $\sigma_п$, $\sigma_ф$, $\sigma_{орг}$, $\sigma_{кл}$, $\sigma_{гл}$, $\sigma_{кар}$ – коэффициенты уравнений, имеющие физический смысл, соответственно интервального времени распространения продольной волны, объемной плотности, интенсивности естественного гамма-излучения и удельной электрической проводимости – флюида и компонентов породы (органического, обломочного, глинистого и карбонатного материала); $C_ф$, $C_{орг}$, $C_{кл}$, $C_{гл}$, $C_{кар}$ – искомые величины: объемного содержания флюида и компонентов породы.

Решение системы петрофизических уравнений выполнялось методом последовательных приближений. В качестве начального приближения принимались значения компонент C_i, имеющего вид:

$$C_i = a_0 + a_1 \cdot f(V_p) + a_2 \cdot f(\delta_0) + a_3 \cdot f(I_\gamma) + a_4 \cdot f(\sigma_п), \quad (3)$$

где a_j $(0 \le j < 4)$ – коэффициенты многочлена, определяемые по данным петрофизических и петрографических исследований пород параметрических скважин; $f(V_p)$, $f(\delta_0)$, $f(I_\gamma)$, $f(\sigma_п)$ функции геофизических параметров.

Опробование геолого-геофизического метода изучения литологии в разрезах скважин было выполнено на участке Локучакит Чульмаканского месторождения.

Абсолютная среднеквадратическая погрешность определения вещественного состава песчаников и алевролитов по геолого-геофизическому методу составила 4,8 % для кластического материала, 3,7 % – для глинистого материала и 5,6 % – для карбонатного материала, т.е. находится в пределах точности их определения по шлифам.

Физико-механические свойства горных пород и скорость распространения упругих волн в них зависят в основном от одних и тех же факторов, однако проявляются они неодинаково. ФМС пород в меньшей степени зависят от вещественного состава кластического материала, а определяются в основном типом и составом цемента, сцементированностью зерен литологических типов, структурно-текстурными особенностями горных пород. Наиболее объективные сведения о физико-механических свойствах массива можно получить при изучении их в естественном залегании горных пород с использованием данных геофизических исследований скважин (ГИС).

Акустические параметры характеризуют закономерности распространения в породах знакопеременных упругих деформаций. Поэтому они имеют тесные корреляционные связи с физико-механическими свойствами и функционально связаны между собой.

Объемная плотность δ_0 горных пород определялась по данным плотностного гамма–гамма–каротажа с точностью ±0,05 г/см^3. Если данные плотности по гамма–гамма–каротажу отсутствуют, то их рассчитывают по формулам:

– для пород, вмещающих марки каменного угля:

$$\delta_0 = -\hat{E}_\delta \cdot \frac{\Delta t_p}{(1 - 0{,}065 \cdot \lg H)} + 2{,}96 \left(\frac{г}{см^3}\right); \quad (4)$$

– для углистых пород и углей марок каменного угля:

$$\delta_0 = -\hat{E}_\delta \cdot \frac{\Delta t_p}{(1 - 0{,}065 \cdot \lg H)} + 3{,}4 \left(\frac{г}{см^3}\right), \quad (5)$$

где $\hat{E}_\delta$ – коэффициент, зависящий от степени литификации пород и конкретных геолого-геофизических условий исследуемой площади.

Прочностные свойства горных пород и скорость распространения упругих волн в них зависит в основном от одних и тех же факторов, однако проявляются они неодинаково. Особенно большое влияние на прочность пород оказывают тип и состав цемента, сцементированность зерен литотипов, структурно-текстурными особенностями горных пород. Одним из основных факторов, связанных с прочностными свойствами, является комплексный модуль $M_{ст}$ – модуль слойчатости-трещиноватости, характеризующийся количеством слойков-трещин на 1 м и углом их наклона.

Корреляционные уравнения связи прочностных свойств с акустическими параметрами имеют многомерный характер, учитывающий как кинематические параметры упругих волн (V_p, V_s), так и динамические (α_p, α_s), а также глубину исследуемого интервала, углы падения пластов, коэффициент, учитывающий степень литификации.

При установлении связей между геофизическими параметрами и прочностными характеристиками пород угольных месторождений Южно-Якутского бассейна анализировались уравнения [4, 5].

$$M_{\text{ст}} = \frac{1{,}66}{(1 - b \cdot \lg H) \cdot (K_f \cdot \alpha_p - a' \cdot \Delta T_p + b')}; \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{сж}} = K_1 \left[10^{0{,}355 V_p (1 - 0{,}065 \cdot \lg H) - 0{,}0405 M_{\text{ст}}^{0{,}55}} + 6{,}6 \left(10^{-0{,}0405 M_{\text{ст}}^{0{,}55}} - 0{,}05 \right)^{\sin\varphi} + 0{,}065^{(1 - \cos\varphi)} \right]; \quad (7)$$

$$\sigma_p = K_1 \left[10^{0{,}363 \cdot V_p (1 - 0{,}065 \cdot \lg H) - 0{,}0405 M_{\text{ст}}^{0{,}55}} + 5{,}7 \left(10^{-0{,}0405 M_{\text{ст}}^{0{,}55}} - 1 \right)^{(1 - \cos\varphi)} \right], \quad (8)$$

где K_f – частотный коэффициент, зависящий от типа применяемой аппаратуры; H – глубина исследуемого интервала, м; ΔT_p – интервальное время распространения продольных волн, мкс/м; α_p – коэффициент затухания продольной волны, дб/м; j – угол падения пород в радианах; $\sigma_{\text{сж}}$, $\sigma_{\text{р}}$ – пределы прочности при одноосном сжатии и растяжении; K_1, a, $a¢$, b, $b¢$ – коэффициенты, зависящие от степени литификации пород и конкретных геолого-геофизических условий исследуемой площади.

По результатам исследований параметрических скважин, где выполнялся акустический каротаж и экспрессное опробование ФМС, расчетные и определенные свойства при испытаниях образцов керна различаются между собой менее 20 % при статистически незначимой систематической погрешности.

Акустический каротаж выполняется в ограниченном числе скважин, он возможен только в интервалах скважин, заполненных промывочной жидкостью. Поэтому в Южно-Якутском бассейне выполнены исследования и разработаны методы изучения физико-механических свойств углевмещающих пород с использованием данных рационального комплекса ГИС, которыми охватывается 100 % скважин.

Основным положением методов является соответствие стадии литификации угленосных пород соответствующей стадии метаморфизма углей и необратимость физико-механических свойств пород, приобретенных в момент максимального погружения.

Учитывая, что в условиях Южно-Якутского бассейна на петрофизические свойства в значительной степени влияет фациально-стратиграфический фактор, обязательным является гамма–каротаж (ГК), поскольку величина естественного радиационного поля массива в целом не зависит от постседиментационных преобразований.

С прочностными свойствами пород коррелирует их способность к разрушению при бурении, что находит свое косвенное отображение в изменении фактического диаметра скважин, поэтому при разработке методов использовались данные кавернометрии (КВ).

Как отмечалось выше, интенсивность естественного гамма-излучения I_g не претерпевает практически изменений при эпигенетических преобразованиях пород и криогенных процессах.

Поэтому данные гамма–каротажа (ГК) позволяют оценить глинистость и литологический состав, которые оказывают доминирующее влияние на прочностные свойства горных пород, слагающих разрезы скважин, пробуренных в многолетнемерзлых породах.

Для уточнения литологического состава и зон дробления горных пород применяется каротаж магнитной восприимчивости (КМВ), так как на магнитную восприимчивость горных пород не оказывают влияние криогенные процессы [3].

Структурно-текстурные особенности разреза оцениваются по данным кавернометрии. Данные об изменении диаметра скважины в процессе бурения можно рассматривать как интегральную характеристику прочностных свойств пород.

Из анализа материалов кавернометрии следует, что при одинаковых условиях бурения наблюдается увеличение диаметра скважины:

а) с повышением содержания в породе органических примесей;

б) с увеличением содержания глинистого цемента;

в) с уменьшением содержания карбонатного цемента, эти же факторы отража-

ются и на диаграммах ГК уменьшением или увеличением интенсивности естественного *g*-излучения. При этих же условиях происходит изменение пределов прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ и одноосное растяжение σ_p. Так, для Эльгинского каменноугольного месторождения уравнения для определения $\sigma_{сж}$ и σ_p мерзлых горных пород имеют вид:

$$\sigma_{сж} = 0,4605 \cdot 10^{4,1 - \frac{d_ф - 0,5 \cdot \Delta H^{-0,63}}{d_H}} + 0,4605 \cdot 10^{-2,3 \cdot \Delta I_\gamma + 3,1}; \quad (9)$$

$$\sigma_p = 0,5 \cdot 10^{3,1 - \frac{d_ф - 0,5 \cdot \Delta H^{-0,63}}{d_H}} + 0,5 \cdot 10^{-2,3 \cdot \Delta I_\gamma + 2,1}, \quad (10)$$

где ΔH – разность между глубиной скважины и глубиной, на которой производятся измерения; ΔI_γ – нормированное значение естественной радиоактивности в относительных единицах.

Из статистического анализа результатов изучения прочностных свойств пород ГИС-2 на Эльгинском месторождении следует, что при отсутствии систематически значимых погрешностей относительные случайные средние квадратические погрешности ниже 20 %.

Разработанные выше методы позволили прогнозировать устойчивость углевмещающих пород по геолого-геофизическим данным. Использование физических параметров угленосных пород в качестве индикаторов их устойчивости обосновано следующими факторами. Повышение скорости распространения упругих волн и удельного электрического сопротивления пород обусловлено повышением содержания в них карбонатного цемента и уменьшением пористости, что одновременно служит и фактором повышения устойчивости этих пород. Повышение электрической проводимости, интенсивности естественного и рассеянного гамма-излучений пород связано с повышением пористости и содержания в них глинистого цемента, что одновременно является причиной ослабления их устойчивости.

Неустойчивые и легкообрушаемые породы кровли сопровождаются значительным увеличением диаметра скважин в процессе бурения. Устойчивые и труднообрушаемые породы кровли характеризуются устойчивостью стенок скважин и весьма малым изменением их фактического диаметра по сравнению с номинальным диаметром.

При разработке геолого-геофизического метода прогнозирования устойчивости горных пород на стадии разведки угольных месторождений в Южно-Якутском бассейне, из-за отсутствия опыта эксплуатации угольных месторождений подземным способом за основу была принята геолого-геофизическая классификация по устойчивости непосредственных и обрушаемости основных кровель, разработанная профессором В.В. Гречухиным [1]. Метод разрабатывался на материалах по пласту $Д_{19}$ Локучакитского участка, где по достаточно густой сети выполнены акустические исследования, позволяющие с требуемой точностью охарактеризовать физико-механические свойства углевмещающих пород. Эти данные легли в основу построения прочностных карт по основной и непосредственной кровлям. Так как на площади Локучакитского участка отсутствуют породы, которые могли бы пучиться под целевым пластом, а также породы, которые могут непредсказуемо уплотняться, то почва пласта не рассматривалась.

Для участка разработана геолого-геофизическая типизация пород кровель [4], которая содержит данные о мощности слоев, о пределах прочности на сжатие, геофизические параметры пород: электрическое сопротивление, скорость распространения продольных волн. В качестве основных параметров при определении типов пород были приняты прочностные характеристики, поскольку значения скорости распространения упругих волн, приведенного диаметра, значение естественной радиоактивности горных пород автоматически учитывалась при определении физико-механических свойств пород. Для прогнозирования устойчивости и обрушаемости пород кровель угольного пласта $Д_{19}$ Локучакитского участка построены литолого-прочностные разрезы, охватывающие интервалы десятикратной мощности угольного пласта. На основании литолого-прочностных разрезов производился прогноз устойчивости и обрушаемости пород кровли угольного пласта, построены карты прочности непосредственной и основной кровли и результирующая прогнозная карта устойчивости пород непосредственной и обрушаемости пород основной кровли.

Список литературы

1. Гречухин В.В. Петрофизика угленосных формаций – М.: Недра, 1990. – 472 с.

2. Гриб Н.Н. Разработка методов прогнозирования технологических характеристик углей, литологического состава и физико- механических свойств углевмещающих пород Южно-Якутского бассейна по геофизическим данным: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Кемерово, 1999. – 49 с.

3. Гриб Н.Н. Опыт применения каротажа магнитной восприимчивости при изучении угленосных отложений Южно-Якутского каменноугольного бассейна // Тез. докл. Международной геофизической конференции «Санкт-Петербург 95» – Т II. – С. 73–74.

4. Гриб Н.Н., Самохин А.В. Физико-механические свойства углевмещающих пород Южно-Якутского бассейна. – Новосибирск: Наука Сиб. предприятие РАН, 1999. – 240 с.

5. Кузнецов П.Ю. Скоморошко Ю.Н. К вопросу о достоверности определения физико-механических свойств пород в Южно-Якутском угольном бассейне // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири: материалы X международной науч.-практ. конф. Кемерово. 23-24 ноября 2004. – Кемерово, 2004. – С. 79–81.

References

1. Grechukhin V.V. *Petrophysica uglenosnih formatsiy* [Petrophysica uglenosnih formatsiy]. Moscow: Nedra, 1990. 472 p.

2. Grib N.N. *Razrabotka metodov prognozirovania tekhnologicheskih kharakteristik ugley, litologicheskogo sostava I physiko-mekhanicheskih svoistv uglevmeshchaushchih porod Yuzhno-Yakutskogo basseina po geophysicheskim dannim* [Grib N.N. Development of technological characteristics of coals forecasting methods, lithological composition and coal-bearing rocks physico – mechanical properties of the South Yakut basin according to geophysical data]. Abstract of doctoral dissertation. Kemerovo, 1999, 49 p.

3. Grib N.N. Mezhdunarodnoy geophyzicheskoy konferentsii «Sankt-Peterburg 95» (International geophysical conference «Saint-Petersburg 95»). Saint-Petersburg, 1995, Vol. II. pp. 73–74.

4. Grib N.N., Samokhin A.V. Physiko-mekhanicheskie svoistva uglevmeshchajushchih porod Yuzhno-Yakutskogo basseina [Physical-mechanical properties of coal-bearing rocks of the South-Yakut basin]. Novosibirsk: Nauka Sib. predpriyatie RAS, 1999. 240 p.

5. Kuznetsov P.Yu., Scomoroshko Yu.N. *Prirodnie i intellektual'nie resursi Sibiri: materiali X mezhdunarodnoi nauch.-pract. conf.* [Natural and intellectual resources of Siberia: proceedings of X international scientific-practical conference], Kemerovo. November 23-24, 2004. Kemerovo, 2004, pp. 79–81.

Рецензенты:

Ткач С.М., д.т.н., директор, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск;

Имаев В.С., д.г-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт земной коры, Сибирское отделение Российской академии наук, г. Иркутск.

Работа поступила в редакцию 11.04.2013.