

А.Б. Цветков, Л.Д. Павлова

ВЫЯВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОРОД ПРИ ОТРАБОТКЕ СВИТЫ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния углепородного массива в окрестности взаимовлияющих горных выработок на сближенных пластах. Задача решена посредством выявления закономерностей нелинейного деформирования пород при отработке свиты угольных пластов, использование которых позволило обосновать оптимальный порядок отработки пластов и рациональное пространственно-временное положение горных выработок. Для проведения вычислительных экспериментов приняты горно-геологические и горнотехнические условия шахты «Есаульская» в Кузбассе. Разработана математическая модель, позволяющая учитывать нелинейное деформирование горных пород при переходе их из упругого в пластическое состояние. Численное моделирование на основе метода конечных элементов реализовано средствами системы символьной математики в виде комплекса проблемно-ориентированных программ. В результате проведения вычислительных экспериментов получены зоны нелинейного деформирования при отходе очистного забоя от монтажной камеры. На основе численного анализа геомеханического состояния области исследования обоснован вывод о том, что техногенное воздействие на углепородный массив привело к трещинообразованию и разуплотнению пород над отработываемым пластом, что способствовало проникновению притока воды из выработок вышележащего затопленного пласта. Полученный вывод подтверждается данными натурных наблюдений. Ключевые слова: зона разгрузки, математическая модель, нелинейное деформирование пород, очистной забой, свита пластов, углепородный массив, численное моделирование.

Угольные месторождения характеризуются включением свиты угольных пластов, которые по мощности, качеству угля, промышленным запасам и другим факторам имеют разную ценность на стадии разработки проектной документации и эксплуатации шахт и разрезов. Отсутствие технических

и технологических решений по предотвращению негативного влияния взаимодействующих геомеханических и газодинамических процессов существенно отражается на возможности повышения промышленной безопасности технологии подземной угледобычи [1].

Отработка пластов в свите подземным способом может проводиться в восходящем или нисходящем порядках, при этом возникает актуальная научно-практическая задача определения напряженно-деформированного состояния геомассива в окрестности взаимовлияющих горных выработок на сближенных пластах.

Решение этой задачи возможно посредством выявления закономерностей нелинейного деформирования пород при отработке свиты пластов, использование которых позволит обосновать оптимальный порядок отработки угольных пластов и рациональное пространственно-временное положение горных выработок.

Для проведения вычислительных экспериментов приняты горно-геологические и горнотехнические условия пластов 26а и 29а шахты «Есаульская» в Кузбассе. Схема расположения выработок приведена на рис. 1.

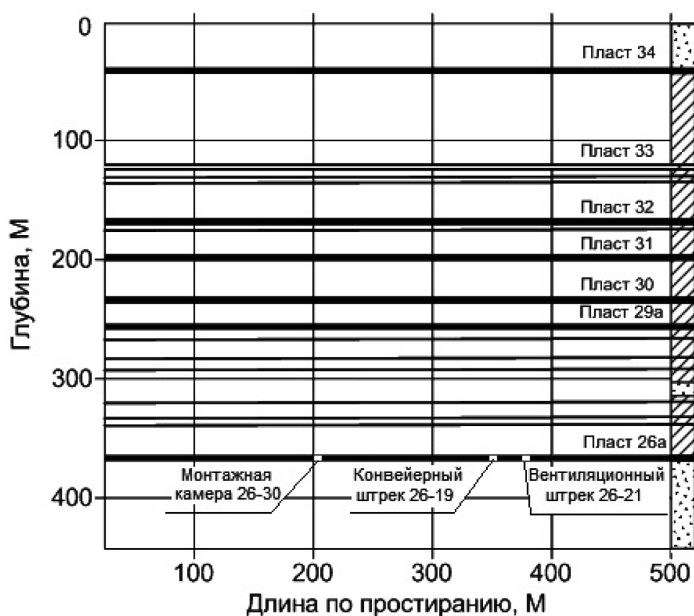


Рис. 1. Схема расположения горных выработок

В соответствии с планом развития горных работ на пласте 26а отработывался выемочный участок 26–30. Очистной комплексно-механизированный забой длиной 255 м перемещался в направлении от монтажной камеры 26–30 в сторону конвейерного штрека 26–19.

На вышележащем пласте 29а ранее отработан выемочный участок 29–63, выработанное пространство которого было затоплено водой.

При подходе очистного забоя 26–30 к конвейерному штреку 26–19 произошел прорыв воды с верхнего пласта в очистной забой, что привело к аварийной ситуации.

С целью предотвращения подобных ситуаций проведено численное моделирование характера деформирования пород между пластами 29а и 26а для выявления положения трещин, по которым произошел прорыв воды.

Для решения поставленной задачи разработана нелинейная математическая модель, отличающаяся от известных возможностью учета нелинейного деформирования горных пород при переходе их из упругого в пластическое состояние. Система уравнений для решения нелинейной задачи теории пластичности в перемещениях имеет вид [2]

$$\mu^* \Delta \bar{u} + (\lambda^* + \mu^*) \operatorname{grad} \operatorname{div} \bar{u} = \bar{F}, \quad (1)$$

где \bar{F} – вектор, учитывающий воздействие веса пород; $\bar{u} = (u, v)$ – вектор перемещений;

$$\lambda^* = \frac{E^* \nu^*}{(1 + \nu^*)(1 - 2\nu^*)}, \quad \mu^* = \frac{E^*}{2(1 + \nu^*)}, \quad E^* = \frac{3E}{2E\psi + 1 - 2\nu},$$

$$\nu^* = \left(\frac{1}{2} - \frac{1 - 2\nu}{E} \frac{1}{2\psi} \right) / \left(1 + \frac{1 - 2\nu}{E} \frac{1}{2\psi} \right) - \text{переменные параметры};$$

E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; функция $\psi = 3\varepsilon / 2\sigma$, которая отражает нелинейную зависимость «напряжения-деформации» обобщенных напряжений от обобщенных деформаций.

В процессе численного моделирования положение очистного забоя последовательно изменялось с шагом 10 м от монтажной камеры 26–30 в направлении к конвейерному штреку 26–19.

На каждом этапе расчета, в соответствии с «Правилами охраны...» [3], осуществлялось построение границ зоны подработанных пород и посредством вычислительного эксперимента

проводилось выявление закономерностей формирования зоны трещиноватости.

В зоне разгрузки, вокруг выработанного пространства, функция Ψ соответствовала нелинейному, а за ее пределами – упругому деформированию. В зонах упругого деформирования она определялась как $\Psi = 3\varepsilon / 2\sigma$, а в зонах нелинейного деформирования пород – $\Psi = \frac{3}{2}(a \cdot \varepsilon^2 + b \cdot \varepsilon + c)$. Коэффициенты a , b , c вычислялись согласно зависимостям [4, 5]:

$$a = \frac{9 \cdot n \cdot \varepsilon^*}{(n \cdot \varepsilon^* - \varepsilon^*)^2 \sigma^*}, \quad b = \frac{1}{\sigma^*} - \frac{18 \cdot n \cdot (\varepsilon^*)^2}{(n \cdot \varepsilon^* - \varepsilon^*)^2 \sigma^*},$$

$$c = \frac{9 \cdot n \cdot (\varepsilon^*)^3}{(n \cdot \varepsilon^* - \varepsilon^*)^2 \sigma^*}, \quad (2)$$

где σ^* – предел прочности пород при сжатии или растяжении; ε^* – предельные сжимающие или растягивающие деформации; n – эмпирический коэффициент.

Для численного моделирования геомеханического состояния углепородного массива в зоне влияния длинного комплексно-механизированного очистного забоя при отработке пласта 26а использовался комплекс проблемно-ориентированных программ, разработанный на основе алгоритма метода конечных элементов и адаптированный к системе символьной математики [6, 7].

Функциональное назначение комплекса программ основано на обобщающей математической модели, которая позволяет строить модели для изучения геомеханического состояния массива при воздействии гравитационных, геотектонических сил, внутреннего давления газа и нелинейного деформирования пород [7, 9].

На рис. 2 приведена зона нелинейного деформирования при отходе очистного забоя от монтажной камеры на 100 и 130 м. Из анализа рисунков в следует, что внутри зоны разгрузки наблюдается ослабление пород, а в зоне опорного давления и вмещающей толще – упругое деформирование.

На рис. 3 приведены результаты нелинейного деформирования пород под влиянием выработанного пространства длиной 130 м.

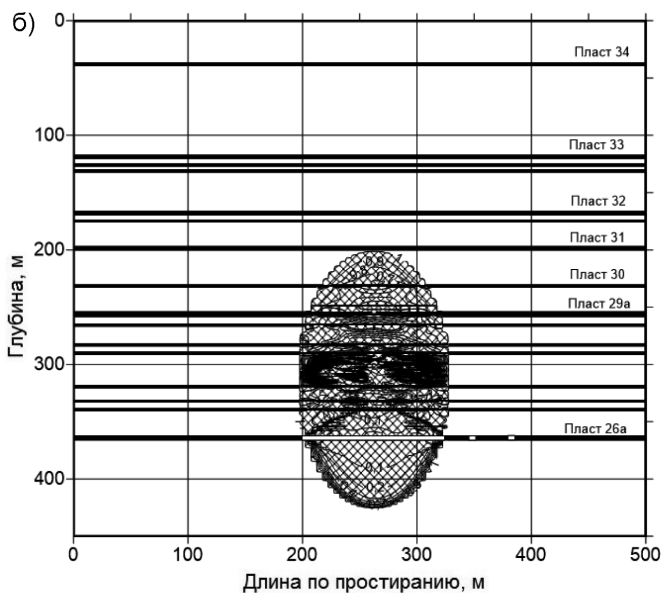
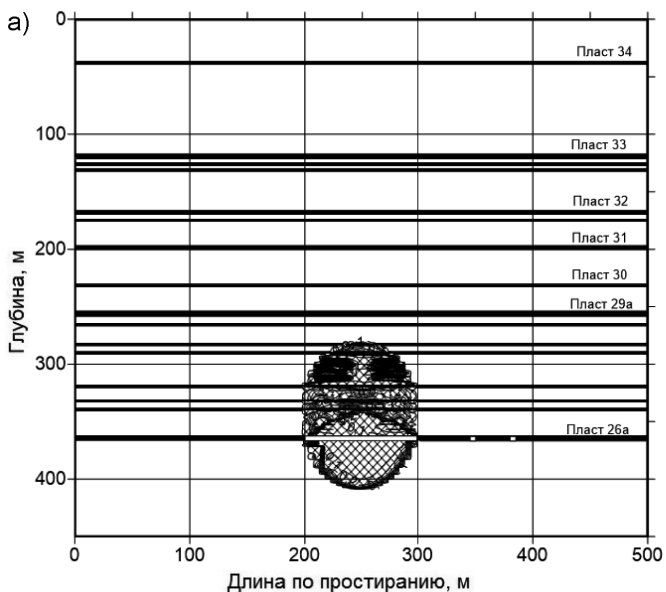


Рис. 2. Отношение секущего модуля деформации к модулю упругости в зонах нелинейного деформирования: длина очистной выработки 100 м (а); длина очистной выработки 130 м (б)

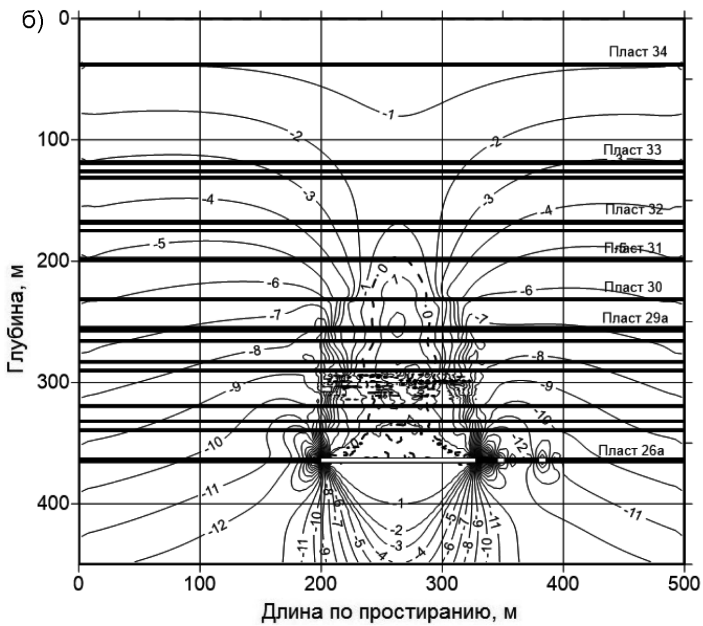
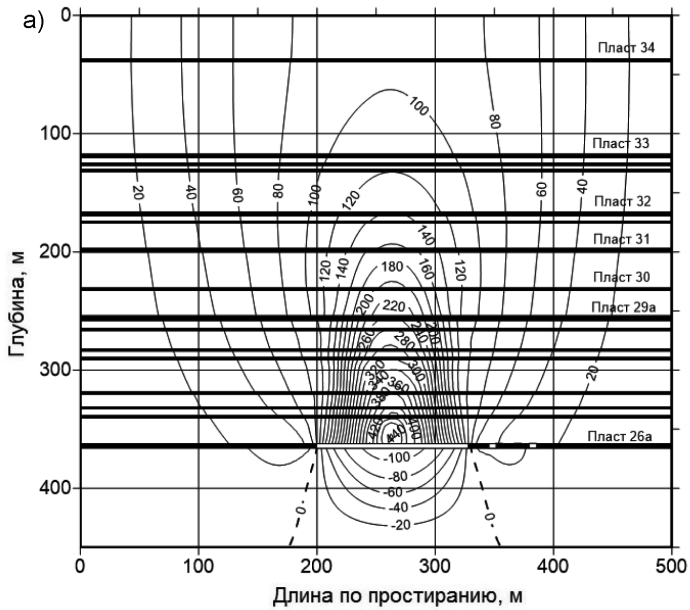


Рис. 3. Изолинии распределения вертикальных смещений, мм (а); вертикальных напряжений, МПа (б)

Проведение очистных работ, приведшее к ослаблению подработанных пород, вызвало образование над кровлей очистной выработки зоны растягивающих вертикальных напряжений, высота которой достигает пласта 29а. Учет нелинейного деформирования горных пород обеспечил выявление закономерности изменения зоны растягивающих напряжений, анализ распределения которых позволил установить, что очистное затопленное пространство пласта 29а расположено в подработанной зоне ослабленных пород отрабатываемого участка пласта 26а. Растягивающие напряжения приводят к образованию зоны повышенной трещиноватости под водным объектом. Трещинообразование и разуплотнение пород способствовало повышению водопроницаемости пород между пластами 26а и 29а и проникновению притока воды из выработок пласта 29а в очистную выработку пласта 26а. Результаты численного моделирования подтверждают, что при создании проектной документации отработки пласта 26а следует разрабатывать мероприятия по предварительному осушению выработок пласта 29а.

Выводы

Таким образом, применение разработанной математической модели нелинейного деформирования горных пород и комплекса проблемно-ориентированных программ обеспечивает получение результатов, соответствующих реальным, поэтому разработанная математическая модель и программный комплекс рекомендуется для практического использования при прогнозе прорывов воды, в том числе при проработке ликвидированных очагов эндогенных пожаров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фрянов В. Н., Павлова Л. Д.* Состояние и направление развития безопасной технологии подземной угледобычи. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – 238 с.
2. *Писаренко Г. С., Можаровский Н. С.* Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести. – Киев: Наукова думка, 1981. – 496 с.
3. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях (ПБ 07-269-98). – М.: Федеральный горный и промышленный надзор России, 1998. – 203 с.
4. *Цветков А. Б.* Моделирование геомеханического состояния с учетом нелинейных свойств горных пород // Научное обозрение. – 2014. – № 8 (Ч. 2). – С. 599–603.

5. *Цветков А. Б., Павлова Л. Д., Фрянов В. Н.* Нелинейная математическая модель геомеханического состояния углепородного массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 1. – С. 365–370.

6. *Цветков А. Б., Павлова Л. Д.* Адаптация алгоритма метода конечных элементов к системе символьной математики / Научные разработки и использования минеральных ресурсов: сборник научных статей. – Новокузнецк, 2015. – С. 121–125.

7. *Цветков А. Б., Павлова Л. Д.* Разработка дискретной модели геомеханического состояния углепородного массива для пакетов символьной математики / 9-ая международная научная практическая конференция, «Будущее вопреки от света на науку» – София, 2013. – С. 21–25.

8. *Цветков А. Б.* Пакет программ NDSolver V1.0 для математического моделирования напряженно-деформированного состояния газозонного геомассива. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 19867 от 10.01.2014 – Объединенный фонд электронных ресурсов «Наука и образование».

9. *Павлова Л. Д., Фрянов В. Н.* Адаптация метода конечных элементов для решения нелинейной задачи расчета параметров объемного напряженно-деформированного состояния разрушаемого углепородного массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 4. – С. 71–76. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Цветков Андрей Борисович*¹ – кандидат технических наук, доцент, e-mail: atsvet@mail.ru,

*Павлова Лариса Дмитриевна*¹ – доктор технических наук, доцент, директор института фундаментального образования, зав. кафедрой, e-mail: lara@rdtc.ru,

¹ Сибирский государственный индустриальный университет.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 10, pp. 324–332.

UDC 622:
519.635.4

A.B. Tsvetkov, L.D. Pavlova

IDENTIFICATION OF PATTERNS OF NONLINEAR DEFORMATION OF ROCKS IN RETINUE OF COAL SEAMS

The article presents the research results of stress-strain state of the coal mass in the zone of influence of several mine workings in adjacent seams. The task is solved by means of detection of laws of nonlinear deformation of rocks at working of retinue of the coal seams, it has allowed to prove an optimum sequence of mining of seams and rational spatiotemporal position of mining workings. At performance of calculations are accepted mining-and-geological and mining conditions the mine «Esaulsky» in Kuzbas.

For solve this problem developed a mathematical model allowing to take into account the nonlinear deformation of rocks during their transition from elastic to a plastic strains. Numerical simulation based on the finite element method was carried out in complex problem-

oriented program, which is developed in the system of symbolic mathematics. As a result of computational experiments obtained area of nonlinear deformation during the withdrawal coalface from the mounting chamber. On the basis of numerical analysis of geomechanical condition of the field of research the conclusion is that the technogenic impact on coal massif has resulted in the softening and cracking of rocks above the mined seam, which contributed to the penetration of water from overlying workings. This conclusion is confirmed by the observation of mine.

Key words: unloading zone, mathematical model, nonlinear deformation of rocks, stope, series of strata, coal massif, numerical modelling.

AUTHORS

*Tsvetkov A.B.*¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: atsvet@mail.ru,

*Pavlova L.D.*¹, Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Director of Institute of Fundamental Education, Head of Chair, e-mail: lara@rdtc.ru,

¹ Siberian State Industrial University, 654007, Novokuznetsk, Russia.

REFERENCES

1. Fryanov V.N., Pavlova L. D. *Sostoyanie i napravlenie razvitiya bezopasnoy tekhnologii podzemnoy ugledobychi* (Condition and direction of development of safe technique of underground coal mining), Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2009, 238 p.

2. Pisarenko G. S., Mozharovskiy N. S. *Uravneniya i kraevye zadachi teorii plastichnosti i polzuchesti* (Equations and boundary tasks of the theory of plasticity and creep), Kiev, Naukova dumka, 1981, 496 p.

3. *Pravila okhrany sooruzheniy i prirodnykh ob'ektov ot vrednogo vliyaniya podzemnykh gornykh razrabotok na ugol'nykh mestorozhdeniyakh* (PB 07-269-98) (The rules of protection of buildings and natural objects from harmful influence of underground mining in coal deposits (PB 07-269-98)), Moscow, Federal'nyy gornyy i promyshlennyy nadzor Rossii, 1998, 203 p.

4. Tsvetkov A. B. *Nauchnoe obozrenie*. 2014, no 8 (Ch. 2), pp. 599–603.

5. Tsvetkov A. B., Pavlova L. D., Fryanov V. N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 1, pp. 365–370.

6. Tsvetkov A. B., Pavlova L. D. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov: sbornik nauchnykh statey* (High technologies of development and use of mineral resources: a collection of scientific articles), Novokuznetsk, 2015, pp. 121–125.

7. Tsvetkov A. B., Pavlova L. D. *9-aya mezhdunarodna nauchna praktichna konferentsiya, «B"deshecho v"prosi ot sveta na naukata»* (Development of discrete model of a geomechanical condition of coal massif for system of symbolical mathematics), Sofiya, 2013, pp. 21–25.

8. Tsvetkov A. B. Paket programm NDSolver V1.0 dlya matematicheskogo modelirovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gazonosnogo geomassiva. *Svidetel'stvo o registratsii elektronnoy resursa № 19867 ot 10.01.2014 Ob"edinenny fond elektronnykh resursov «Nauka i obrazovanie»* (NDSolver V1.0 software package for mathematical modeling of stress-strain state of the rock mass containing gas. The certificate on registration of an electronic resource No. 19867 of 10.01.2014 – the Joint fund of the electronic resources «Science and education»).

9. Pavlova L. D., Fryanov V. N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2008, no 4, pp. 71–76.