

DOI: 10.26730/1999-4125-2017-6-61-68

УДК 622.831:519.876.5

**ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ И ШАХТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАРАМЕТРОВ
НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ
ПОРОД**

**EVALUATION OF CONFORMANCE OF THE RESULTS OF NUMERICAL
MODELING AND MINE STUDY OF THE PARAMETERS OF ROCK MASS
STRESS-STRAIN BEHAVIOR**

Черепов Андрей Александрович¹, e-mail: Andrey.Cherepov@evraz.com

Cherepov Andrey A.¹

Павлова Лариса Дмитриевна²,

доктор техн. наук, профессор, e-mail: ld_pavlova@mail.ru

Pavlova Larisa D.², Dr. Sc. in Engineering

¹АО «Распадская угольная компания», 654007, Россия, г. Новокузнецк, пр. Курако, 33.

¹JSC Raspadskaya Coal Company, 33, Kurako Ave., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

²Сибирский государственный индустриальный университет, 654007, Россия, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42

²Siberian State Industrial University, 42, street Kirova, Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

Аннотация. Актуальность работы. Оценка соответствия результатов численного моделирования, геофизического прогноза и натурных измерений геомеханических параметров состояния массива горных пород является актуальной для обеспечения безопасной и эффективной отработки удароопасных угольных пластов на больших глубинах.

Цель работы: обоснование метода комплексного прогноза геомеханического состояния массива горных пород при отработке короткими забоями мощного, склонного к горным ударам, угольного пласта.

Методы исследований: численное моделирование геомеханических процессов посредством решения упруго-пластической задачи горной геомеханики; шахтные инструментальные измерения деформаций горных пород в окрестности подземных выработок геофизические методы прогноза состояния массива горных пород.

Результаты: доказано соответствие полученных разными методами результатов геомеханического прогноза; обоснована возможность синтеза полученных результатов при выборе противоударных мероприятий для безопасной отработки склонных к газодинамическим явлениям угольных пластов.

Abstract. Applicability. Evaluation of conformance of the results of numerical modeling, geophysical prediction and full-scale measurements of geomechanical parameters of rock mass is significant for ensuring safe and effective mining of coal seams prone to rock bumps at great depths.

The purpose of the work is substantiation of the method of complex prediction of the rock mass geomechanical state in shortwall face mining of thick coal seam prone to rock bumps.

The research methods are as follows: numerical modeling of geomechanical processes by means of solving the elastic-plastic problem of the mining geomechanics; underground instrumental measurements of rock deformations in the vicinity of underground workings; methods of geophysical prediction of the rock mass behavior.

Results. The conformance of the geomechanical prediction results obtained by different methods is proved; the possibility of synthesis of the obtained results in selection of anti-bump measures for safe mining of coal seams prone to gas-dynamic phenomena is substantiated.

Ключевые слова: горный удар, угольный пласт, напряжения, деформации, шахтные измерения, короткие забои.

Key words: rock bump, coal seam, stress, deformations, underground measurements, shortwall faces.

Введение

С целью оценки напряжённо-деформированного состояния массива горных пород на угольных шахтах применяются различные методы и средства решения задач горной геомеханики [1, 2]. Учитывая, что в последние годы резко сократился объём натурных измерений деформа-

ций горных пород, возросла роль численных и геофизических методов с использованием оригинальных пакетов компьютерных программ [3] и современного геофизического оборудования [4-6]. Однако возникает актуальная научно-практическая задача оценки соответствия результатов численного моделирования, геофизического

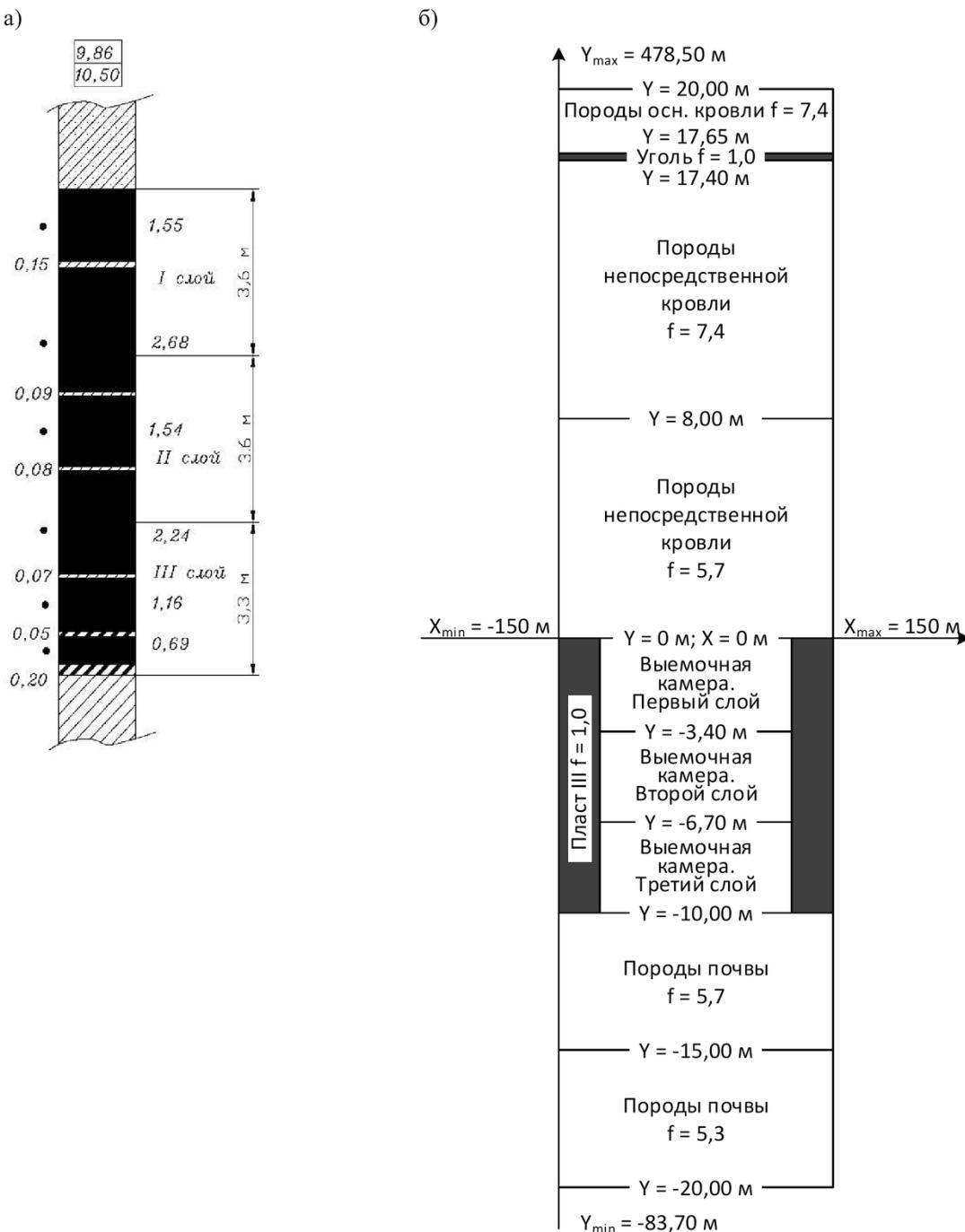


Рис. 1. Литологическая колонка по геологоразведочной скважине №3270, шахта ЗАО «Распадская-Коксовая»: а - структурная колонка пласта III; б - структурная колонка пласта III и вмещающих пород в расчётной модели с учётом выделения отрабатываемых слоёв

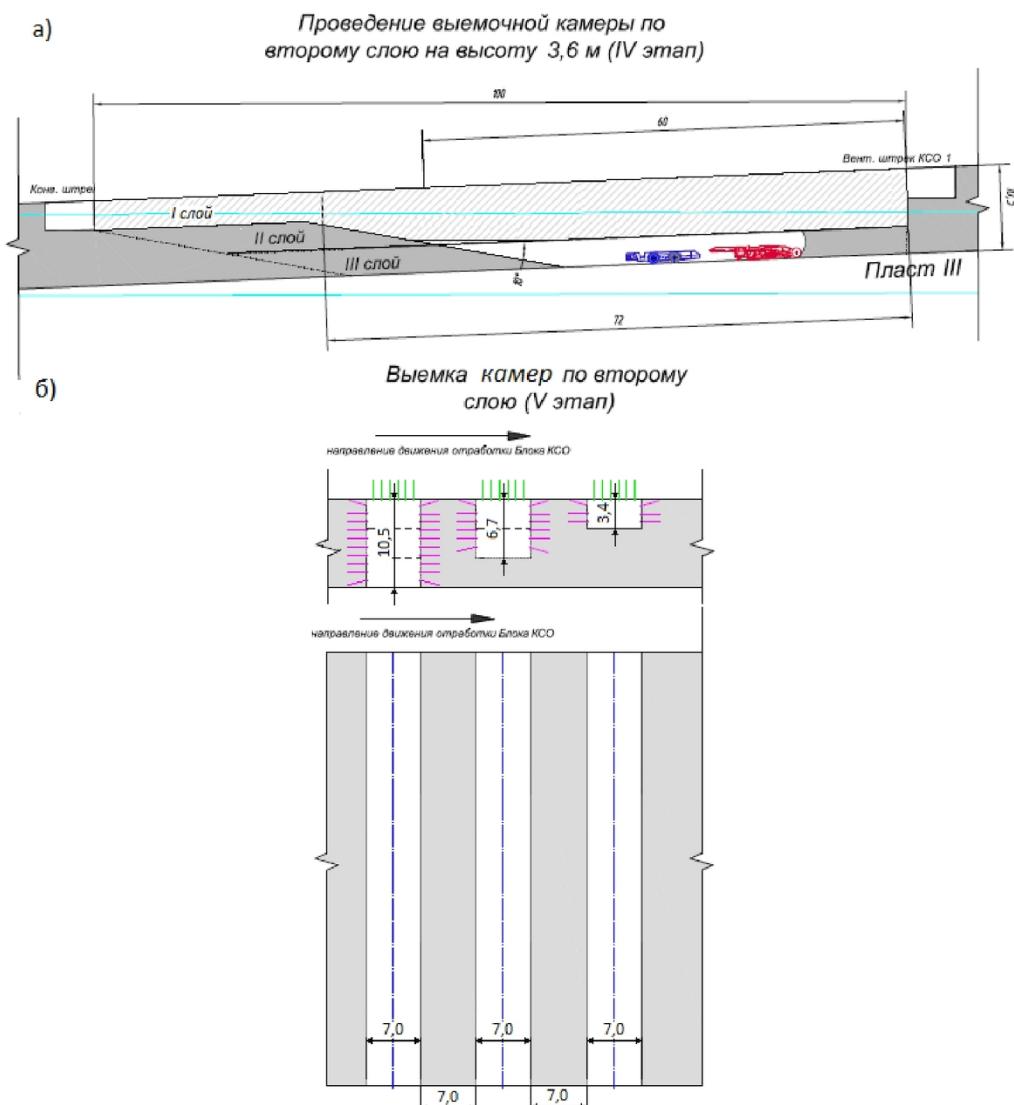
расчетной модели с учетом выделения обрабатываемых слоев
 Fig.1. Lithological column for geological exploration well N 3270, mine of “Raspadskaya-Koksovaya”
 JSC: a - structural column of the seam III; b - structural column of the seam III and enclosing rocks in
 simulation model with allocation of the processing layers

прогноза и натурных измерений параметров состояния массива горных пород. Для решения этой задачи рассмотрены варианты изменения параметров напряженно-деформированного состояния при отработке мощного пологого пласта камерно-столбовой и камерной системами разработки. Учитывалось влияние одиночной камеры, нескольких параллельных камер, а также заходок при частичной выемке междукамерного целика.

Объект исследования

В качестве объекта исследования приняты геомеханические процессы при отработке мощного пологого пласта III в условиях шахты ЗАО «Распадская-Коксовая» (Кузбасс) (рис. 1).

Пласт III – один из самых мощных на участке «Поле шахты №2» (рис.1), выдержаный, строение от простого до очень сложного. Содержит более 8 прослоев породы мощностью 0,05-0,40 м, представленных аргиллитами и алевролитами. Мощность пласта от 7,86 до 13,03 м, в среднем 10,64 м. Выше пласта III на расстоянии 38-40 м залегает пласт I. Ложная кровля представлена аргиллитами. Непосредственная кровля пласта мощностью 17,4 м представлена алевролитами крупно- и мелкозернистыми. На границе непосредственной и основной кровли залегает угольный пласт мощностью 0,1-0,4 м. Основная кровля представлена песчаниками светло-серыми, мелкозерни-



стыми, характеризуется как труднообрушающаяся. Непосредственная почва представлена алевролитами мелкозернистыми с переслаиванием алевролитов с песчаниками, местами трещиноватая. Пласт склонный к горным ударам.

Глубина горных работ на участках КСО 1-1 КСО 1-2 (камерно-столбовая система разработки с обрушением пород кровли) составляет 300-370 м. Проектная мощность участка 300 тыс. т угля в год. Пласт III мощностью 10,2 м отрабатывается короткими забоями с послойной выемки угля в камерах шириной 7 м и оставлением между камерными целиков такой же ширины (рис. 2).

Предметом исследования являются закономерности распределения вертикальных напряжений в угольных целиках и краевых участках пласта сложной формы.

Результаты и обсуждение

Рассмотрены следующие результаты исследований:

- геомеханические параметры: напряжения, деформации, коэффициент дезинтеграции угля и пород, полученные при численном моделировании геомеханических процессов с использованием оригинального комплекса программ [7];

- оценка деформаций состояния угольного массива при выбуривании буровой мелочи по методике ВНИМИ [8];

- инструментальные измерения напряжённого состояния массива горных пород с использованием аппаратурой АЭШ-1 [4], исследования проводились совместно специалистами шахта ЗАО «Распадская-Коксовая», Кемеровского филиала ВНИМИ и АО «НЦ ВостНИИ».

Результаты численного моделирования геомеханических процессов в массиве горных пород при отработке короткими забоями мощного, склонного к горным ударам, пласта III.

В процессе численного моделирования определялись следующие параметры напряженно-деформированного состояния геомассива [9, 10]:

σ_y – вертикальные напряжения, МПа; принято следующее правило знаков напряжений: $\sigma_y < 0$ – вертикальные сжимающие напряжения в породах; $\sigma_y > 0$ – вертикальные растягивающие напряжения в породах;

σ_x – горизонтальные напряжения, МПа; принято следующее правило знаков напряжений: $\sigma_x < 0$ – горизонтальные сжимающие напряжения в породах; $\sigma_x > 0$ – горизонтальные растягивающие напряжения в породах;

η – вертикальные смещения углепородного массива, мм; принято следующее правило знаков вертикальных смещений: $\eta < 0$ – вертикальные оседания пород относительно начального положения в нетронутом массиве; $\eta > 0$ – вертикальные поднятия (пучение) пород относительно начального положения в нетронутом массиве;

ξ – горизонтальные смещения углепородного

массива, мм; принято следующее правило знаков горизонтальных смещений: $\xi < 0$ – горизонтальные смещения пород в отрицательном направлении оси абсцисс относительно начального положения в нетронутом массиве; $\xi > 0$ – горизонтальные смещения пород в положительном направлении оси абсцисс (смещения вправо на рисунках) относительно начального положения в нетронутом массиве;

Коэффициент дезинтеграции угля и пород вычислялся как отношение остаточной прочности к исходной прочности по формуле:

$$k = \frac{\sigma}{\sigma_0},$$

где k – коэффициент дезинтеграции угля и пород; σ – остаточная прочность угля или пород при сжатии, определяется по вычисленным напряжениям и паспорту прочности, построенному по теории Кулона-Мора с использованием исходных данных технологических отделов шахт и первоисточников [11, 12]; σ_0 – предел прочности угля или пород при сжатии, определяется по результатам лабораторных или шахтных исследований [13–15].

На основе сравнения результатов численного моделирования и шахтных измерений деформаций пород кровли по глубинным реперам, величин отжима угля с боков, пучения пород почвы и вывалов пород кровли выработок различного назначения установлены следующие критерии состояния угля и пород:

при $k > 0,7$ – угля или порода находятся в устойчивом состоянии, дополнительные трещины не образуются, разрушения отсутствуют;

при изменении k в пределах $0,5 < k \leq 0,7$ угля или порода на контуре выработки находятся в упруго-пластическом состоянии, возможно образование трещин, блоков;

при $k \leq 0,5$ угля или порода находятся в за- предельном состоянии, частично разрушены, в боках возможен отжим угля, в кровле вывалы, в почве параллельно оси выработки образуются трещины шириной до 300 мм, происходит пучение пород.

На рис.3, в качестве иллюстрации возможностей численного моделирования с использованием оригинального комплекса программ [7], приведены, изолинии распределения коэффициент дезинтеграции угля и пород при взаимном влиянии двух соседних камер в выемочном блоке.

Оценка деформаций и состояния угольного массива при выбуривании буровой мелочи.

По результатам шахтных наблюдений, проведённых совместно с учёными ВНИМИ, ВостНИИ, в условиях, близких к указанным на рис. 3, выявлены следующие формы проявления горного давления:

- отжим угля с боков выработок до 400 мм, что качественно соответствует форме зоны предельного состояния угля, установленной по ре-

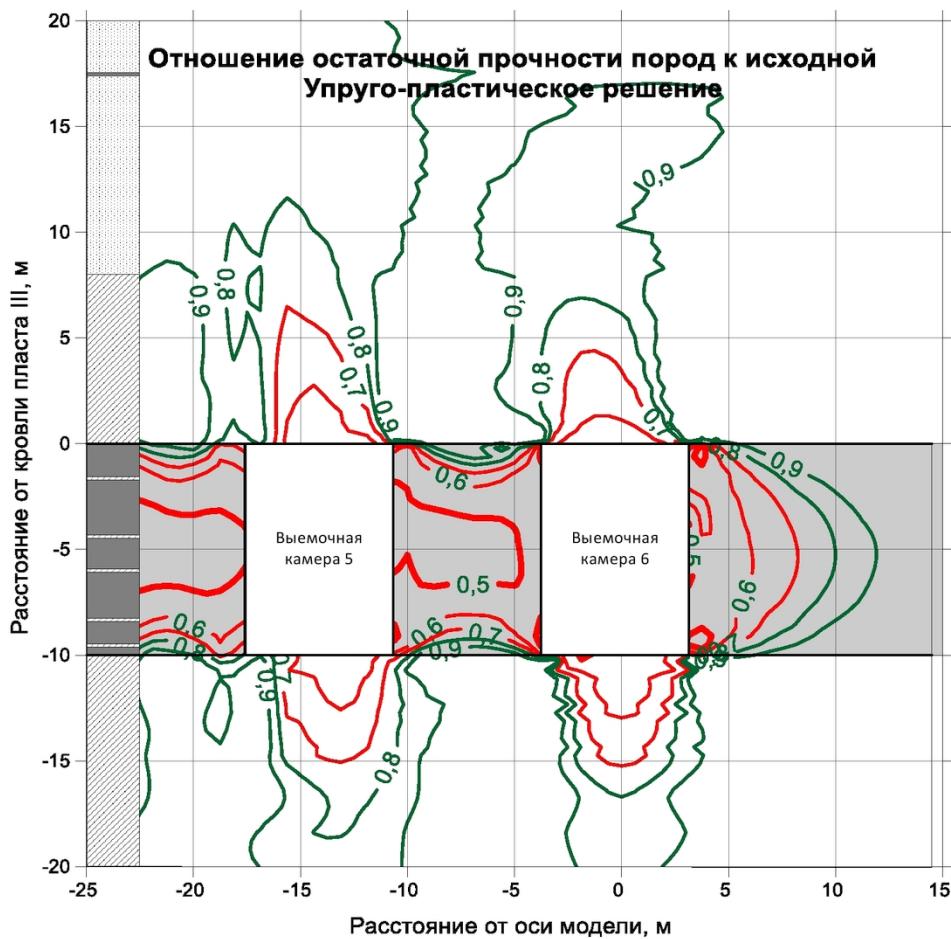


Рис. 3. Изолинии распределения коэффициента дезинтеграции угля и пород при взаимном влиянии двух соседних камер в выемочном блоке

Fig.3. The distribution isolines coefficient of coal and rock disintegration under mutual influence of two adjacent rooms in mining block

зультатам численного моделирования (рис. 3);

- выдавливания и осыпания угля на сопряжении кровли и бока выработок, оголения анкеров, что подтверждается коэффициентом дезинтеграции угля в этой зоне менее 0,5 (рис. 3);

- уголь в междукамерных целиках, соответствию с результатами моделирования, находится в запредельном состоянии (рис. 3), что подтвердилось при бурении двух прогнозных шпуров глубиной до 6 м в выемочной камере №3 блока КСО 3-1-1 в сторону выемочной камеры №2 и №4. Выход буровой мелочи составлял 2,0 до 3,0 литра с метра, что подтверждает отсутствие категории ОПАСНО.

По результатам численного моделирования и шахтных исследований было рекомендовано для обеспечения безопасной эксплуатации выработок провести крепление боков с установкой анкеров, имеющих длину не менее 3,2 - 3,5 метра и с закреплением их в скважине смолой (ампулами) по длине не менее, чем 2,0 метра. Предложено уменьшить расстояние между рядами анкеров до 1,0 метра. Указанные рекомендации реализованы на шахте ЗАО «Распадская-Коксовая». Установка

анкерной крепи в камере (рис. 4), привела к существенному уменьшению размеров зон запредельного состояния в окрестности камер по сравнению с зонами, приведенными на рис.3.

Инструментальные измерения напряжённого состояния массива горных пород с использованием аппаратурой АЭШ-1

Сравнение размеров зон дезинтеграции угля, полученных по результатам численного моделирования и измерений параметра F импульсного электромагнитного излучения массива горных пород по методике ВНИМИ, аппаратурой АЭШ-1, представлено в таблице 1.

Как следует из таблицы, ширина зон трещиноватости в штреках и выемочных камерах, установленная по результатам численного моделирования и инструментальным измерениям импульсного электромагнитного излучения массива горных пород, отличается в допустимых для практики пределах, величины конвергенции кровли и почвы, а также боков камер - в пределах погрешности инструментальных измерений.

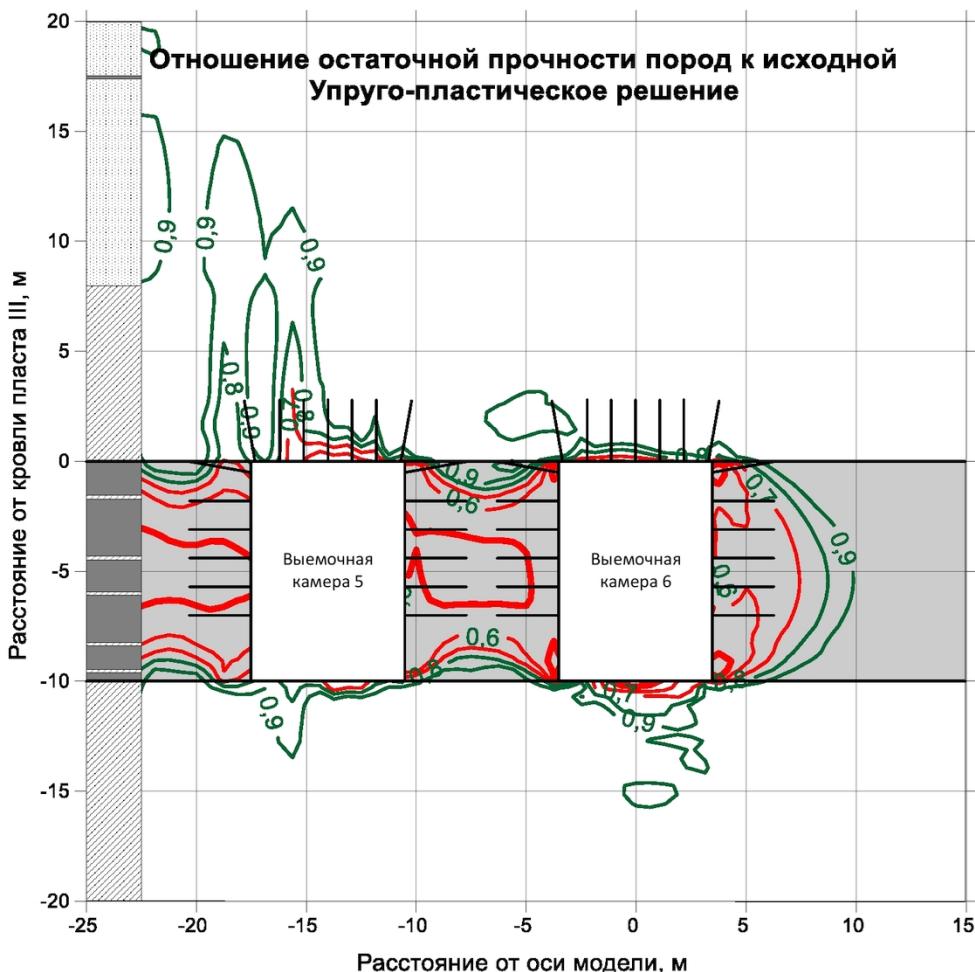


Рис. 4. Изолинии распределения коэффициент дезинтеграции угля и пород при взаимном влиянии двух соседних камер в выемочном блоке после установки анкерной крепи

Fig.4. Distribution isolines coefficient of coal and rocks disintegration under mutual influence of two adjacent rooms in mining block after the roof bolting

Таблица 1. Сравнение вычисленных и измеренных геомеханических параметров
Table 1. Comparison of calculated and measured geomechanical parameters

Наименование параметра, раз- мерность	Адрес участка наблюдений	Результаты численного моделирова-ния	Результаты шахтных измерений	
			величина	источник
Ширина зоны трещиноватости, запредельного состояния угля, м	Магистральный штрек пласта III	1-6	3-7	ВНИМИ
Ширина зона трещиноватости, запредельного состояния угля, м	Выемочная камера №2	3-7	3-4	ВНИМИ
Конвергенция, кровля - почва, мм	Целик между каме-рами	60 - 85	48 - 78	ВостНИИ
Конвергенция, бок - бок, мм	Целик между каме-рами	100 - 190	126 - 210	ВостНИИ

Вывод

Доказано соответствие геомеханических параметров, установленных по результатам численного моделирования, шахтного эксперимента и исследований, проведённых ВНИМИ и ВостНИИ.

Внедрение полученных рекомендаций обеспечивает сокращение площади зон запредельного состояния угля и пород в окрестности камер при послойной отработке склонных к горным ударам мощных пластов.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020

годы» по теме «Разработка технологии эффективного освоения угольных месторождений роботизированным комплексом с управляемым выпуском подковельной толщи» (Уникальный идентификатор RFMEF160417X0173).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы и средства решения задач горной геомеханики / Г.Н. Кузнецов, К.А. Ардашев, Н.А. Филатов и др. – М.: Недра, 1987. – 248 с.
2. Kabwe E., Wang Y. Review on Rockburst Theory and Types of Rock Support in Rockburst Prone Mines // Open Journal of Safety Science and Technology. 2015. Vol. 5. P. 104–121.
3. Корнев Е.С. Численное моделирование геомеханических процессов при короткозабойной отработке угольных пластов : монография / Е.С. Корнев, Л.Д. Павлова, В.Н. Фрянов. – Прага: Vědecko vydavatelské centrum «Sociosféra-CZ», 2014. – 206 с.
4. Методические указания по созданию систем контроля состояния горного массива и прогноза горных ударов как элементов многофункциональной системы безопасности угольных шахт. [Текст] / Д.В. Яковлев [и др.] – СПб.: ВНИМИ, - 2012.- 83 с.
5. Система локального и текущего контроля состояния горного массива «Микон-ГЕО» [Текст]/ Екатеринбург: ООО «ИНГОРТЕХ», 2012. – Режим доступа: <http://www.ingortech.ru/uslugi/item/228> - 09.07.2012.
6. Xiao Y.-X., Feng X.-T., Hudson J. A., Chen B.-R., Feng G.-L. et al. ISRM Suggested Method for In Situ Microseismic Monitoring of the Fracturing Process in Rock Masses // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2016. Vol. 49. Iss. 1. P. 343–369.
7. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 2673. Пространственная расчётная модель динамического блочного обрушения горных пород с последовательным накоплением повреждений / В.Н. Фрянов, Л.Д. Павлова; Дата регистр. 05.06.2003. – М.: Роспатент, 2003.
8. Предупреждение газодинамических явлений в угольных шахтах: Сборник документов. Серия 05. Выпуск 2 / Колл. авт.– М.: ЗАО «НТИЦ исследований проблем промышленной безопасности», 2011. – 304 с. – Режим доступа: <http://files.stroyinf.ru/Data2/14293811/4293811978.files/2.gif>
9. Корнев Е. С. Численное моделирование геомеханического состояния геомассива при двусторонней выемке коротких угольных столбов / Е. С. Корнев, Л. Д. Павлова, В. Н. Фрянов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (108). - С. 20-26.
10. Фрянов В.Н. Моделирование напряжённо-деформированного состояния горного массива при отработке выемочного столба сложной формы / В.Н. Фрянов, Л.Д. Павлова // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. Том 4, № 2: — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2017. - С. 169 - 174.
11. Свойства горных пород и методы их определения / Ильницкая Е.И., Тедер Р.И., Ватолин Е.С., Кунтыш М.Ф. –Москва: Недра, 1969. – 392 с.
12. Физико-технические свойства горных пород и углей/ Г.Г. Штумпф, Ю.А. Рыжков, В.А. Шаламанов, А.И. Петров. – М.: Недра, 1994. - 447 с.
13. Расчетные методы в механике горных ударов и выбросов / И.М. Петухов, А.А. Линьков, В.С. Сидоров и др. – М.: Недра, 1992. – 256с.
14. Лазаревич Т.И., Поляков А.Н. Об изменении базовых геомеханических параметров в условиях использования интенсивных технологий подземной добычи угля/ Т.И. Лазаревич, А.Н. Поляков // Наукоёмкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. Сб. науч. трудов СибГИУ. – 2015. – С. 314 – 322.
15. Stoeckhert F., Molenda M., Brenne S., Alber M. Fracture propagation in sandstone and slate – laboratory experiments, acoustic emissions and fracture mechanics // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2015. Vol. 7. Iss. 3. P. 237–249.

REFERENCES

1. Metody i sredstva reshenija zadach gornoj geomehaniki / G.N. Kuznecov, K.A. Ardashev, N.A. Filatov i dr. – M.: Nedra, 1987. – 248 s. (in Russian)
2. Kabwe E., Wang Y. Review on Rockburst Theory and Types of Rock Support in Rockburst Prone Mines // Open Journal of Safety Science and Technology. 2015. Vol. 5. P. 104–121.
3. Kornev E.S. Chislennoe modelirovaniye geomekhanicheskix processov pri korot-kozabojnoj otrobote ugol'nyx plastov : monografiya / E.S. Kornev, L.D. Pavlova, V.N. Fryanov. – Praga: Vědecko vydavatelské cen-

trum «Sociosféra-CZ», 2014. – 206 s. (in Russian)

4. Metodicheskie ukazaniya po sozdaniyu sistem kontrolya sostoyaniya gornogo massiva i prognoza gornyx udarov kak elementov mnogofunkciagal'noj sistemy bezopasnosti ugol'nyx shaxt. [Tekst]/ D.V. Yakovlev [i dr.] – SPb.: VNIMI, - 2012.- 83 s. (in Russian)

5. Sistema lokal'nogo i tekushhego kontrolya sostoyaniya gornogo massiva «Mikon-GEO» / Ekaterinburg: OOO «INGORTEX», 2012. – Rezhim dostupa: <http://www.ingortech.ru/uslugi/item/228> - 09.07.2012.Xiao Y.-X., Feng X.-T., Hudson J. A., Chen B.-R., Feng G.-L. et al. ISRM Suggested Method for In Situ Microseismic Monitoring of the Fracturing Process in Rock Masses // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2016. Vol. 49. Iss. 1. P. 343–369. (in Russian)

6. Xiao Y.-X., Feng X.-T., Hudson J. A., Chen B.-R., Feng G.-L. et al. ISRM Suggested Method for In Situ Microseismic Monitoring of the Fracturing Process in Rock Masses // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2016. Vol. 49. Iss. 1. P. 343–369.

7. Svidetel'stvo ob otrassevye registraciya razrabotki № 2673. Prostranstvennaya raschyotnaya model' dinamicheskogo blochnogo obrusheniya gornyx porod s posledova-tel'nym nakopleniem povrezhdenij / V.N. Fryanov, L.D. Pavlova; Data registr. 05.06.2003. - M.: Rospatent, 2003. (in Russian)

8. Preduprezhdenie gazodinamicheskix yavlenij v ugol'nyx shaxtax: Sbornik dokumentov. Seriya 05. Vypusk 2 / Koll. avt.–M.: ZAO «NTC issledovanij problem pro-myshlennoj bezopasnosti», 2011. – 304 s. Rezhim dostupa: <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293811/42938111978.files/2.gif> (in Russian)

9. Kornev E. S. Chislennoe modelirovanie geomekhanicheskogo sostoyaniya geomassiva pri dvustoronnej vyemke korotkix ugol'nyx stolbov / E. S. Kornev, L. D. Pavlova, V. N. Fryanov // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. – 2015. – № 2 (108). - S. 20-26. (in Russian)

10. Fryanov V.N. Modelirovanie napryazhyonno-deformirovannogo sostoyaniya gornogo massiva pri otrabotke vyemochchnogo stolba slozhnoj formy / V.N. Fryanov, L.D. Pavlova // Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornyx nauk. Tom 4, № 2: — Novosibirsk: IGD SO RAN, 2017. - S. 169 - 174. (in Russian)

11. Svojstva gornyx porod i metody ix opredeleniya / Il'nickaya E.I., Teder R.I., Vatolin E.S., Kuntyshev M.F. – Moskva: Nedra, 1969. – 392 s. (in Russian)

12. Fiziko-texnicheskie svojstva gornyx porod i uglej/ G.G. Shtumpf, Yu.A. Ryzh-kov, V.A. Shalamanov, A.I. Petrov. – M.: Nedra, 1994. - 447 s. (in Russian)

13. Raschetnye metody v mehanike gornyx udarov i vybrosov / I.M. Petuxov, A.A. Lin'kov, V.S. Sidorov i dr. – M.: Nedra, 1992. – 256s. (in Russian)

14. Lazarevich T.I., Polyakov A.N. Ob izmenenii bazovyx geomekhanicheskix parametrov v usloviyah ispol'zovaniya intensivnyx texnologij podzemnoj dobychi uglya / T.I. Lazarevich, A.N. Polyakov // Naukoyomkie texnologii razrabotki i ispol'zovaniya mine-ral'nyx resursov. Sb. nauch. trudov SibGIU. – 2015. – S. 314 – 322. (in Russian)

15. Stoeckhert F., Molenda M., Brenne S., Alber M. Fracture propagation in sandstone and slate – laboratory experiments, acoustic emissions and fracture mechanics // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2015. Vol. 7. Iss. 3. P. 237–249.

Поступило в редакцию 15.11.2017

Received 15.11.2017