УДК
622.834.2:
519.62:
519.254

И.А. Поздеев, И.М. Поздеева, П.В. Васильев

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА ОТ РАСПОРА СЕКЦИИ КРЕПИ МЕХАНИЗИРОВАННОГО ЗАБОЯ

Обозначена актуальная научно-практическая задача и предложен вариант ее решения. Проведены исследования зависимости параметров напряженно-деформированного состояния углепородного массива в окрестности очистного забоя от распора механизированной крепи. Выявлены виды функций, наиболее адекватно описывающих зависимости исследуемых параметров.
Ключевые слова: комплексно-механизированный забой, параметры напряженно-деформированного состояния геомассива, распор секции механизированной крепи, численное моделирование, метод наименьших квадратов, эмпирическая функция, коэффициент корреляции.

В соответствии с результатами анализа причин внеплановых остановок очистного забоя, проведенного авторами, следует, что в процессе ведения горных работ в комплексно-механизированном очистном забое (КМЗ) наблюдаются такие явления как вывалы негабаритных кусков пород кровли на забойный конвейер, отжим угля с поверхности очистного забоя, высыпание пород кровли между секциями крепи, при их передвижке, пучение пород почвы. Данные явления являются причинами остановки процесса добычи угля из-за необходимости разрушения негабаритных кусков пород для транспортирования по забойному конвейеру, неполной передвижки секции механизированной крепи и снижения поперечного сечения ходового отделения и лавы, что затрудняет проход людей по ходовому отделению механизированной крепи и создает дополнительное сопротивление для движения воздуха, а также повышается вероятность травмирования рабочих очистного забоя. Дезинтеграция пород кровли и почвы на блоки способствует миграции

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 7. С. 313–327.
© 2016. И.А. Поздеев, И.М. Поздеева, П.В. Васильев.

метана по образовавшимся системам трещин, что приводит к загазированию очистного забоя и выработок выемочного столба.

В связи с этим актуальной научно-практической задачей является создание системы оперативного мониторинга и прогноза геомеханических и газодинамических явлений, протекающих в очистном забое при отработке выемочного столба, с целью обоснования технологических и технических решений, реализация которых обеспечит безопасную эффективную работу КМЗ.

Для решения поставленной задачи проведено численное моделирование НДС углепородного массива в окрестности очистного забоя с использованием пакета компьютерных программ, разработанных в Сибирском государственном индустриальном университете. Комплекс программ адаптирован для решения двумерных задач и выявления закономерностей изменения механических, реологических и плотностных свойств углепородного массива, а также прогноза дебита и давления метана [1–4].

По результатам моделирования выявлялась зависимость параметров НДС массива горных пород в окрестности очистного забоя от горно-геологических и горнотехнических факторов. В общем виде зависимость между исследуемыми параметрами можно выразить в виде следующей функции:

$$U = f(m, H, \alpha, \sigma_{сж}, R, \vartheta), \qquad (1)$$

где U – параметры НДС геомассива; m – мощность пласта; H – глубина ведения горных работ; α – угол залегания; $\sigma_{сж}$ – предел прочности пород/угля при сжатии; R – распор механизированной крепи, ϑ – скорость подвигания очистного забоя.

Объектом исследования принят углепородный массив шахтного поля ООО «Шахта «Есаульская» расположенный в Байдаевском месторождении Кузбасса в период отработки выемочного столба 26–28 по пласту 26*а*.

Глубина ведения горных работ изменяется от 410 до 580 м, вынимаемая мощность разрабатываемого пласта – 2,1 м, угол падения – от 1 до 100. Горный массив представлен алевролитами и песчаниками, а также включает 7 угольных пластов, ближайший из которых пласт 29*а* залегает в 130–150 м выше отрабатываемого пласта 26*а*. Шахта отнесена к сверхкатегорным по газу.

Схема подготовки шахтного поля – панельная. Система разработки столбовая, с полным обрушением пород кровли, подвиганием длинного очистного забоя длиной 300 м по восстанию и выемкой угольного пласта с помощью комплекса 2КМ-138, включа-

ющего комбайн KSW-460NE, забойный конвейер RYBNIK-850, секции М-138, перегружатель ПСП-308.94. Схема выемки угля в лаве – односторонняя, снизу вверх по ходу струи свежего воздуха.

Для изучения геомеханических процессов, протекающих в окрестности очистного забоя, выбрана геометрическая модель в виде вертикального разреза по разведочной геологической скважине № 1689. Размер модели по горизонтальной оси *OX* составляет 410 м, по вертикальной оси *OY* – 690 м, где зона надработки ограничена координатой $Y = -115$ м, а поверхность – $Y = 575$ м. Геометрическая модель объекта исследования делится на элементарные области (конечные элементы), в каждой из которых, искомая непрерывная величина описывается дифференциальным уравнением, в результате чего задача сводится к решению системы линейных уравнений [1–4]. Результаты деления модели представлены на рис. 1.

В статье рассматривается влияние величины распора механизированной крепи на изменение параметров НДС массива.

Моделирование геомеханических параметров проводилось при величине распора механизированной крепи от 600 до 1200 кН/м^2 с шагом изменения параметра 200 кН/м^2.

Для детального анализа и выявления зависимости НДС геомассива от распора механизированной крепи выбраны харак-

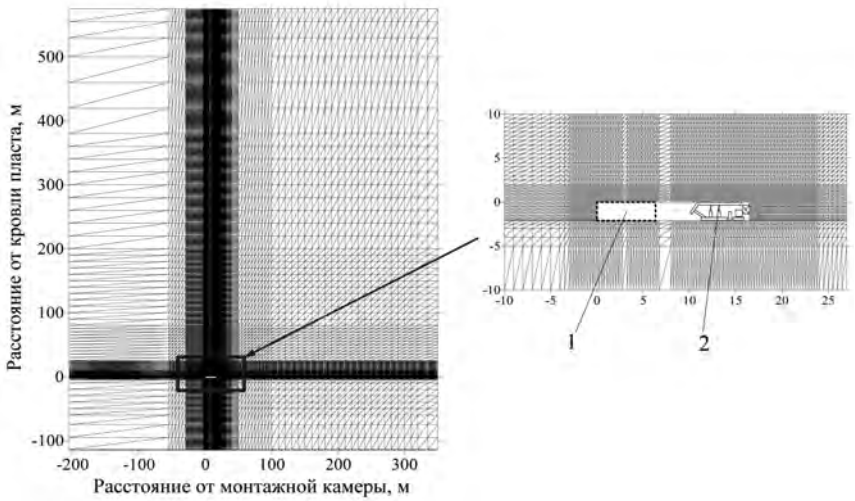

Рис. 1. Результат деления геомассива на конечные элементы: 1 – монтажная камера; 2 – КМЗ

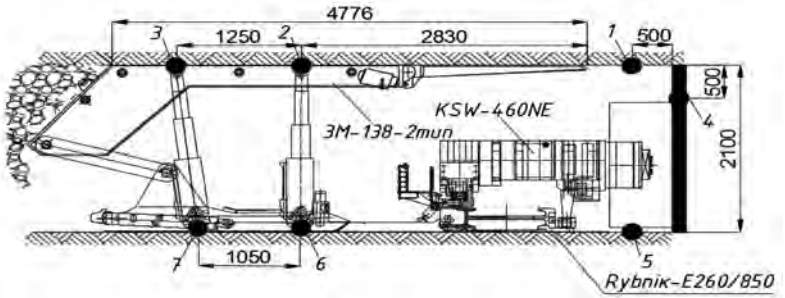

Рис. 2. Схема КМЗ: 1–7 – характерные точки

терные точки, изменение НДС пород в которых наиболее полно характеризует состояние очистного забоя и вмещающих пород отрабатываемого пласта (рис. 2).

В процессе исследования определялись следующие параметры:

• главные вертикальные и горизонтальные составляющие тензора напряжений массива пород;

• коэффициенты концентраций вертикальных и горизонтальных напряжений;

• горизонтальные и вертикальные смещения;

• отношение остаточной прочности пород к исходной.

Для выявления вида зависимости параметров НДС геомассива от распора механизированной крепи при наличии экспериментальных данных, в том числе полученных при моделировании, выбран метод наименьших квадратов. Сущность метода заключается в определении коэффициентов эмпирической зависимости такой функции от аргумента, при которой сумма квадратов отклонений экспериментальных данных от расчетных будет наименьшей. Определение коэффициентов осуществляется посредством решения системы уравнений методом Гаусса либо матричным методом [5].

Для выявления функции, наиболее адекватно описывающую зависимость исследуемых параметров, значения, полученные в результате моделирования параметров НДС массива, были аппроксимированы линейными и нелинейными уравнениями. Виды используемых уравнений приведены в таблице.

На нижеследующих рисунках приведены результаты моделирования и функции, которые наиболее адекватно описывают зависимость исследуемых параметров, из которых следует, что:

1) в точке 1 (см. рис. 2):

• изменение величины распора механизированной крепи в пределах 600–1200 кН/м^2 несущественно влияет на вертикаль-

Вид функций для выявления зависимостей параметров НДС геомассива от распора механизированной крепи

Название эмпирической зависимости	Функция
Линейная	$y = ax + b$
Квадратичная	$y = ax^2 + bx + c$
Логарифмическая	$y = a \cdot \ln(x) + b$
Степенная	$y = ax^m$
Показательная (экспоненциальная)	$y = a \cdot e^{mx}$
Дробно-рациональная	$y = x/ax + b$

ные напряжения в обнаженной части кровли пласта у очистного забоя (рис. 3, *а*);

• распор механизированной крепи в большей степени влияет на изменение горизонтальных напряжений (рис. 3, *б*);

• увеличение распора механизированной крепи способствует снижению вертикальных и горизонтальных смещений пород кровли пласта в незакрепленной механизированной крепью части (рис. 4);

• изменение распора механизированной крепи в пределах 600–1200 кН/м^2 не в значительной степени влияет на состояние пород кровли у призабойного пространства (рис. 5);

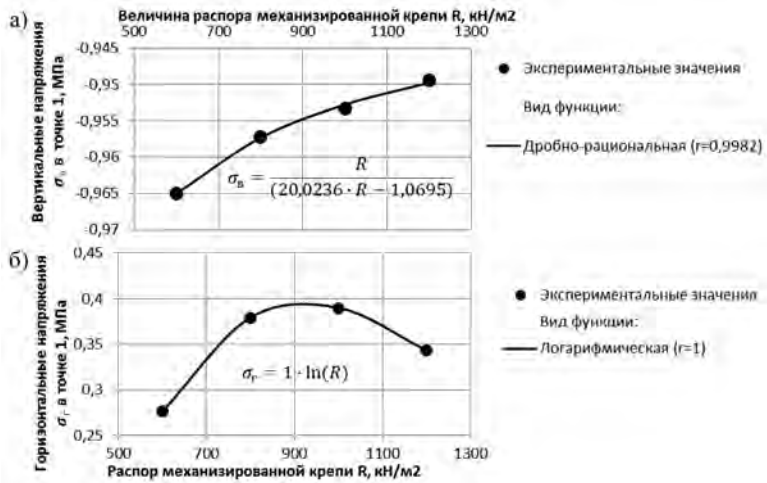

Рис. 3. Закон распределения вертикальных (а) и горизонтальных (б) напряжений геомассива в зависимости от распора механизированной крепи в точке 1: r – коэффициент корреляции

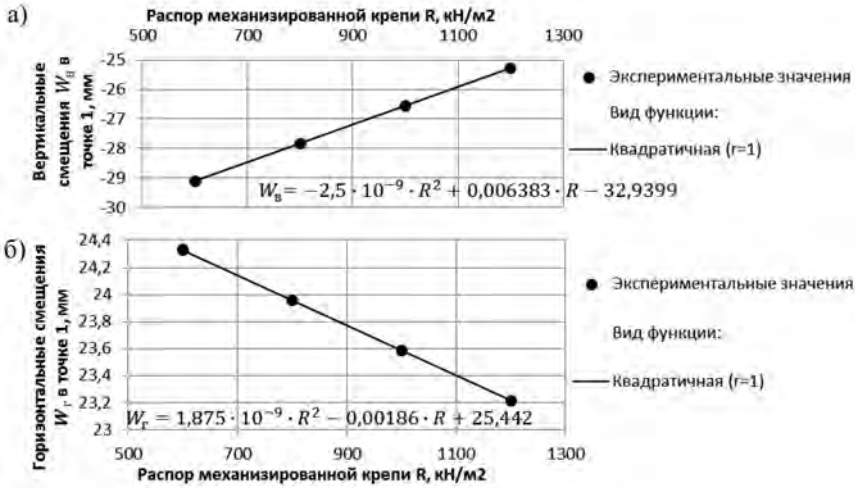

Рис. 4. Закон распределения вертикальных (а) и горизонтальных (б) смещений геомассива в зависимости от распора механизированной крепи в точке 1: r – коэффициент корреляции

2) в точках 2 и 3 (см. рис. 2):

• повышение величины распора механизированной крепи способствует увеличению сжимающих вертикальных и горизонтальных напряжений в породах кровли над верхним перекрытием крепи (рис. 6);

• увеличение распора механизированной крепи способствует уменьшению вертикальных смещений пород кровли пласта над верхним перекрытием секции крепи (рис. 7, *а*). Как видно из рис. 7, *б*, на изменение горизонтальных смещений величина распора механизированной крепи влияет в меньшей степени;

• изменение распора механизированной крепи в пределах 600–1200 кН/м^2 в незначительной мере влияет на состояние

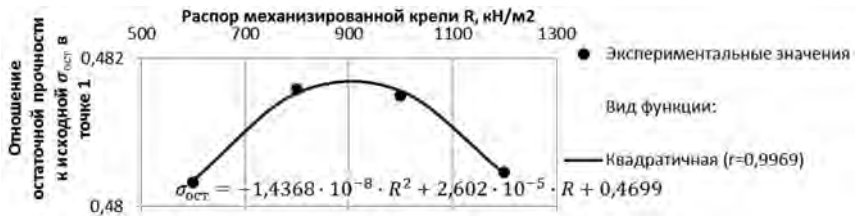

Рис. 5. Закон распределения отношения остаточной прочности горных пород к исходной в зависимости от распора механизированной крепи в точке 1: r – коэффициент корреляции

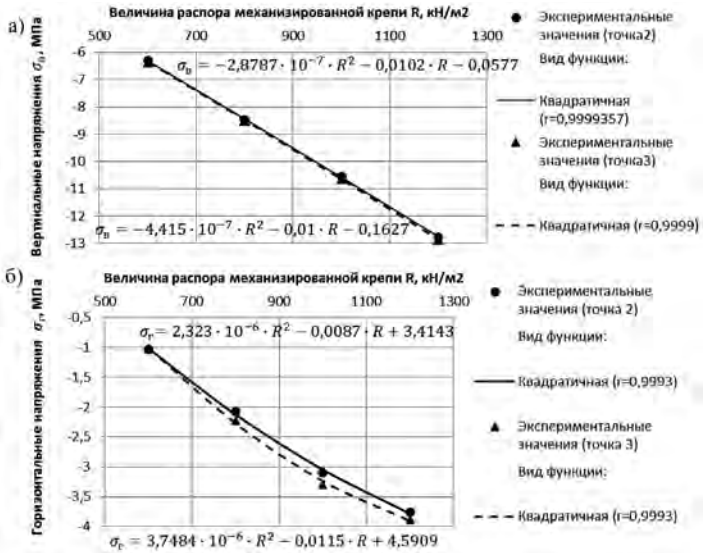

Рис. 6. Закон распределения вертикальных (а) и горизонтальных (б) напряжений геомассива в зависимости от распора механизированной крепи в точках 2, 3: r – коэффициент корреляции

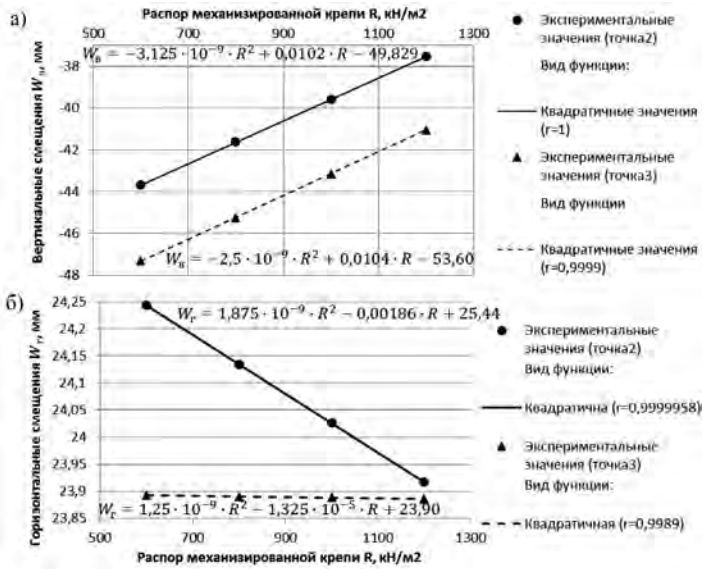

Рис. 7. Закон распределения вертикальных (а) и горизонтальных (б) смещений геомассива в зависимости от распора механизированной крепи в точках 2, 3: r – коэффициент корреляции

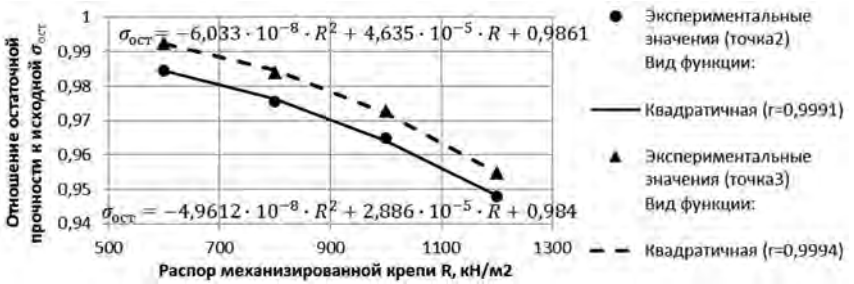

Рис. 8. Закон распределения отношения остаточной прочности горных пород к исходной в зависимости от распора механизированной крепи в точках 2, 3: r – коэффициент корреляции

горных пород над верхним перекрытием крепи в районе передней гидростойки (рис. 8);

3) в точке 4 (см. рис. 2):

• при увеличении распора механизированной крепи сжимающие вертикальные напряжения и растягивающие горизонтальные напряжения в верхней части очистного забоя снижаются, но снижение напряжений незначительно (рис. 9);

• увеличение распора механизированной крепи способствует снижению смещений угольного массива в верхней краевой части выемочного столба (рис. 10);

• на горизонтальные смещения распор механизированной крепи влияет в меньшей степени (рис. 10);

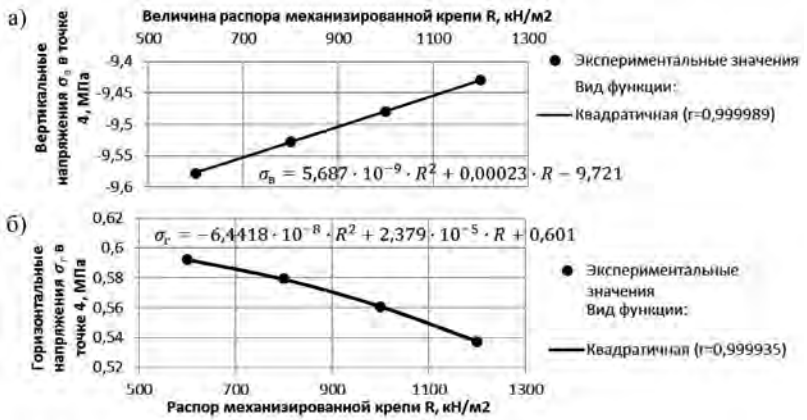

Рис. 9. Закон распределения вертикальных (а) и горизонтальных (б) напряжений геомассива в зависимости от распора механизированной крепи в точке 4: r – коэффициент корреляции

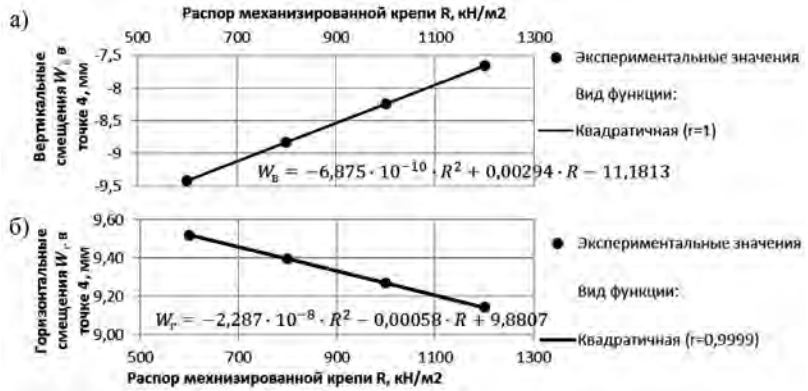

Рис. 10. Закон распределения вертикальных (а) и горизонтальных (б) смещений геомассива в зависимости от распора механизированной крепи в точке 4: r – коэффициент корреляции

• в точке 4 формируются положительные горизонтальные смещения, это свидетельствует о том, что смещения направлены вглубь угольного массива (рис. 10, *б*);

• увеличение распора механизированной крепи способствует увеличению остаточной прочности угольного массива в 0,5 м ниже кровли пласта, но увеличение незначительно (рис. 11);

4) в точке 5 (см. рис. 2):

• увеличение распора механизированной крепи способствует увеличению вертикальных сжимающих напряжений (рис. 12, *а*), но изменения вертикальных напряжений незначительны;

• увеличение распора механизированной крепи способствует снижению горизонтальных сжимающих напряжений в породах почвы пласта у очистного забоя (рис. 12, *б*);

• при увеличении распора механизированной крепи увеличиваются вертикальные смещения, т.е. происходит процесс

Рис. 11. Закон распределения отношения остаточной прочности горных пород и угля к исходной в зависимости от распора механизированной крепи в точке 4: r – коэффициент корреляции

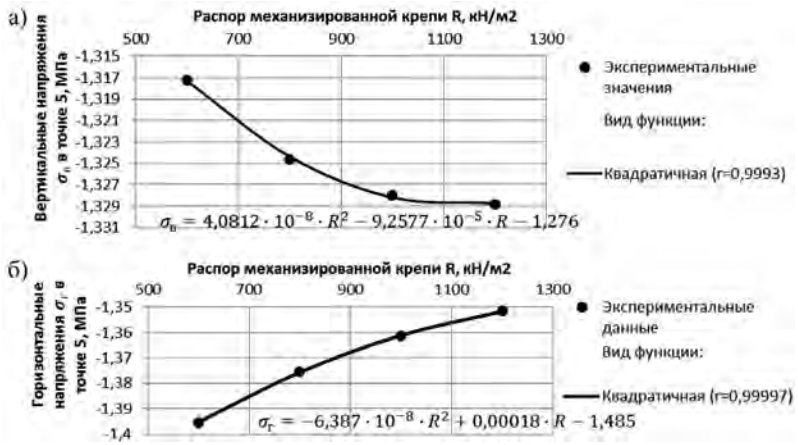

Рис. 12. Закон распределения вертикальных (а) и горизонтальных (б) напряжений геомассива в зависимости от распора механизированной крепи в точке 5: r – коэффициент корреляции

вдавливания почвы, но смещение пород незначительны, в результате чего можно утверждать, что влияние величины сопротивления крепи в исследуемых интервалах на почву несущественно (рис. 13, *а*);

• горизонтальные смещения при увеличении распора механизированной крепи уменьшаются (рис. 13, *б*), но уменьшение горизонтальных смещений так же, как и вертикальных, несу-

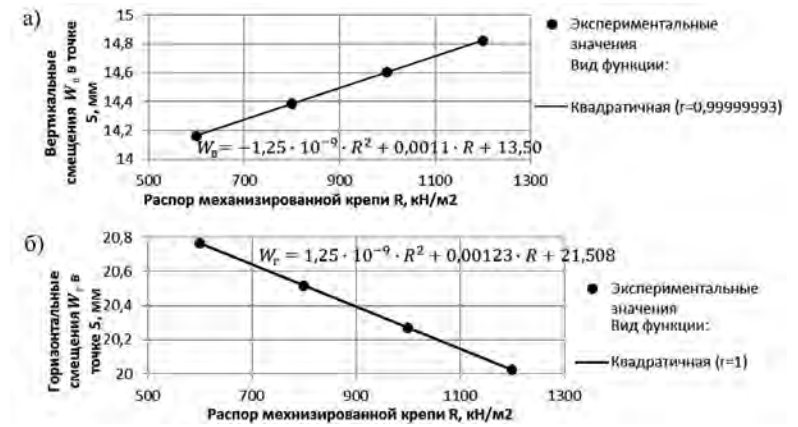

Рис. 13. Закон распределения вертикальных (а) и горизонтальных (б) смещений геомассива в зависимости от распора механизированной крепи в точке 5: r – коэффициент корреляции

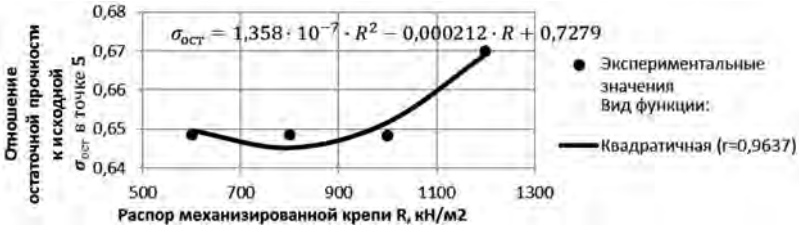

Рис. 14. Закон распределения дезинтеграции горных пород в зависимости от распора механизированной крепи в точке 5: r — коэффициент корреляции

щественны (менее 1 мм) в результате чего можно утверждать, что влияние величины сопротивления крепи в исследуемых интервалах на почву незначительно;

• увеличение распора механизированной крепи способствует улучшению состояния пород почвы пласта (рис. 14). Как видно из графика, увеличение остаточной прочности пород наблюдается при распоре крепи равного величине 1200 кН/м^2, но изменение незначительно (менее 0,05);

5) в точках 5 и 6 (см. рис. 2):

• увеличение распора механизированной крепи способствует повышению вертикальных напряжений пород почвы под основанием крепи (рис. 15, *а*).

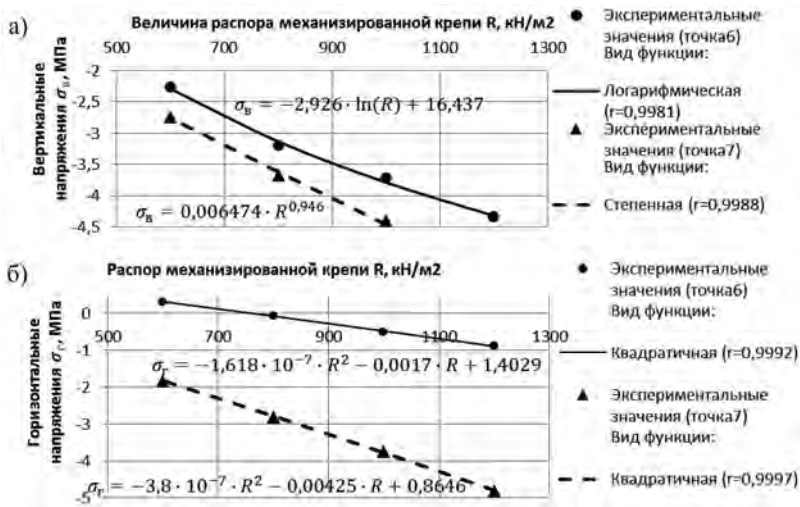

Рис. 15. Закон распределения вертикальных (а) и горизонтальных (б) напряжений геомассива в зависимости от распора механизированной крепи в точках 6, 7: r — коэффициент корреляции

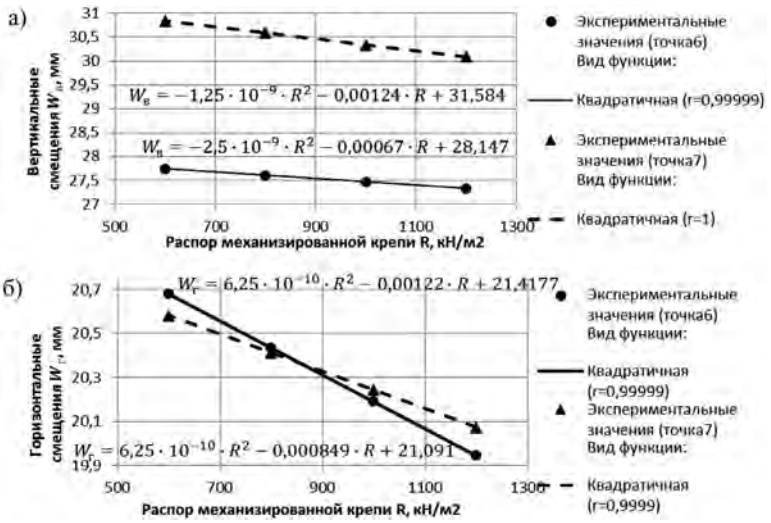

Рис. 16. Закон распределения вертикальных (а) и горизонтальных (б) смещений геомассива в зависимости от распора механизированной крепи в точках 6, 7: r – коэффициент корреляции

• горизонтальные напряжения при увеличении распора крепи переходят из растягивающих в сжимающие (рис. 15, *б*);

• при увеличении распора механизированной крепи снижаются вертикальные и горизонтальные смещения (рис. 16);

• увеличение распора механизированной крепи способствует повышению остаточной прочности пород почвы в районе передней гибростойки (рис. 17);

• увеличение распора механизированной крепи влечет повышение остаточной прочности пород почвы пласта в районе задней гидростойки крепи. Изменении прочности пород наб-

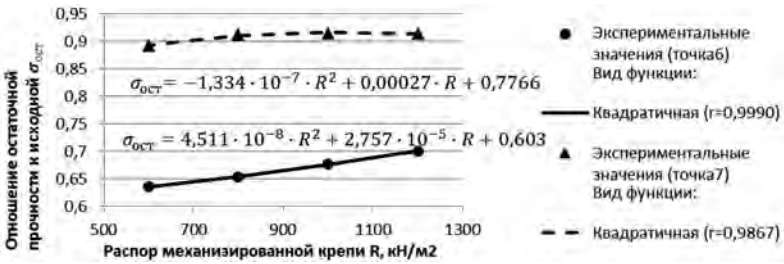

Рис. 17. Закон распределения отношения остаточной прочности горных пород к исходной в зависимости от распора механизированной крепи в точках 6, 7: r – коэффициент корреляции

людается при увеличении распора крепи с 600 до 800 кН/м^2. При дальнейшем увеличении распора крепи остаточная прочность практически не меняется. Изменение прочности колеблется в пределах 0,5%.

По результатам анализа полученных при моделировании данных сформулированы следующие выводы:

• распор механизированной крепи незначительно влияет на состояние пород незакрепленной крепью части кровли у очистного забоя;

• распор секции механизированной крепи, превышающий контактную прочность пород кровли, приводит к их разрушению, в результате чего возможны высыпания разрушенных пород между перекрытиями секций крепи в процессе их передвижки. С целью исключения возможных неблагоприятных и травмоопасных явлений во время рабочего процесса распор механизированной крепи рекомендуется устанавливать на таком уровне, чтобы напряжения, возникающие в массиве, не превышали контактную прочность пород;

• изменение распора механизированной крепи в пределах 600–1200 кН/м^2 существенно не влияет на вероятность отжима угольной пачки с поверхности очистного забоя;

• при недостаточном распоре механизированной крепи может наблюдаться эффект заклинивания пласта породами кровли и почвы, что может привести к разрушению угля при формировании напряжений, превышающих предел прочности угля;

• увеличение распора механизированной крепи способствует уменьшению вероятности пучения пород почвы пласта и выдавливанию забойного скребкового конвейера у очистного забоя;

• увеличение распора крепи способствует уменьшению заклинивания пласта породами кровли и почвы и снижает вероятность перемещения секций мехкрепи в сторону очистного забоя;

• увеличение распора крепи в пределах 600–1200 кН/м^2 несущественно повлияет на состояние пород почвы пласта под скребковым конвейером очистного забоя;

• увеличение распора механизированной крепи способствует уменьшению пучения почвы под основанием секции крепи, но, при изменении величины распора крепи в пределах 600–1200 кН/м^2 влияние на почву отрабатываемого пласта незначительно;

• при величине распора мехкрепи 600–1200 кН/м^2 изменение прочности пород незначительно и находится в пределах

0,63–0,70. Однако при отношении остаточной прочности пород к исходной равного и более 0,7 деформации горных пород можно отнести к упругим. В результате чего можно предположить, что увеличение распора крепи способствует улучшению состояния пород почвы и, как следствие, исключению образования систем трещин, которые могут стать путями миграции метана из пород почвы и вероятных суфлярных выделений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Риб С. В.*, *Фрянов В. Н.* Разработка комплекса проблемно-ориентированных программ для численного моделирования напряженно-деформированного состояния неоднородных угольных целиков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 3. – С. 367–371.

2. *Риб С. В.*, *Волошин В. А.*, *Максимов А. А.*, *Борзых Д. М.*, *Никитина А. М.*, *Фрянов В. Н.* Численное моделирование методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния углепородного массива при переходе очистным забоем передовой выработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 3. – С. 414–422.

3. *Петрова О. А.*, *Васильев П. В.*, *Фрянова О. В.*, *Фрянов В. Н.* Модель формирования напряжений, деформаций и повреждений в углепородном массиве при интеграции гравитационного и геотектонического полей напряжений / Материали за VIII международна научна практична конференция «Новината за напреднали наука – 2012». Т. 26. Технологии. – Бял ГРАД-БГ ООД. София: 2012. – С. 10–19.

4. *Фрянов В. Н.*, *Петрова О. А.*, *Петрова Т. В.* Комплекс проблемно-ориентированных программ для моделирования формирования и распределения опасных зон в газоносном геомассиве: свидетельство о регистрации электронного ресурса. № 21123, дата регистрации 03 августа 2015 года // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование» № 08–09 (75–76) август-сентябрь 2015. – С. 2. Режим доступа: http://ofernio.ru/portal/newspaper05.php

5. *Кремер Н. Ш.* Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для студентов вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2010. – 551 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Поздеев Игорь Андреевич – аспирант,
помощник начальника участка ВТБ,
e-mail: igor-pozdeev0910@mail.ru,
Сибирский государственный индустриальный университет,
Поздеева Ирина Михайловна – ведущий инженер,
e-mail: irina.pozdeeva4387@yandex.ru,
ООО «Новокузнецкий институт геофизики и проектирования»,
Васильев Павел Валентинович – кандидат технических наук,
генеральный директор, e-mail: vasilyevpv@bk.ru,
ООО «Сибирская экспертная организация».

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 7, pp. 313–327.

UDC
622.834.2:
519.62:
519.254

I.A. Pozdeev, I.M. Pozdeeva, P.V. Vasil'ev

RESEARCH OF DEPENDENCE OF PARAMETERS OF THE INTENSE DEFORMED CONDITION OF THE ROCK MASS ON RESISTANCE OF SECTION FIX OF THE MECHANIZED FACE

The actual scientific and practical task has been designated and the version of her decision has been offered. Researches of dependence of parameters of the condition of the rock mass in a neighborhood of a clearing face from a resistance mechanized are conducted fix. Types of the functions which are most adequately describing dependences of the studied parameters have revealed.

Key words: the complex mechanized face, parameters of the condition of the rock mass, resistance of the section mechanized fix, numerical modeling, least square method, empirical function, correlation coefficient.

AUTHORS

Pozdeev I.A., Graduate Students, Assistant Chief of Ventilation
and Occupational Safety Department,
e-mail: igor-pozdeev0910@mail.ru,
Siberian State Industrial University, 654007, Novokuznetsk, Russia,
Pozdeeva I.M., Leading Engineer,
e-mail: irina.pozdeeva4387@yandex.ru,
Novokuznetsk Institute of Geophysics and Design,
654066, Novokuznetsk, Russia,
Vasil'ev P.V., Candidate of Technical Sciences, General Director,
e-mail: vasilyevpv@bk.ru,
Siberian Expert Organization LTD, 653000, Prokop'evsk, Russia.

REFERENCES

1. Rib S.V., Fryanov V.N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 3, pp. 367–371.

2. Rib S.V., Voloshin V.A., Maksimov A.A., Borzykh D.M., Nikitina A.M., Fryanov V.N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 3, pp. 414–422.

3. Petrova O.A., Vasil'ev P.V., Fryanova O.V., Fryanov V.N. *Materiali za VIII mezhdunarodna nauchna praktichna konferentsiya «Novinata za naprednali nauka 2012»*. T. 26. Tekhnologii (Материали за VIII международна научна практична конференция «Новината за напреднали наука 2012», vol. 26. Технологии), Byal GRAD-BG OOD. Sofiya, 2012, pp. 10–19.

4. Fryanov V.N., Petrova O.A., Petrova T.V. Kompleks problemno-orientirovannykh programm dlya modelirovaniya formirovaniya i raspredeleniya opasnykh zon v gazonosnom geomassive: svidetel'stvo o registratsii elektronnogo resursa, no 21123, data registratsii 03 avgusta 2015 goda. *Khroniki ob"edinennogo fonda elektronnykh resursov «Nauka i obrazovanie»* № 08–09 (75–76) August-September 2015, pp. 2, available at: http://ofernio.ru/portal/newspaper05.php

5. Kremer N.Sh. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika*: uchebnik dlya studentov vuzov. 3-e izd. (Probability theory and mathematical statistics: Textbook for high schools, 3rd edition), Moscow, YuNITI-DANA, 2010, 551 p.