

УДК 622.831

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ОТРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ
В ЗОНЕ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ ОЧИСТНОГО ПРОСТРАНСТВА
И ПЕРЕДОВОЙ ВЫРАБОТКИ**

В. М. Серяков¹, С. В. Риб², В. В. Басов², В. Н. Фрянов²

¹*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,*

E-mail: vser@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

²*Сибирский государственный индустриальный университет,*

E-mail: fryanov@sibsiu.ru, seregarib@yandex.ru, ул. Кирова, 42, 654007, г. Новокузнецк, Россия

Изложены результаты численного моделирования геомеханического состояния массива горных пород в окрестности комплексно-механизированного забоя и передовой выработки при постепенном уменьшении ширины угольного целика между ними. Рассмотрены варианты перехода очистным забоем диагональной печи на пласте сложного строения различной мощности. Установлены закономерности перераспределения напряжений, деформаций и остаточной прочности угля и пород при изменении мощности отрабатываемого пласта, ширины угольного целика, расположения породного прослойка в пластах. Обоснованы рекомендации по технологии отработки уменьшаемого угольного целика и поддержанию передовой выработки, направленные на обеспечение безаварийной работы высокопроизводительного очистного забоя.

Очистной забой, угольные шахты, механизированная крепь, напряжения, смещения, горная выработка, массив горных пород, остаточная прочность, передовая выработка, породный прослойк

DOI: 10.15372/FTPRPI20180603

Современные угольные шахты характеризуются технологическими схемами, включающими 1–2 высокопроизводительных очистных забоя с ежесуточной нагрузкой до 20 тыс. т угля и 3–4 подготовительных забоя с темпами проходки до 30 м в сутки. В этих условиях любое отклонение фактических параметров геотехнологии от проектных приводит к резкому ухудшению технико-экономических показателей шахты. Основными причинами неритмичной работы забоев в пределах протяженных выемочных участков является изменчивость горно-геологических условий, осложняющих технологические процессы: мощность и структура пласта, свойства вмещающих пласт пород, угол падения, глубина разработки, наличие дизъюнктивов, а также техногенные факторы: зона повышенного горного давления, передовая выработка, изменение длины лавы и др. [1–7].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-45-420003 p_a) и по соглашению № 17 от 24-07-2018 г.

Один из вариантов устранения негативного воздействия указанных факторов, с учетом их многообразия и индивидуального характера влияния на стабильность работы забоев, — геомеханическое обеспечение технологии подготовки и отработки запасов угольных пластов посредством прогноза параметров геомеханических процессов, обоснование и реализация мероприятий для исключения неритмичной работы очистных забоев.

Для геомеханического обоснования вариантов интенсивной отработки протяженных выемочных участков проведен анализ технико-экономических показателей работы высокопроизводительных комплексно-механизированных забоев шахт Кузбасса и выявлены природные и техногенные факторы, осложняющие управление напряженно-деформированным состоянием (НДС) массива горных пород с учетом пространственного положения системы горных выработок протяженного выемочного участка.

Результаты анализа представлены на гистограммах (рис. 1), из которых следует, что динамика месячной добычи неустойчивая и характеризуется значительным коэффициентом вариации от 30 до 40 %.

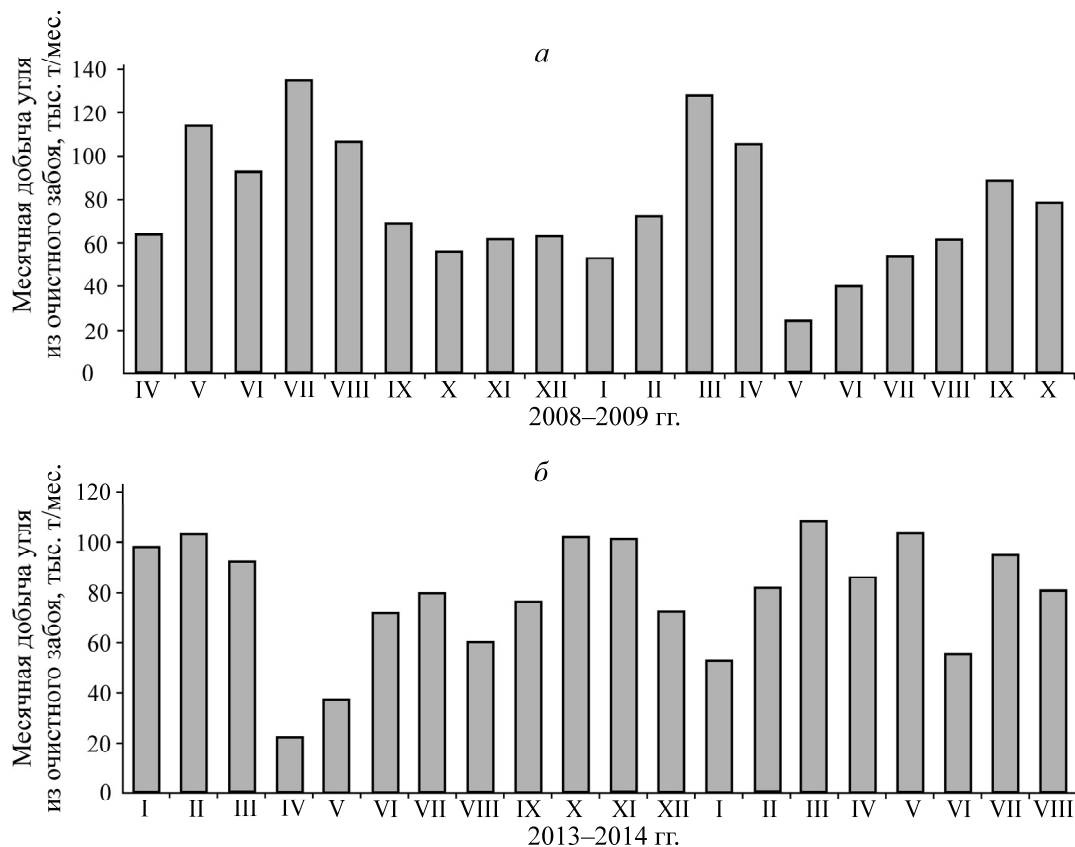


Рис. 1. Распределение месячной добычи угля при отработке протяженных выемочных участков: *а* — шахта “Романовская”, пласт “Абрамовский”; *б* — шахта “Осинниковская”, пласт E5

Установлено, что существенное снижение добычи угля по сравнению со средним значением происходит вследствие негативного влияния следующих факторов: разрывных нарушений (снижение на 12–74 %); пересечения лавой передовых выработок (снижение на 25–69 %); изменения прочностных и деформационных свойств угольного пласта после проведения противоударных мероприятий (снижение около 30 %); зоны повышенного горного давления. При отработке пластов сложного строения выявлен повышенный расход резцов выемочного комбайна и увеличение затрат на обогащение горной массы. Указанные факторы идентифицированы как индикаторы сложного НДС, ухудшающие условия ведения горных работ.

подавляющее большинство угольных пластов Кузнецкого бассейна, подлежащих подземной разработке, имеет сложное строение. В них встречаются породные прослойки, расположение которых в пределах разрабатываемых участков месторождений существенно изменяется, что создает предпосылки отнесения этих запасов угля в разряд нетехнологичных [8].

В соответствии с указанными факторами обоснованы следующие задачи исследований:

- прогноз геомеханических параметров системы “передовая выработка — очистной забой”;
- исследование геомеханических процессов в окрестности уменьшаемого угольного целика между очистным забоем и передовой выработкой для корректировки параметров паспорта крепления и поддержания пересекаемой подготовительной выработки;

- установление зависимостей геомеханических параметров системы “передовая выработка — очистной забой” от мощности пласта и породного прослойка, ширины угольного целика.

Для решения поставленных задач проведено численное моделирование геомеханических процессов в массиве горных пород в зоне взаимного влияния передовой выработки и очистного забоя. Применен метод конечных элементов [9, 10], реализованный в комплексе программ, разработанном специалистами кафедры геотехнологии СибГИУ [11–15]. Для настройки входных параметров численной модели использованы результаты натурных измерений смещений контуров подготовительных выработок [12–14].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для расчета параметров НДС в окрестности очистного забоя и диагональной передовой выработки создана двумерная геометрическая модель массива горных пород, которая включает угольные и породные слои различной мощности. Количество слоев в модели — 100, а их мощность 0.05–20 м. Количество вертикальных линий на геометрической модели — 200, с переменным расстоянием между ними от 0.01 до 15 м. Слои значительной мощности делятся на подслои для повышения точности расчета параметров НДС.

Для численного эксперимента в качестве объекта исследований приняты горно-геологические условия залегания угольного пласта 15 шахты “Юбилейная” (Кузбасс). Проектными решениями предусматривается развитие горных работ в поле пласта 15, северное крыло (рис. 2). Из-за расщепления пласта 15 северное крыло разбито на два участка. На первом этапе подготавливаются и отрабатываются запасы угля на участке в пределах полной мощности пласта, включающем в себя три выемочных столба (15-01, 15-03, 15-05). На втором этапе разрабатываются малопродуктивные запасы на площади расщепления пласта (выемочные участки 15-07, 15-08, 15-09, 15-11, 15-13, 15-15). Подготовка уклонного поля восточного крыла пласта 15 предусматривается односторонней выемочной панелью (15-17, 15-19, 15-21, 15-23).

Подготовка выемочных столбов предполагается как от центральных, так и от фланговых выработок с помощью выемочных штреков. Монтажные камеры располагаются у границы предохранительного целика фланговых выработок. Для обеспечения запасного выхода в контуре выемочных столбов проводятся диагональные печи (передовые выработки). Выемка запасов угля в выемочных столбах будет осуществляться с помощью механизированного комплекса и очистного узкозахватного комбайна. Из-за сложного строения пласта 15 его разработка будет сопровождаться оставлением угольных пачек как в кровле, так и в почве пласта.

Пласт 15 залегает ниже пласта 16 на 40–54 м, имеет сложное строение, не выдержан по мощности. Гипсометрия пласта по почве слабоволнистая, по кровле — мелковолнистая. В рабочей части пласта располагаются породные прослои, представленные алевролитами и аргиллитами. По прослою в средней части пласта происходит расщепление, в результате которого обе пачки теряют рабочее значение. В почве пласта на расстоянии 0.45–0.55 м залегает уголь-

ная пачка мощностью 0.3–0.5 м. Зольность пласта за счет засорения породными прослоями колеблется от 20 до 40 %, достигая 50 %. Вынимаемая мощность пласта составляет 1.35–3.0 м. Угол залегания пласта вдоль столба изменяется от 0 до 15°.

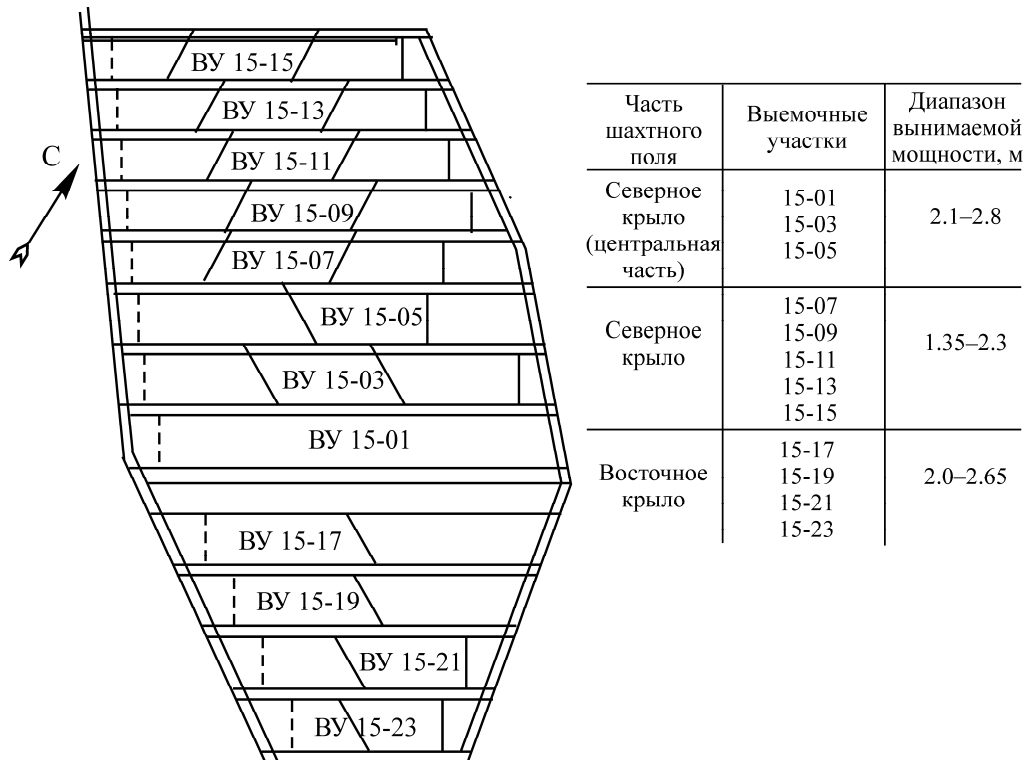


Рис. 2. Выкопировка из плана горных работ по пласту 15 в пределах поля шахты “Юбилейная”, предусматривающего отработку длинными столбами по простирианию

Ложная кровля мощностью до 0.5 м имеет локальное распространение. Она сложена мелкозернистым, слабоуглистым алевролитом или углистым аргиллитом. Непосредственная кровля выполнена мелкозернистыми алевролитами, обычно слоистыми, прогноз их поведения при обнажении — от среднеустойчивого до неустойчивого. Основная кровля представлена алевролитами мелко- и крупнозернистыми, на отдельных участках — мелкозернистыми песчаниками. Прогноз их поведения при обнажении от среднеобрушающихся до трудно-обрушающихся. Почва пласта сложена алевролитами и песчаниками, не склонными к пучению.

Размеры расчетной области по простирианию пласта приняты равными 800 м, по высоте — 600 м; глубина разработки 500 м. Фрагмент расчетной схемы представлен на рис. 3.

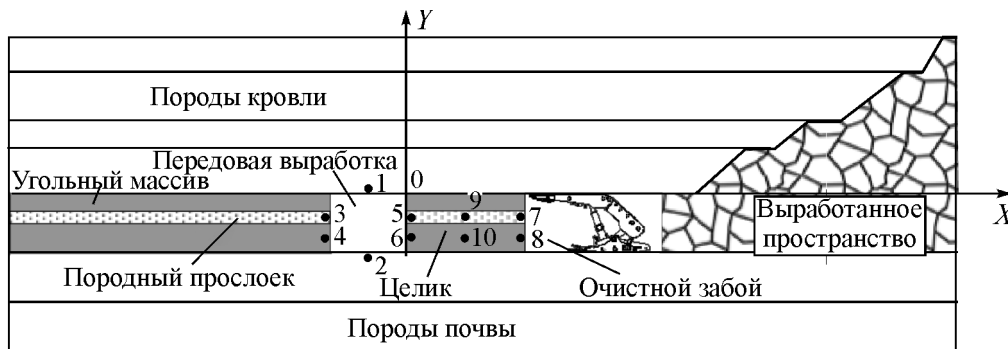


Рис. 3. Фрагмент расчетной схемы: 1–10 — номера характерных точек, в которых проводилось детальное изучение напряженно-деформированного состояния

Напряженно-деформированное состояние массива горных пород формировалось за счет осадочных процессов, поэтому обусловлено весом налегающих пород и в целом соответствует гипотезе А. Н. Динника. Вследствие этого на контуре области расчета приняты следующие граничные условия:

- на левой и правой границах расчетной области горизонтальные смещения и касательные напряжения равны нулю;
- на нижней границе расчетной области вертикальные смещения и касательные напряжения равны нулю;
- верхняя граница расчетной области свободна от внешней нагрузки.

Физико-механические свойства вмещающих пород и угля выбраны в соответствии с данными геологических материалов и имеющейся справочной литературы [15, 16]. На границах пород с различными свойствами приняты условия жесткого контакта. Рассмотрено шесть расчетных моделей (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Описание расчетных моделей

Номер модели	Схема модели	Мощность: пласт / породный прослойок, м	Расстояние от забоя до передовой выработки, м
1		1.6 / 0.4	6
2		1.6 / 0.4	3
3		1.6 / 0.4	На входе в передовую выработку
4		2.8 / 0.7	6
5		2.8 / 0.7	3
6		2.8 / 0.7	На входе в передовую выработку

Учитывая большой объем информации, получаемой при решении задачи численными методами, для анализа, согласно рис. 3, выделены характерные точки, координаты которых указаны в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Координаты характерных точек

Номер модели	Координата характерных точек, м	Номер характерной точки									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1, 2, 3	x	-2.5	-2.5	-5.2	-5.2	0.2	0.2	5.8	5.8	2.8	2.8
	y	1.3	-1.7	-0.6	-1.2	-0.6	-1.2	-0.6	-1.2	-0.6	-1.2
4, 5, 6	x	-2.5	-2.5	-5.2	-5.2	0.2	0.2	5.8	5.8	2.8	2.8
	y	0.1	-2.9	-1.0	-2.1	-1.0	-2.1	-1.0	-2.1	-1.0	-2.1

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ

Для оценки НДС массива горных пород в окрестности очистного механизированного забоя и передовой диагональной выработки рассмотрены следующие этапы отработки: при мощности пласта 1.6 и 2.8 м ширина уменьшаемого целика выбрана равной 6, 3 и 0 м (табл. 1).

На каждом этапе отработки устанавливалось влияние мощности пласта, ширины целика, породного прослойка на характер распределения вертикальных, горизонтальных напряжений и смещений, а также отношения остаточной прочности угля и пород к исходной в массиве горных пород.

Коэффициенты концентрации вертикальных напряжений вычислены как отношение вертикальных напряжений в зоне влияния горных выработок к соответствующим напряжениям в нетронутом массиве горных пород (рис. 4). Установлено, что в характерных точках 3 и 4 при уменьшении ширины угольного целика от 6 до 0 м коэффициент концентрации вертикальных напряжений в левом борту передовой выработки увеличивается в 1.64 раза независимо от мощности пласта и породного прослойка.

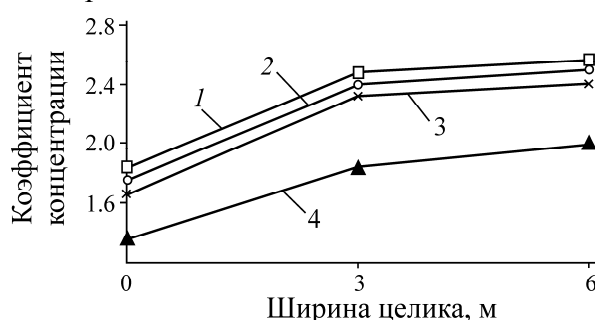


Рис. 4. Зависимость коэффициента концентрации вертикальных напряжений от ширины целика: 1 — пласт мощностью 1.6 м (в точке 3); 2 — пласт мощностью 1,6 м (в точке 4); 3 — пласт мощностью 2.8 м (в точке 3); 4 — пласт мощностью 2.8 м (в точке 4)

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТИ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ И ПЕРЕДОВОЙ ВЫРАБОТКИ

При анализе особенностей распределения горизонтальных напряжений выявлены следующие закономерности. Независимо от мощности пласта, горизонтальные напряжения в породном прослойке в левом боку передовой выработки в глубине массива сжимающие, а на расстоянии 2.5–3.5 м от бока выработки переходят в растягивающие, т. е. в левом боку выработки формируется зона шириной 2.5–3.5 м, в которой возможно образование трещин. В пределах этой зоны для обеспечения устойчивости выработки необходимо упрочнение породного прослойка. Выше и ниже породного прослойка уголь находится в зоне сжатия под влиянием вертикальных и горизонтальных напряжений. В уменьшаемом угольном целике также обнаружена зона растягивающих горизонтальных напряжений в породном прослойке, т. е. возможно его выдавливание в передовую выработку и в призабойное рабочее пространство очистного забоя.

На основе установленных закономерностей распределения горизонтальных напряжений рекомендуется на расстоянии от очистного забоя до передовой выработки более ширины зоны опорного давления проводить упрочнение угля и пород прослойка на глубину до 3.5 м в левом боку выработки и в пределах всего уменьшаемого целика.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СМЕЩЕНИЙ КОНТУРА ПЕРЕДОВОЙ ВЫРАБОТКИ

Одним из основных параметров, характеризующих устойчивость выработок, является конвергенция кровли – почвы. На рис. 5а можно видеть, что приближение очистного забоя к передовой выработке увеличивает сближение кровли и почвы в 1.5 – 1.6 раза независимо от мощности пласта.

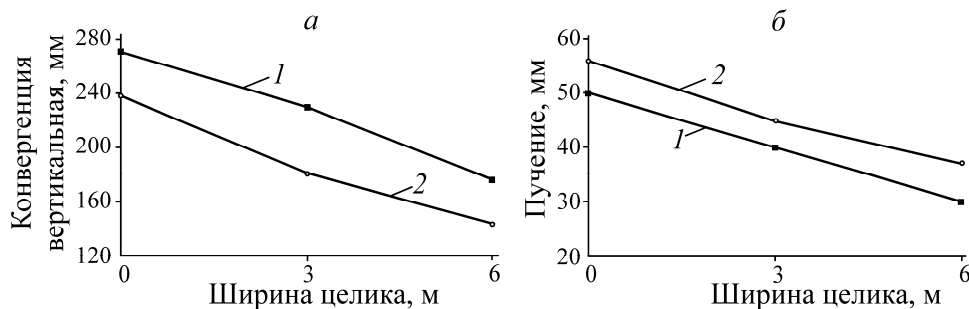


Рис. 5. Зависимость вертикальной конвергенции кровля – почва (а) и пучения пород почвы (б) в передовой выработке от ширины целика для пластов мощностью: 1 — 2.8 м; 2 — 1.6 м

При отработке пластов сложного строения часто в почве располагаются угольные пачки, которые становятся причиной интенсивного пучения [9]. Из рис. 5б следует, что при уменьшении ширины целика пучение пород увеличивается в 1.6 раза независимо от мощности. Абсолютная величина пучения при отработке пласта мощностью 1.6 м на 15 % больше соответствующих значений при отработке пласта мощностью 2.8 м. Зависимость оседания пород кровли передовой выработки от мощности пласта иная: при увеличении мощности в 1.75 раза смещения пород кровли увеличиваются на 10 %.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ УГЛЯ И ГОРНЫХ ПОРОД К ИСХОДНОЙ

Одним из показателей, характеризующих устойчивость угля и пород в системе “передовая выработка – очистной забой”, является отношение его остаточной прочности к исходной. Это отношение при расчетах [11] определяется по теории прочности Кулона – Мора, энергетической и деформационным теориям. Учитывая, что шахта — опасный производственный объект, для принятия окончательного решения по поддержанию передовой выработки принимается минимальное значение отношения остаточной прочности к исходной. Распределение отношения остаточной прочности горных пород к исходной на пласте мощностью 1.6 и 2.8 м в зависимости от ширины целика представлены на рис. 6.

На рис. 7 приведены зависимости изменения отношения остаточной прочности горных пород к исходной при уменьшении ширины целика с 6 до 0 м. Путем сравнения графиков, полученных при отработке пласта мощностью 1.6 и 2.8 м в характерных точках 3 и 4 левого бока передовой выработки, установлено: при уменьшении ширины целика отношение остаточной прочности к исходной снижается в 1.3 – 1.9 раза, уголь и вмещающие породы разрушаются на контуре выработки. В пределах уменьшаемого целика изменение прочности породы в прослойке составило 0.25 – 0.70, а угольный слой в пределах всего целика разрушается, что требует применения специальных мер для упрочнения массива. В левом боку передовой выработки породный прослойк и уголь разрушаются.

Таким образом, можно утверждать, что породный прослойк выполняет роль армирования пласта, а угольная пачка является податливым основанием для выдавливания прослойка. Этот вывод подтверждается результатами анализа распределения горизонтальных напряжений.

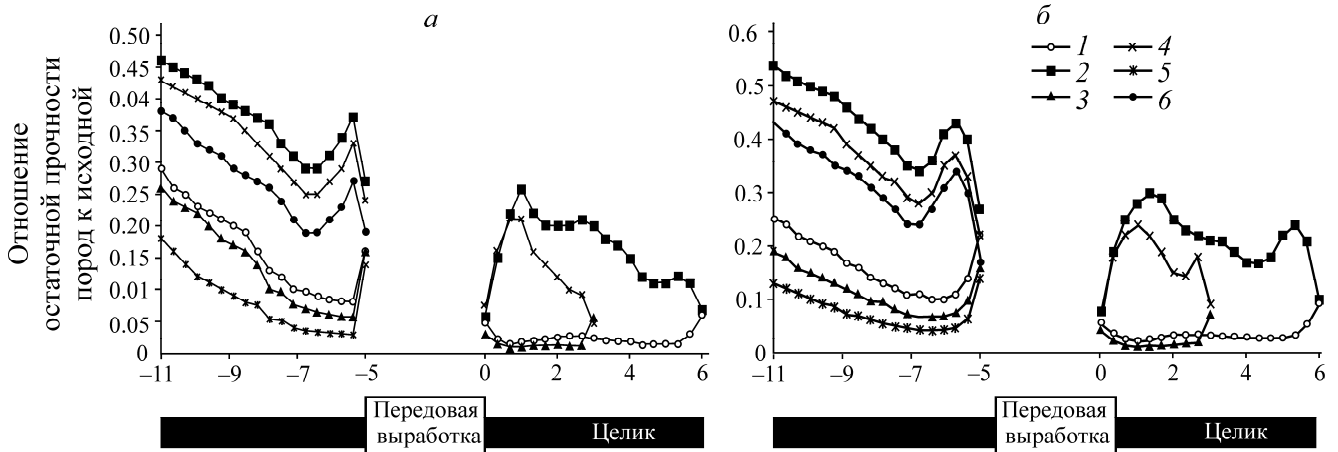


Рис. 6. Распределение отношения остаточной прочности горных пород к исходной на пласте мощностью 1.6 (а) и 2.8 м (б) в зависимости от ширины целика: 1 — по средней линии нижней пачки при ширине целика 6 м; 2 — по сечению прослойка при ширине целика 6 м; 3 — по средней линии нижней пачки при ширине целика 3 м; 4 — по сечению прослойка при ширине целика 3 м; 5 — по средней линии нижней пачки при полной отработке целика; 6 — по сечению прослойка при полной отработке целика

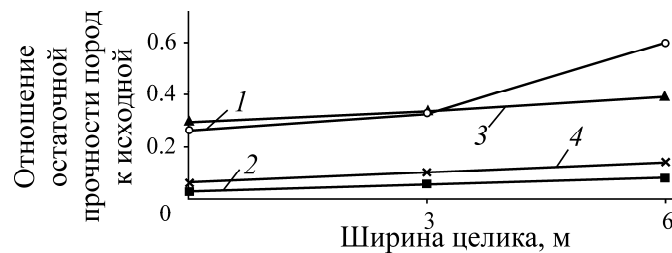


Рис. 7. Зависимость отношения остаточной прочности горных пород к исходной от ширины целика: 1 — пласт мощностью 1.6 м (в точке 4); 2 — пласт мощностью 1.6 м (в точке 3); 3 — пласт мощностью 2.8 м (в точке 4); 4 — пласт мощностью 2.8 м (в точке 3)

ВЫВОДЫ

Оценка напряженно-деформированного состояния массива горных пород на выемочном участке шахты в окрестности уменьшаемого угольного целика между очистным забоем и передовой выработкой позволила установить следующее:

- при уменьшении ширины угольного целика от 6 до 0 м коэффициент концентрации вертикальных напряжений в левом борту передовой выработки увеличивается в 1.6 раза независимо от мощности пласта и породного прослойка;

- в уменьшаемом угольном целике выявлена зона растягивающих горизонтальных напряжений в породном прослойке, приводящая к его выдавливанию в передовую выработку и в призабойное рабочее пространство;

- пучение пород почвы в передовой выработке при увеличении мощности обрабатываемых пластов от 1.6 до 2.8 м уменьшается на 15 %, а оседания пород кровли выработки увеличиваются на 10 %;

Обоснованы следующие рекомендации для поддержания передовой выработки впереди очистного забоя: до подхода очистного забоя к передовой выработке на расстояние ширины зоны опорного горного давления необходимо проводить упрочнение угля и пород в зоне шириной 5*m* в обе стороны от выработки (*m* — вынимаемая мощность пласта).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федоров В. Н.** Мониторинг процесса добычи угля и диагностика неустойчивых режимов // ГИАБ. — 2009. — № 57. — С. 62–69.
2. **Климов В. В., Ремезов А. В.** Исследование возможности повышения производительности очистных забоев на примере отработки шахты “Польсаевская” ОАО “СУЭК-Кузбасс” // ГИАБ. — 2015. — № 4. — С. 51–58.
3. **Лазаревич Т. И., Власенко Ю. Н., Рогова Т. Б.** Виды опасных зон при подземной разработке угольных месторождений // Научное издание: Технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сб. науч. ст. / СибГИУ, под общей ред. В. Н. Фрянова. — Новокузнецк, 2013. — С. 242–248.
4. **Фрянов В. Н., Павлова Л. Д.** Состояние и перспективы развития безопасной технологии подземной угледобычи. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. — 238 с.
5. **Van der Merwe J. N. and Madden B. J.** Rock engineering for underground coal mining, 2nd ed., SAIMM, 2013. — 273 p.
6. **Galvin J. M.** Ground engineering — principles and practices for underground coal mining, Switzerland Springer Int. Publ., 2016. — 684 p.
7. **Syd S. Peng.** Longwall Mining, West Virginia University, 2006. — 621 p.
8. **Шаклеин С. В., Писаренко М. В.** Концепция развития сырьевой базы Кузнецкого угольного бассейна // ФТПРПИ. — 2014. — № 3. — С. 118–125.
9. **Курленя М. В., Серяков В. М., Еременко А. А.** Техногенные геомеханические поля напряжений — Новосибирск: Наука, 2005. — 264 с.
10. **Серяков В. М., Риб С. В., Фрянов В. Н.** Напряженно-деформированное состояние угольного целика при переходе очистным механизированным комплексом зоны геологического нарушения // ФТПРПИ. — 2017. — № 6. — С. 32–40.
11. **Свидетельство** о регистрации электронного ресурса. “Комплекс программ для прогноза геомеханических и технологических параметров подземных горных выработок и неоднородных угольных целиков с тестированием численной модели по результатам точечного мониторинга” / Д. М. Борзых, С. В. Риб, В. Н. Фрянов; Объединенный фонд электронных ресурсов “Наука и образование”. — 2014. — № 20629; дата регистрации 09.12.2014.
12. **Ремезов А. В., Харитонов В. Г., Мазикин В. П.** Анкерное крепление на шахтах Кузбасса и дальнейшее его развитие: учеб. пособие. — Кемерово: Кузбассвузиздат, 2005. — 471 с.
13. **Златицкая Ю. А., Фрянов В. Н.** Геомеханическое обоснование параметров опасных зон и технологии упрочнения пород в окрестности подземных горных выработок. — Новокузнецк: СибГИУ, 2006. — 160 с.
14. **Торро В. О., Ремезов А. В., Кузнецов Е. В., Климов В. В.** Анализ инструментальных наблюдений за конвергенциями в конвейерном штреке 18-8 при отработке выемочных столбов по пласту Толмачевский в восходящем порядке // Вестн. КузГТУ. — 2017. — № 4. — С. 47–57.
15. **Штумпф Г. Г., Рыжков Ю. А., Шаламанов В. А.** Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна. — М.: Недра, 1994. — 447 с.
16. **Ильницкая Е. И., Тедер Р. И., Ватолин Е. С., Кунтыш М. Ф.** Свойства горных пород и методы их определения. — М.: Недра, 1969. — 392 с.

*Поступила в редакцию 24/XI 2018
После доработки 24/XI 2018
Принята к публикации 28/XI 2018*