

УДК 622.831

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ УГОЛЬНОГО ЦЕЛИКА  
ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОЧИСТНЫМ МЕХАНИЗИРОВАННЫМ КОМПЛЕКСОМ  
ЗОНЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО НАРУШЕНИЯ**

**В. М. Серяков<sup>1</sup>, С. В. Риб<sup>2</sup>, В. Н. Фрянов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
E-mail: vser@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

<sup>2</sup>*Сибирский государственный индустриальный университет,  
E-mail: fryanov@sibsiu.ru, ул. Кирова, 42, 654007, г. Новокузнецк, Россия*

Проведен анализ напряженно-деформированного состояния массива горных пород при ведении очистных работ механизированным комплексом в зоне геологического нарушения. Рассмотрен вариант перехода нарушения с перемонтажом комплекса в новую монтажную камеру. Установлен характер перераспределения полей напряжений во вмещающих породах и в угольном пласте при подходе очистных работ к нарушению и при ведении очистных работ от нарушения из новой монтажной камеры.

*Угольные шахты, геологическое нарушение, механизированный комплекс, монтажная и демонтажная камеры, напряжения, смещения, разрушение, ширина целика*

DOI: 10.15372/FTPRPI20170604

Кузнецкий угольный бассейн характеризуется весьма высокой тектонической нарушенностью [1]. Влияние геологических нарушений на производительность и безопасность подземных горных работ сказывается формированием опасных зон, которые характеризуются повышенным выделением метана, воды, неустойчивыми породами кровли, краевой части пласта, снижением прочности угля и боковых пород, а также увеличением их трещиноватости. Наблюдаются отжим угля, пучение пород почвы горных выработок, интенсивное образование “заколов” и “куполов” пород кровли и др. В этой связи возрастают дополнительные трудовые и материальные затраты, связанные с проведением мероприятий по обеспечению устойчивости пород кровли и неоднородных целиков [2, 3]. Для безопасного ведения горных работ в зонах влияния геологических нарушений разрывного типа предусматривается разработка специальных проектов или мероприятий, которые регламентируются “Положением о порядке и контроле безопасного ведения горных работ в опасных зонах” [4].

Применение на угольных шахтах системы разработки длинными столбами (ДСО) с выемкой угля высокопроизводительными комплексно-механизированными забоями привело к выборочной отработке пологих угольных пластов мощностью 1.7–4.5 м на участках с относительно благоприятными горно-геологическими условиями. В настоящее время извлечение 1 т

угля на шахтах приводит к консервации 3 т балансовых запасов угля [5]. Одним из факторов, ограничивающих область рационального применения систем разработки ДСО, являются геологические нарушения, неперебиваемые механизированным комплексом. Согласно нормативным документам и производственному опыту, переход нарушений механизированным комплексом возможен по следующим схемам [6, 7]:

- без разрыва процесса выемки угольного пласта с присечкой боковых пород;
- с переводом механизированного комплекса в новую монтажную камеру, т. е. с разрывом процесса выемки угля и оставлением целика.

При переводе механизированного комплекса в новую монтажную камеру сокращение потерь угля в целике между демонтированной и новой монтажной камерой может быть достигнуто уменьшением его ширины. Однако при этом возникает задача обеспечения устойчивости целика рациональной ширины, для решения которой в первую очередь необходима оценка геомеханического состояния неоднородного угольного целика, включающего нарушение с частично разрушенными в его окрестности горными породами.

#### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ПРИ ВЕДЕНИИ ОЧИСТНЫХ РАБОТ В ЗОНЕ НАРУШЕНИЯ**

Для оценки геомеханического состояния углепородного массива до подхода очистного забоя к геологическому нарушению и отхода его от новой монтажной камеры применен метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в комплексе программ, разработанных специалистами кафедры геотехнологии СибГИУ [8–10]. Использование МКЭ позволяет учесть особенности действия внешних силовых факторов, отобразить в модели структурные особенности породного массива, реализовать контактные условия взаимодействия разномодульных горных пород, а также рассмотреть разрушение массива [11, 12]. Цель исследований — геомеханическое обоснование ширины угольного целика между демонтированной и монтажной камерами, включающего геологическое нарушение.

Расчеты проведены для горно-геологических условий одной из типичных шахт Кузбасса, где ведется отработка пологопадающих угольных пластов сложного строения. Отработка выемочного столба 8–2 выполнена комплексно-механизированным очистным забоем (КМЗ). Геологическое нарушение Н8 является неперебиваемым для КМЗ (рис. 1), поэтому возникает необходимость его демонтажа перед геологическим нарушением и монтажа механизированного комплекса в новой монтажной камере по другую сторону от нарушения.

Расчеты напряженно-деформированного состояния вмещающего массива и угольных пластов проведены для вертикального сечения массива I–I (рис. 1) в предположении выполнения условий плоской деформации горных пород в выбранном сечении. Размеры расчетной области по падению пласта приняты равными 600 м, по высоте — 850 м, глубина разработки отрабатываемого пласта 700 м. Расчетная схема задачи представлена на рис. 2.

Исходное напряженное состояние углепородного массива формировалось за счет осадочных процессов, обусловлено преимущественно весом налегающих пород и в целом соответствует гипотезе А. Н. Динника. 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.

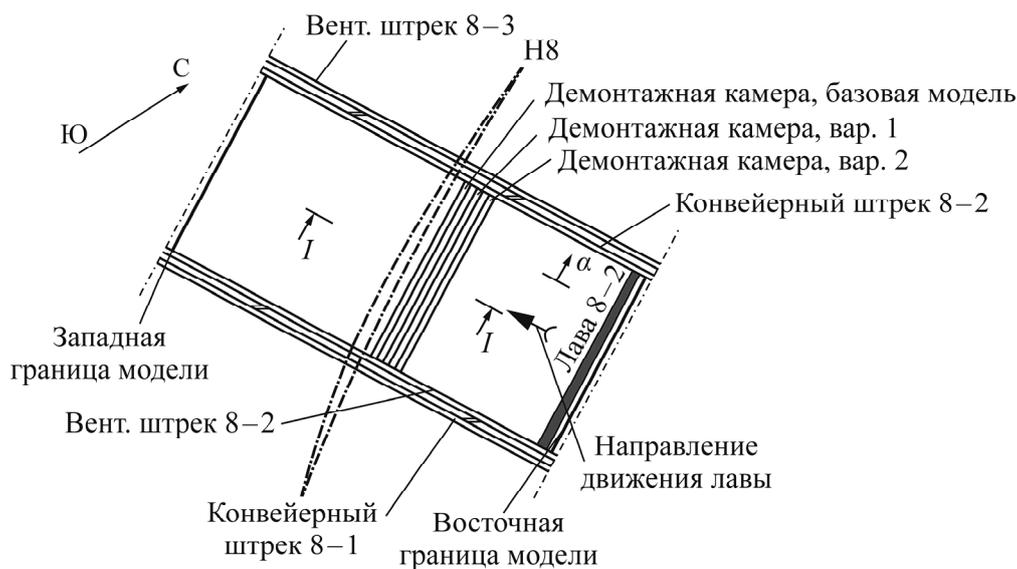


Рис. 1. Схема формирования в плане целика в окрестности геологического нарушения при приближении к нему комплексно-механизированного очистного забоя

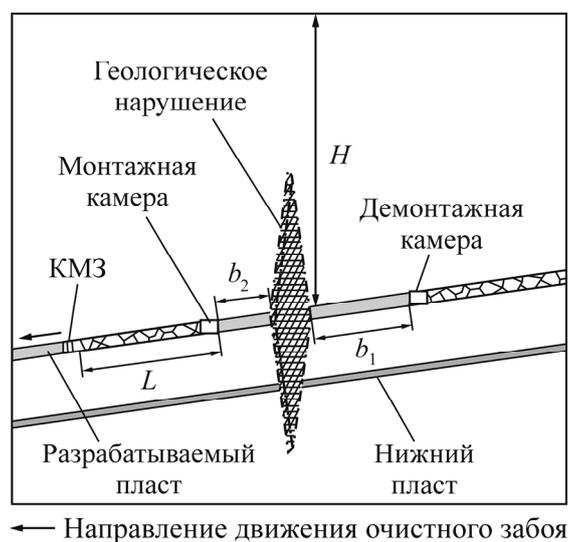


Рис. 2. Расчетная схема задачи

Состав и механические свойства угленосной толщи приведены в табл. 1. Физико-механические свойства вмещающих пород и угля выбраны согласно данным геологических материалов и имеющемуся справочному материалу [13]. На границах пород с различными свойствами приняты условия жесткого контакта. Нарушение моделируется породами, модули упругости которых в 5 раз меньше соответствующих значений для вмещающих пород.

Моделирование осуществлялось поэтапно: на первом исследовалось напряженно-деформированное состояние вмещающих пород и угольных пластов в зоне нарушения при подходе КМЗ к демонтажной камере, на втором — при отходе забоя от монтажной камеры по другую сторону от нарушения. Рассмотрено три варианта расположения демонтажной камеры на расстоянии от разрывного нарушения соответственно 20, 40 и 60 м (рис. 1). При отходе КМЗ от нарушения использовались варианты расположения монтажной камеры на расстоянии 20 и 40 м от нарушения (табл. 2).

ТАБЛИЦА 1. Физико-механические свойства пород и угля [13]

Состав угленосной толщи	Количество слоев в модели	Плотность, т/м <sup>3</sup>	Коэффициент крепости по Прогдьяконову	Предел прочности при одноосном, МПа		Модуль упругости $E \cdot 10^{-4}$ , МПа	Коэффициент Пуассона
				сжатию	растяжению		
Наносы	1	1.97	—	—	—	—	—
Алевролит	1	2.52	4	40	4.2	2.5	0.28
Пласт угля	1	1.27	1.1	9	1.0	0.3	0.24
Алевролит	1	2.52	3	32	3.2	2.5	0.28
Пласт угля	1	1.27	1.2	12	1.1	0.3	0.30
Алевролит	5	2.52	3	31	3.5	2.5	0.28
Песчаник	1	2.56	6	62	7.3	2.5	0.25
Аргиллит	6	2.52	3	31	3.2	1.8	0.30
Песчаник	2	2.56	8	81	9.3	3.5	0.21
Пласт угля	1	1.27	1.2	12	1.0	0.4	0.22
Алевролит	1	2.54	4	43	4.8	2.5	0.28
Пласт угля	1	1.26	1.3	13	1.2	0.3	0.24
Песчаник	2	2.54	7	72	8.1	2.5	0.25
Пласт угля	1	1.26	1.2	12	1.1	0.3	0.27
Аргиллит	2	2.54	3	31	3.2	1.8	0.30
Песчаник	1	2.60	8	82	9.0	3.1	0.24
Пласт угля	1	1.26	1.2	12	1.1	0.4	0.27
Алевролит	2	2.52	4	42.7	4.6	2.5	0.28
Пласт угля	1	1.26	1.2	12	1.1	0.3	0.22
Алевролит	2	2.54	4	40	4.6	2.5	0.28
Песчаник	1	2.60	8	81	8.2	2.8	0.25
Пласт угля	1	1.26	1.3	13	1.4	0.3	0.26
Алевролит	12	2.55	4	38	3.9	2.5	0.28
Аргиллит	2	2.54	3	32	3.2	1.8	0.30
Разрабатываемый пласт угля (верхняя пачка)	6	1.29	1.1	11	1.0	0.3	0.26
Породный прослоек	2	2.56	4.0	40	4.4	2.5	0.28
Разрабатываемый пласт угля (нижняя пачка)	5	1.29	1.1	11	1.0	0.3	0.26
Алевролит	6	2.56	4	43	5.0	2.5	0.28
Песчаник	1	2.56	7	71	8.0	2.5	0.25
Алевролит	2	2.55	4	44	5.0	2.5	0.28
Аргиллит	3	2.54	3	35	4.0	1.8	0.30
Пласт угля	7	1.25	1.2	12	1.3	0.3	0.24
Алевролит	4	2.54	4	42	5.6	2.5	0.28
Пласт угля	1	1.25	1.3	13	1.2	0.3	0.25
Алевролит	1	2.53	4	43	5.2	2.5	0.28
Пласт угля	1	1.25	1.3	13	1.2	0.3	0.30
Алевролит	8	2.53	5	49	6.0	2.5	0.28
Пласт угля	1	1.25	1.4	14	1.3	0.3	0.24
Алевролит	2	2.52	5	48	4.9	2.5	0.28

ТАБЛИЦА 2. Варианты моделирования

Вариант модели	Глубина ведения горных работ $H$ , м	Расстояние от демонтажной камеры до нарушения (ширина целика $b_1$ ), м	Расстояние от разрывного нарушения до монтажной камеры (ширина целика $b_2$ ), м	Длина выработанного пространства $L$ , м
Базовая модель	700	20	—	—
1	700	40	—	—
2	700	60	—	—
3	700	40	20	—
4	700	40	40	—
5	700	40	20	40
6	700	40	20	80
7	350	40	20	80
8	1050	40	20	80

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе решения задачи оценивалось влияние ширины угольного целика, формируемого при движении комплексно-механизированного забоя в направлении геологического нарушения, на его механическое состояние; проведены расчеты полей напряжений и деформаций массива горных пород при ширине целика 20, 40 и 60 м. Для примера на рис. 3 представлены изолинии вертикальных напряжений в окрестности очистного забоя при ведении очистных работ в направлении геологического нарушения при ширине целика 40 м. Наличие нарушения значительно повышает интенсивность разрушения краевой части пласта в очистном забое. Так, максимальный коэффициент концентрации вертикальных напряжений при отсутствии нарушения составляет 3.4, а при его наличии — 3.9.

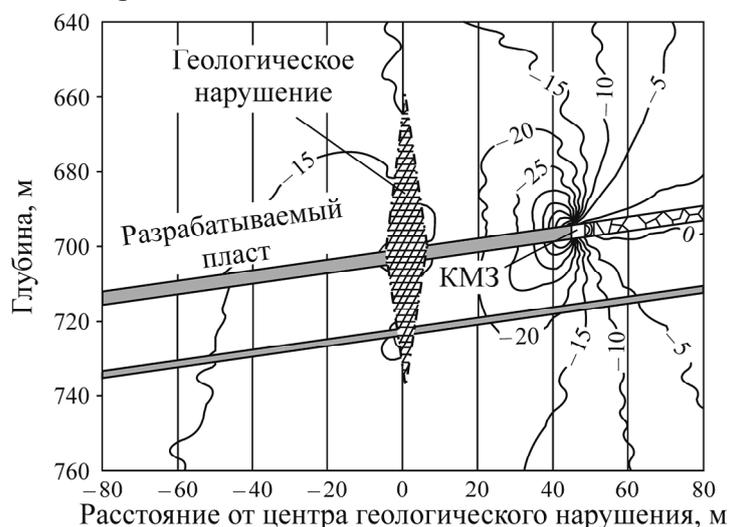


Рис. 3. Распределение изолиний вертикальных напряжений (МПа) при ширине целика 40 м

Для каждого варианта расчета определены площади зон разрушенного состояния угля и вмещающих пород впереди очистного забоя. Для этой цели установлены зоны, где отношение остаточной прочности пород к исходной равно 0.5, что соответствует запредельному состоя-

нию угля. Установлено, что геологическое нарушение оказывает значительное влияние на площадь разрушенного угля при ширине целика менее 50 м (рис. 4), т. е. при отношении ширины целика  $b_1$  к глубине разработки  $H$ , равном 0.14. При дальнейшем уменьшении ширины целика площадь разрушенных пород  $S_{\text{разр}}$  впереди очистного забоя можно определить по формуле  $S_{\text{разр}} = 0.003b_1^2 - 0.45b_1 + 28.2$ .

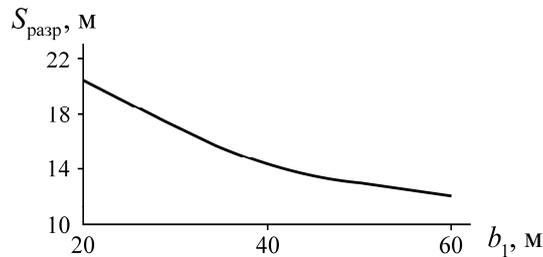


Рис. 4. Зависимость площади разрушенных пород от ширины целика

При уменьшении ширины целика до 20 м зона разрушения пород распространяется не только на пласт, но и на породы кровли на высоту около 1 м. В этих условиях возможен отжим угля и возникает риск обрушения пород кровли. Отметим, что ширина целика слабо влияет на характер оседания пород кровли в выработанном пространстве вблизи забоя. Горизонтальные смещения в угольном пласте на линии очистного забоя при уменьшении угольного целика от 60 до 20 м увеличиваются лишь в 1.4 раза. Таким образом, результаты моделирования показывают, что наиболее приемлемая с геомеханической точки зрения ширина целика между демонтажной камерой и геологическим нарушением равна 40 м.

Для анализа геомеханического состояния массива горных пород вокруг монтажной камеры, возводимой для ремонта механизированного комплекса по другую сторону от геологического нарушения, проведены расчеты напряженно-деформированного состояния массива при расположении демонтажной камеры на расстояниях 20 и 40 м от нарушения (табл. 3, рис. 5).

ТАБЛИЦА 3. Параметры напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестности геологического нарушения при различных расположениях монтажной камеры

Описание модели	Положение точки расчета	Параметр	Ширина целика, м	
			20	40
Слоистый массив горных пород с геологическим нарушением. Перед нарушением оставлен целик шириной 40 м, за нарушением пройдена монтажная камера шириной 8 м на расстоянии от нарушения 20 и 40 м	В кровле монтажной камеры	Вертикальные смещения, мм	-58	-50
	В левом боку монтажной камеры	Горизонтальные смещения, мм	-1	3
		Вертикальные напряжения, МПа Горизонтальные напряжения, МПа	-24 -6.2	-29 -8.4
В правом боку монтажной камеры		Вертикальные напряжения, МПа	-23	-25
		Горизонтальные напряжения, МПа	-5.1	-8.1
		Отношение площади эпюр дополнительных вертикальных напряжений, %	150	100

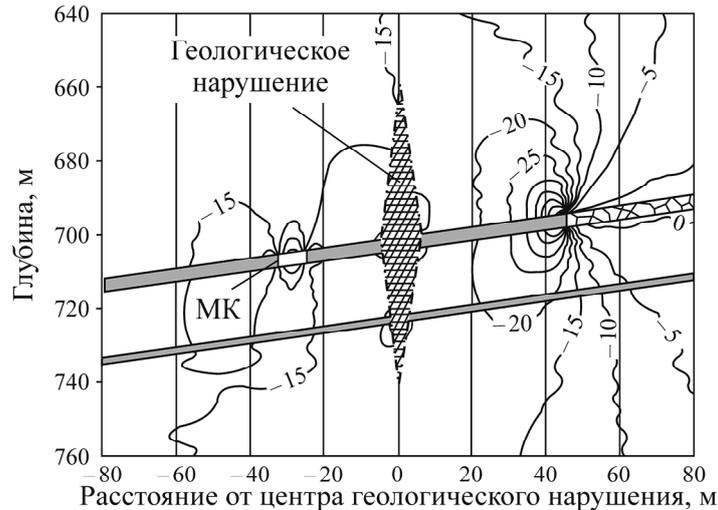


Рис. 5. Изолинии вертикальных напряжений (МПа) при расположении монтажной камеры (МК) в 20 м от нарушения

Установлено, что при ширине целика 40 м наибольшие вертикальные напряжения (около 30 МПа) наблюдаются в окрестности монтажной камеры со стороны массива и около 25 МПа — при ширине целика 20 м. Горизонтальные напряжения в боках монтажной камеры при уменьшении ширины целика с 40 до 20 м увеличиваются в 1.2–1.4 раза. Можно сделать вывод, что напряженное состояние целика шириной 20 м незначительно отличается от напряженного состояния целика шириной 40 м. Это подтверждается отношением площадей эпюр дополнительных вертикальных напряжений. При ширине целика 20 м их площадь лишь в 1.6 раза больше, чем при целике 40 м, хотя зона разрушения в целике меньшей ширины составляет 5 м, т. е. 25 % его площади, остальная часть целика находится в устойчивом состоянии. Таким образом, можно рекомендовать ширину целика между геологическим нарушением и монтажной камерой 20 м, что позволит увеличить коэффициент извлечения угля в выемочном столбе.

При удалении очистного забоя от целика шириной 20 м на расстояние 40 и 80 м вертикальные напряжения в окрестности забоя увеличиваются с 35 до 50 МПа (в 1.4 раза), а горизонтальные при таких же горнотехнических условиях — с 11 до 19 МПа (табл. 4, рис. 6). Это объясняется увеличением площади зависающих пород кровли, в результате чего краевая часть пласта впереди очистного забоя оказывается в более напряженном состоянии.

ТАБЛИЦА 4. Расчетные параметры напряженно-деформированного состояния массива горных пород при развитии очистных работ после перемонтажа очистного комплекса

Описание модели	Положение точки расчета	Параметр	Ширина выработанного пространства, м	
			40	80
Слоистый массив, включающий геологическое нарушение. Перед нарушением оставлен целик 40 м, за нарушением — целик 20 м. Очистной забой отходит от целика	В кровле очистного забоя	Вертикальные смещения, мм	–38	–60
		Горизонтальные смещения, мм	–20	–45
	Впереди очистного забоя	Вертикальные напряжения, МПа	–35	–50
		Горизонтальные напряжения, МПа	–11	–19
		Вертикальные смещения, мм	–60	–94
	В краевой части целика, оставленного у нарушения	Горизонтальные смещения, мм	40	80
		Вертикальные напряжения, МПа	–50	–67
		Горизонтальные напряжения, МПа	–13	–17
		Вертикальные смещения, мм	–60	–94

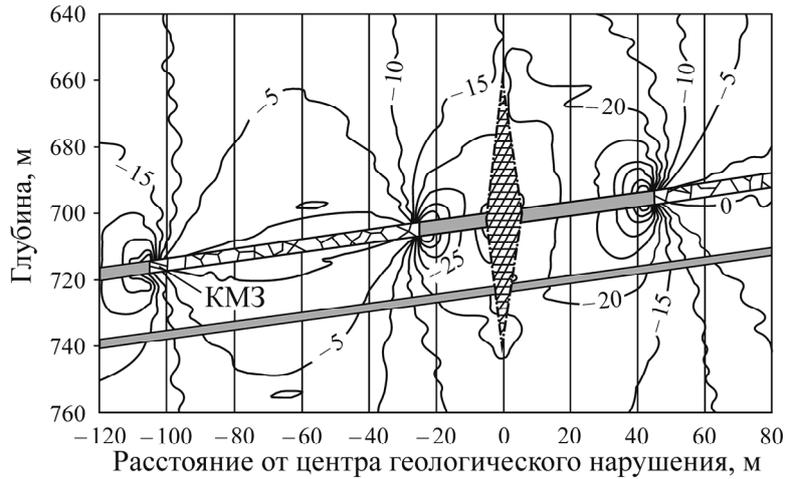


Рис. 6. Изолинии вертикальных напряжений (МПа) при ширине целика 20 м и удалении очистного забоя от монтажной камеры на 80 м

При увеличении глубины ведения горных работ с 350 до 1050 м происходит снижение коэффициента концентрации вертикальных напряжений в зонах опорного давления (табл. 5, рис. 7). Вид зависимости соответствует общепринятым представлениям о распределении коэффициента концентрации напряжений в окрестности горных выработок [14].

ТАБЛИЦА 5. Расчетные параметры напряженно-деформированного состояния массива горных пород с учетом влияния геологического нарушения при различных глубинах отработки

Описание модели	Положение точки расчета	Параметр	Глубина, м		
			350	700	1050
Слоистый массив, включающий геологическое нарушение. Перед нарушением оставлен целик 40 м, за нарушением — целик 20 м. Очистной забой продвинулся от целика на расстояние 80 м	В кровле очистного забоя	Вертикальные смещения, мм	-50	-60	-65
		Впереди очистного забоя	Горизонтальные смещения, мм	-26	-45
	Вертикальные напряжения, МПа		-39	-50	-55
	Горизонтальные напряжения, МПа		-14	-19	-21
	Коэффициент концентрации вертикальных напряжений		4.5	3.8	2.6
	В краевой части целика, оставленного у нарушения	Вертикальные смещения, мм	-80	-94	-100
		Горизонтальные смещения, мм	62	80	71
		Вертикальные напряжения, МПа	-40	-67	-69
		Горизонтальные напряжения, МПа	-15	-17	-19
		Отношение остаточной прочности пород к исходной	0.50	0.24	0.19

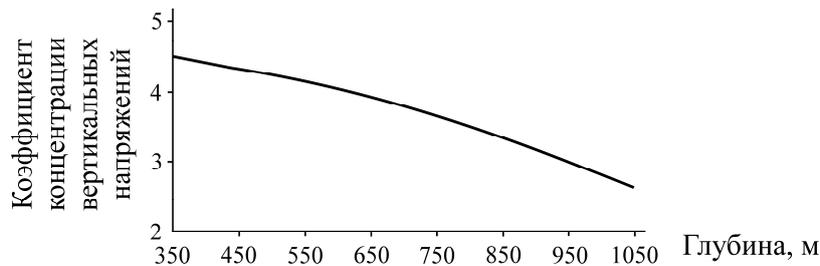


Рис. 7. Влияние глубины ведения горных работ на максимальное значение коэффициента концентрации вертикальных напряжений в окрестности геологического нарушения

**ВЫВОДЫ**

При подходе длинного очистного забоя к непереходимому геологическому нарушению в выемочном участке рекомендуется оставлять целик шириной 40 м, так как при меньшей его ширине могут проявляться негативные последствия горного давления.

При переводе механизированного комплекса в породный массив, расположенный по другую сторону от нарушения, рекомендуется оставлять целик шириной 20 м при условии проведения профилактических мер по предупреждению гео- и газодинамических явлений.

Результаты моделирования геомеханического состояния массива горных пород, включающего разрывные геологические нарушения в выемочном участке, можно использовать для условий отработки пологопадающих угольных пластов Кузбасса на глубине до 1000 м.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Плотников Е. А., Дырдин В. В., Елкин И. С., Гвоздкова Т. Н. Предотвращение динамических и газодинамических явлений при подземной разработке угольных пластов. — Кемерово: Кузбассвуиздат, 2010. — 159 с.
2. Гарбер И. С., Григорьев В. Е., Дулак Ю. Н. и др. Разрывные нарушения угольных пластов (по материалам шахтной геологии). — Л.: Недра, 1979. — 190 с.
3. Геологическое обеспечение работ по добыче угля: сборник нормативных документов. — М.: Изд-во “Горное дело” ООО “Киммерийский центр”, 2011. — 432 с.
4. Положение о порядке и контроле безопасного ведения горных работ в опасных зонах. — СПб.: ВНИМИ, 1994. — 28 с.
5. Шаклеин С. В., Писарева М. В. Подходы к обоснованию концепции развития минерально-сырьевой базы Кузнецкого угольного бассейна // Рациональное освоение недр. — 2013. — № 2. — С. 38–40.
6. Проскураков Н. М. Управление состоянием массива горных пород. — М.: Недра, 1991. — 368 с.
7. Киржнер Ф. М., Скуба В. Н., Козионов Е. М., Левкович П. Е. Технология разработки нарушенных угольных пластов. — Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1983. — 172 с.
8. Борзых Д. М., Риб С. В., Фрянов В. Н. 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” // Объединенный фонд электронных ресурсов “Наука и образование”. — 2014. — № 20629.
9. Риб С. В., Басов В. В. Методика подготовки исходных данных для решения двумерных задач численного моделирования неоднородных угольных целиков // Вестн. СибГИУ. — 2014. — № 4. — С. 11–13.
10. Риб С. В., Басов В. В. Методика численного исследования напряженно-деформированного состояния неоднородных угольных целиков с применением современных компьютерных технологий // Вестн. СибГИУ. — 2015. — № 4. — С. 22–26.
11. Курлень М. В., Серяков В. М., Еременко А. А. Техногенные геомеханические поля напряжений. — Новосибирск: Наука, 2005. — 264 с.
12. Серяков В. М. К расчету напряженно-деформированного состояния массива горных пород над выработанным пространством // ФТПРПИ. — 2009. — № 5. — С. 21–28.
13. Штумпф Г. Г., Рыжков Ю. А., Шаламанов В. А. Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна. — М.: Недра, 1994. — 447 с.
14. Борисов А. А. Механика горных пород и массивов. — М.: Недра, 1980. — 360 с.

*Поступила в редакцию 16/X 2017*