РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

2019 № 5

УДК 622.831

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УГЛА НАКЛОНА ПЛАСТА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОПОРНОГО ДАВЛЕНИЯ И СМЕЩЕНИЙ В РАЙОНЕ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СПЛОШНОЙ ВЫЕМКИ

М. Дамгани[1], Р. Рахманнеджад[1], М. Наджафи[2]

[1]*Университет Шахида Бахонара в Кермане,*
E-mail: mohammaddamghany@gmail.com, *г. Керман, Иран*
[2]*Йездский университет,*
E-mail: mehdinajafi@yazd.ac.ir, *г. Йезд, Иран*

Изучено влияние давления обрушенных пород на крепь горизонтальной выработки, несущую способность крепления кровли и предохранительные целики над штреком. С помощью пакета компьютерных программ FLAC 3D созданы численные модели пяти сплошных забоев наклона угольных пластов. Показано, что во всех моделях пиковое опорное давление в предзабойной зоне изменялось на расстоянии 1 – 2 м от линии забоя, а разница между этим напряжением и напряжением в области забоя составила 9.7 МПа. Увеличение угла наклона пласта практически не влияет на пиковое опорное давление в боковой зоне по периметру выемки, а концентрация давления в боковой зоне происходит вблизи границ целика. При угле наклона пласта 0 и 12° максимальное опорное давление получено на расстоянии 5.4 м от границы целика, тогда как при угле наклона 42° оно возникало на расстоянии 3 м. Результаты численного моделирования согласуются с данными натурных наблюдений.

Численное моделирование, разработка длинными забоями, распределение опорного давления, пакет компьютерных программ FLAC 3D

DOI: 10.15372/FTPRPI20190506

Сплошная система разработки — широко применяемый метод при выемке пологопадающих угольных пластов. Он имеет высокую производительность и обеспечивает большие объемы добычи угля. Высокотехнологичное оборудование, механизация операций и возможность разработки наклонных пластов на больших глубинах залегания позволили горным инженерам сделать выбор в его пользу [1, 2]. Угольные пласты с небольшим углом наклона 0 – 35° наиболее удобны для механизированной разработки. Чаще всего при выемке пластов с углом наклона до 35° забой может быть механизирован при помощи специальных креплений кровли. Главная цель любого способа добычи угля — экономически выгодное и безопасное извлечение полезного ископаемого в подземных условиях. При продвигании забоя на достаточно большие расстояния может происходить обрушение непосредственной кровли. Разрушение налегающих пород постепенно распространяется вверх, что может существенно изменить напряженное состояние в штреке и целике,

а также затронуть систему крепи. Во время продвигания забоя при сплошной системе разработки происходит перераспределение опорного давления в предзабойных и боковых зонах [2, 3].

При оценке напряжений и смещений в области сплошной разработки могут применяться эмпирические, аналитические, инструментальные и численные методы. Эмпирические методы обычно используются на месте проведения работ по добыче и не обладают всеми необходимыми параметрами для анализа распределения напряжений в районе сплошной выемки. Характеристики опорного давления в предзабойной зоне достаточно трудно определяются аналитическим способом, так как нахождение распределения нагрузки по краям забоя является сложной пространственной задачей [4]. Для поддержания стабильных условий во время разработки необходимо иметь данные о смещениях кровли и распределении давления вблизи выемочной панели. Данные о состоянии области выработанного пространства также важны при оценке опорного давления при сплошном методе добычи. В связи с этим численное моделирование разработки длинными забоями может стать альтернативным решением для исчерпывающего и более четкого понимания такого сложного процесса.

Попытки оценить распределение давления и смещения в области сплошной разработки угольного пласта предпринимались многими учеными. В [5] исследовано распределение давления во вмещающих породах позади длинного очистного забоя с учетом основного закона деформационного упрочнения для выработанного пространства при помощи численного моделирования. В [6] предложен метод оценки расстояния, на которое распространяется давление перекрывающих пород и перераспределяются напряжения в зоне выработанного пространства при горизонтальной сплошной выемке при использовании массового обрушения. Показано, что расстояние, на которое распространяется давление перекрывающей породы, экспоненциально увеличивается с ростом глубины отработки.

В [7] анализируется метод разработки длинными забоями с обрушением верхних пачек угольного пласта при помощи программы FLAC 3D. Установлено, что максимальное вертикальное опорное давление достигается на 7-метровом расстоянии от сплошного забоя. В [8] выполнено двухмерное численное моделирование и анализ геомеханического состояния массива с целью совершенствования технических возможностей предупреждения перераспределения напряжений, обрушения пластов и водопритоков, возникающих вследствие операций по выемке угля. В [9] приводится оценка оптимальной ширины предохранительного целика на угольной шахте в Табасе, осуществленная с помощью численного моделирования. Показано, что максимальное напряжение достигается на расстоянии 4 – 5 м от края целика, в то время как забой находится на расстоянии 20 м от линии сканирования.

Сравнение результатов моделирования напряженно-деформированного состояния массива, вызываемого проведением выработок, полученных при помощи программы FLAC 3D и с применением программы Map 3D, представлено в [10]. Программа Map 3D не подходит для анализа сдвижения горных пород и может быть использована только в тех случаях, когда имеются точные данные о геометрических характеристиках и свойствах выработанного пространства. В [11] исследована стабильность штреков и изучен процесс воздействия нагружения на анкерную крепь при сплошной системе разработки с использованием численных методов. Данный подход включает моделирование процесса выемки и перераспределение напряжений. В [12] предложен метод расчета высоты нарушенной зоны над областью сплошной отработки и получено, что высота нарушенной зоны намного больше высоты извлекаемого угольного пласта. Комплексный подход проведения полевых испытаний и численного

исследования для оценки рисков выбросов угля с использованием программного обеспечения FLAC 3D рассмотрен в [13]. Для моделирования выработанного пространства учтены его упругие и пластичные свойства исходя из свойств обрушенной кровли.

Изменение напряжений в граничном целике при сплошной разработке на шахте Сева Норд при помощи программы FLAC 3D исследовано в [14]. В [15] разработана аналитическая модель определения напряжений, вызванных горными работами в зоне штреков и целиков при выемке угля длинными забоями. На основе оценки распределения горного опорного давления в предзабойной и боковых зонах и его влияния на предохранительные целики посредством FLAC 3D определено оптимальное расстояние между двумя прилегающими панелями действующего забоя при разработке короткими забоями [16]. Численное моделирование с целью изучения динамики изменения напряжений и определения коэффициента проницаемости при помощи FLAC 3D выполнено в [17]. Показано, что максимальное значение проницаемости возникает на стадии деформационного разуплотнения и значения сильно зависят от литологии породы.

Как видно из анализа опубликованных работ, нигде не учитывалось влияние наклона угольного пласта на распределение опорного давления и смещения вокруг панелей в ходе механизированной сплошной разработки. Цель настоящей работы — оценка влияния угла наклона угольного пласта на распределение напряжений (предзабойная и боковые зоны опорного горного давления) и смещения по контуру сплошной выработки с использованием метода конечных разностей.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Изучение влияния угла наклона угольного пласта на распределение опорного давления в панели при сплошной разработке проводилось на механизированной угольной шахте Табас. Она расположена в угольном регионе Табас, приблизительно в 85 км к югу от г. Тебес в иранской провинции Южный Хорасан. Разработка угольного пласта C_1 ведется механизированным способом при помощи длинных забоев от границ панели к штреку. Мощность пласта варьирует от 1.5 до 3.0 м (~ 2.2 м), а угол наклона составляет 5 – 26° [18]. На шахте разработка осуществляется длинными забоями (220 м) с использованием системы трех параллельных штреков. Длина панели 1200 м.

Для пяти имитационных моделей численное моделирование выполнено при помощи программы FLAC 3D и включает шесть стадий: определение общего вида модели; определение границ и свойств материалов; подготовка модели (геометрия модели, построение сетки и поведение модели); моделирование горизонтальной выработки, возведения крепи, разработки угольного пласта; получение результатов (распределение давления и смещений).

Ширина и длина выемочной панели на шахте Табас составляют 220 и 1200 м соответственно. В связи с этим подготовка реальной численной модели, учитывая ограничение объема памяти и продолжительность обработки, представляет некоторую сложность. Фактическая длина панели 1200 м, а средняя мощность перекрывающих пород 250 м. Исходя из условий симметрии, приняты следующие размеры модели: 155 м (половина размера панели и ширины штрека и целика) по оси *X*, 250 м по оси *Y* и 150 м по оси *Z*. На верхней поверхности модели приложена нагрузка 3.27 МПа для имитации давления перекрывающих пород. При проведении расчетов соотношение горизонтального и вертикального напряжений принято равным 1.12, горизонтальное смещение зафиксировано на боковой границе, в то время как вертикальное — на нижней. Для построения модели использованы блочные элементы, для каждого из них приняты размеры 1, 2 и 1 м по осям *X*, *Y* и *Z* соответственно. Модель состоит из 189 346 сегментов и содержит 201 705 узло-

вых точек (рис. 1). В программе FlAC 3D созданы численные модели угольных пластов с углами наклона 0, 12, 22, 32 и 42°. Для более точного приближения к условиям отработки над угольным пластом C_1 смоделирован пласт C_2 мощностью 0.5 м. Численные модели построены таким образом, чтобы высота слоя налегающих пород над штреком была фиксированной. Поэтому при увеличении угла наклона угольного пласта от 0 до 42° высота перекрывающего слоя уменьшилась на 50 м в центральной части панели. Для того, чтобы оценить распределение напряжения (опорное давление в призабойной и боковых зонах) и смещение в панели, целике и кровле горизонтальной выработки, выделен ряд точек и линий сканирования.

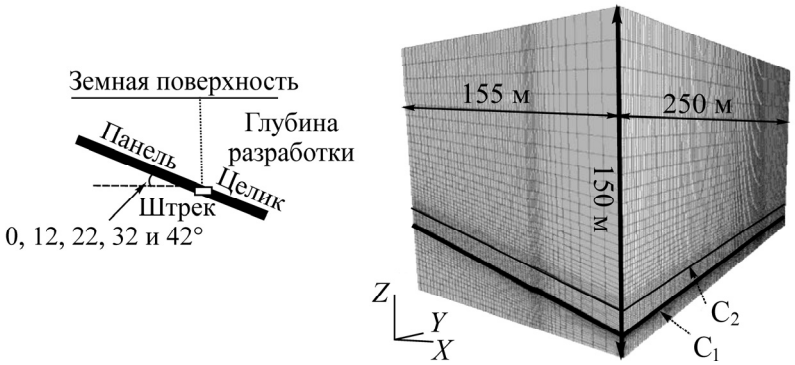

Рис. 1. Модель сплошной системы разработки

Для установления характера распределения напряжений в угольном пласте и кровле использована модель Мора – Кулона и параметры, представленные в табл. 1 [18].

ТАБЛИЦА 1. Параметры численного моделирования

Характеристика породы	Уголь	Породный массив
Плотность γ ,т/м^3	1.60	2.60
Модуль упругости E, ГПа	3.00	5.30
Объемный модуль упругости K, ГПа	2.38	2.91
Модуль сдвига G, ГПа	1.16	1.34
Сцепление C, МПа	0.50	1.00
Предел прочности на растяжение σ_t , МПа	0.66	2.80
Коэффициент Пуассона υ	0.29	0.30
Угол внутреннего трения ϕ, град	23.00	32.00

В разработанную численную модель введена система крепи горизонтальной выработки, соответствующая системе крепи на угольной шахте Табас. В горизонтальной выработке установлена анкерная крепь, в зоне целика — гибкая крепь, по бокам выработки — крепь из стекловолокна, а в районе кровли — стальная крепь. Количество последовательно расположенных штанг крепи в кровле, боках выработки и целике равно соответственно 5 и 3. Механические свойства каждого типа анкерной крепи приведены в табл. 2 [18].

В данной работе рассмотрена также система механизированной крепи для панели. Для ее моделирования на каждом участке выемки панельного целика подразумевалось наличие угольного целика шириной 2 и длиной 110 м, воздействию вмещающих пород и обладающего жесткоэластичными свойствами: плотность $\gamma = 4000$ кг/м^3, объемный модуль упругости $K = 100$ ГПа; модуль сдвига $G = 30$ ГПа.

ТАБЛИЦА 2. Механические свойства анкерной крепи и цементного раствора

Свойство	Материал крепи		
	Стекловолокно	Сталь	Гибкий материал
Площадь поперечного сечения, м^2	0.41	0.37	0.38
Модуль Юнга, ГПа	1.05	4.07	7.22
Предел прочности на разрыв, МПа	0.08	0.31	0.60
Прочность раствора на единицу длины, МПа	10.83	16.40	20.95
Сцепление раствора на единицу длины, МН/м	1.58	1.42	1.42
Внешний периметр бетонной крепи, мм	94.20	84.80	84.80

Схема численного моделирования представлена на рис. 2. Определяется начальное напряженное состояние модели. Далее осуществляется проходка горизонтальной выработки и возведение крепи, после чего рассчитывается напряженно-деформированное состояние. Выемка панельного целика разделена на 15 этапов продвигания забоя, ширина вруба составляет 10 м. На каждой стадии расчета, после определения соответствующего напряженного состояния, проводится корректировка свойств обрушенной породы. Данные предыдущей заходки выступают в качестве характеристик обрушенных пород при последующей заходке. Этот алгоритм повторяется до полного окончания выемки панельного целика.

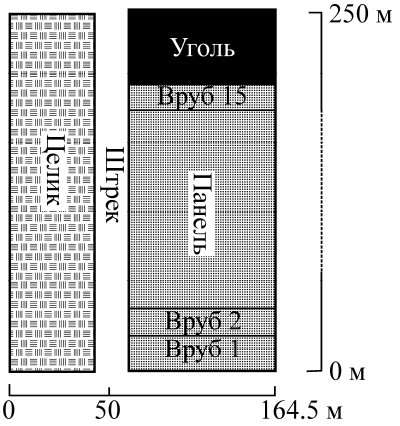

Рис. 2. Схематическое изображение заходки при численном моделировании

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА

Процесс обрушения пород представляет неотъемлемую часть геомеханики сплошной системы разработки. Моделирование обрушенных пород — еще один этап, влияющий на точность полученных результатов. Существует предположение, что основной закон деформационного упрочнения лучше всего описывает уплотнение в зоне выработанного пространства. Когда порода в области выработанного пространства уплотняется под воздействием растущего напряжения, уменьшение объема пустот приводит к увеличению давления [19, 20]. Модели выработанного пространства основаны на свойстве деформационного упрочнения [19]. В данном исследовании при моделировании свойств пород в выработанном пространстве в условиях сплошной разработки использована теоретическая модель Саламона, согласно которой деформирование закладочного материала описывается соотношением

$$\sigma = \frac{E_0 \varepsilon}{1 - \dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_m}}, \tag{1}$$

где σ — напряжение в зоне выработанного пространства; ε — текущая деформация в зоне выработки; E_0 — секущий модуль упругости среды в зоне обрушения; ε_m — максимальная деформация в области выработанного пространства [21].

Для реализации выработанного пространства разработаны и протестированы два различных подхода, включающие корректировку модуля упругости и задание силового воздействия на расчетную сетку. В связи с изучением наклонных угольных пластов применялся метод силового воздействия на узловые точки, внедренный в программу FLAC 3D, для моделирования нагрузки, создаваемой обрушенной породой. Кровля над выработанным пространством поддерживалась силами, направленными вверх сетки. Сила воздействия на узловые точки вычислялась исходя из оседаний кровли, возникших в этих точках сетки. Согласно этому методу, вертикальное напряжение в зоне выработанного пространства растет с увеличением вертикальной деформации ε_y :

$$\sigma_v = \frac{a\varepsilon_v}{b - \varepsilon_v}, \tag{2}$$

здесь a — постоянная, определяющая модуль деформации выработанного пространства; b — установленный предел вертикальной деформации.

Схематическое изображение сжимающей силы, действующей на точку сетки в кровле выработки, представлено на рис. 3.

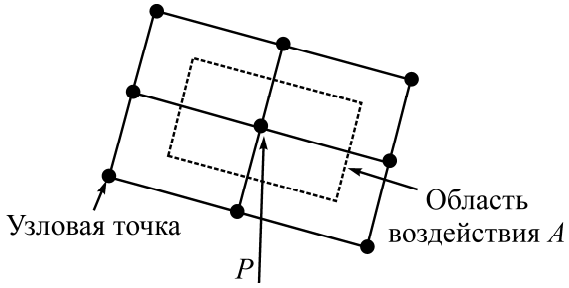

Рис. 3. Сжимающая сила и область воздействия

После первой заходки устанавливаются вертикальные смещения узловых точек в кровле выработанного пространства и их распределение по высоте пласта для определения вертикальной деформации ε_v в каждой узловой точке. Опорное давление в любой из узловых точек рассчитывается при помощи (2). Сила, возникающая в узловой точке после каждой заходки, вычисляется путем умножения вертикального напряжения в узловой точке на площадь воздействия A [19]: $P = A\sigma_v$. Распределение сил, возникающих в целике после выемки пласта, показано на рис. 4.

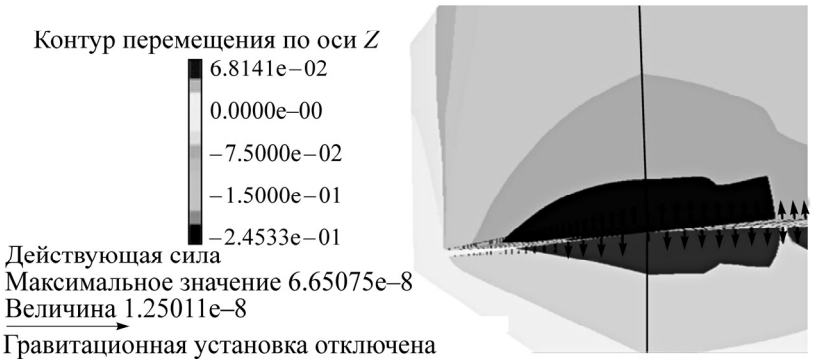

Рис. 4. Распределение сжимающих сил в зоне выработанного пространства после 15 заходок

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты численного моделирования сравнивались с данными, полученными на угольной шахте Табас при помощи инструментальных методов (рис. 5). Отметим, что на шахте выемка целика производится обратным ходом и вместе с обрушением кровли происходит разрушение горизонтальной выработки. В связи с этим получить данные позади забоя при помощи инструментальных методов возможно только по его верхнему краю. Смещения кровли в районе забоя превышают данные численного моделирования (рис. 5). По результатам, полученным инструментальными методами, граница влияния выемки установлена на расстоянии ~60 м от забоя, в то время как при численном моделировании она равна 80 м. Это расхождение можно объяснить воздействием природных факторов, не учитываемых при численном моделировании. Однако главной причиной более высоких смещений при инструментальных измерениях является несвоевременные остановки при продвигании забоя. Так, остановка работ на несколько дней может привести к увеличению смещения в этой области.

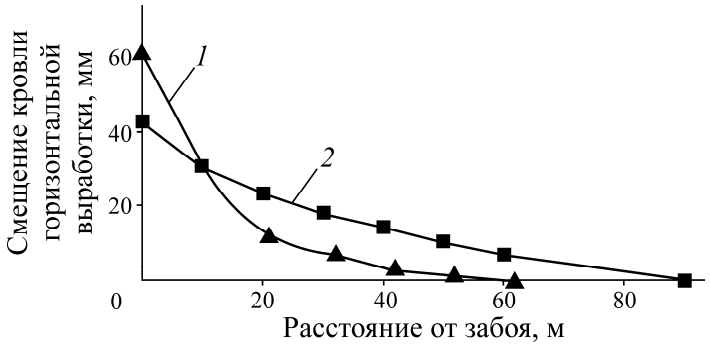

Рис. 5. Данные вертикального смещения, полученные с пункта наблюдения (*1*) на угольной шахте Табас, и результаты численного моделирования (*2*)

Одним из наиболее важных моментов численного анализа при сплошной системе разработки является изучение распределения напряжений по периметру панельного целика. Давление, возникающее при этом в зоне выработанного пространства, действует на две стороны панели и предохранительный целик. Оно превышает значения вертикальных напряжений в исходном состоянии, называется опорным давлением и подразделяется на боковое и предзабойное [3].

На рис. 6 представлен график опорного давления, возникающего в кровле в центральной части панельного целика при углах наклона 0, 12, 22, 32 и 42° в случае, когда забой находится на расстоянии 80 м по оси *Y*.

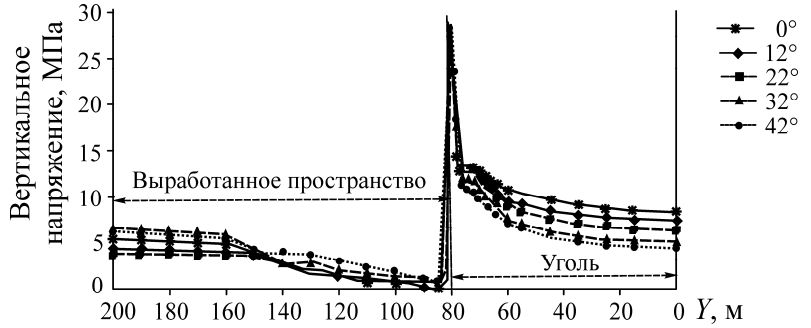

Рис. 6. График опорного давления в предзабойной зоне при угле наклона пласта 0, 12, 22, 32 и 42°

Из рис. 6 видно, что во всех моделях максимальное опорное давление действует перед забоем и возникает на расстоянии ~ 1 – 3 м от него. С увеличением расстояния от линии забоя напряжение в неразработанной области постепенно снижается и достигает начального значения на расстоянии ~ 80 м. Увеличение угла наклона угольного пласта приводит к уменьшению мощности перекрывающих пород в центре панельного целика. С ростом угла наклона угольного пласта максимальное опорное давление увеличивается в передней зоне забоя. Давление на переднюю зону забоя при угле наклона пласта 42° составляет 28.43 МПа; если угол наклона 0°, опорное давление 18.6 МПа, т. е. при увеличении угла наклона угольного пласта давление увеличивается на 9.74 МПа. Вместе с тем, если учитывать уменьшение мощности перекрывающих пород на 50 м, то опорное давление в предзабойной зоне повышается больше чем на 11 МПа.

С увеличением угла наклона угольного пласта опорное давление перед забоем достигает значения начального пластового давления на меньших расстояниях от забоя. Так, на 80-метровом расстоянии от забоя опорное давление перед забоем при угле наклона пласта 42° будет примерно на 4.3 МПа меньше, чем при нулевом угле наклона. Опорное давление, действующее на переднюю часть выработанного пространства, создает зону пониженного напряжения позади забоя. По мере продвигания забоя более чем на 80 м давление в зоне выработанного пространства постепенно восстанавливается примерно до 80% от начального.

В боковой зоне опорное давление распространяется на зону выработанного пространства, предохранительный целик и горизонтальную выработку между двумя панелями. Исследование воздействия угла наклона угольного пласта на распределение опорного давления в боковой зоне проводилось в трех сечениях на разных численных моделях: в передней части забоя, параллельно забою и позади забоя. Эти сечения представлены на рис. 7.

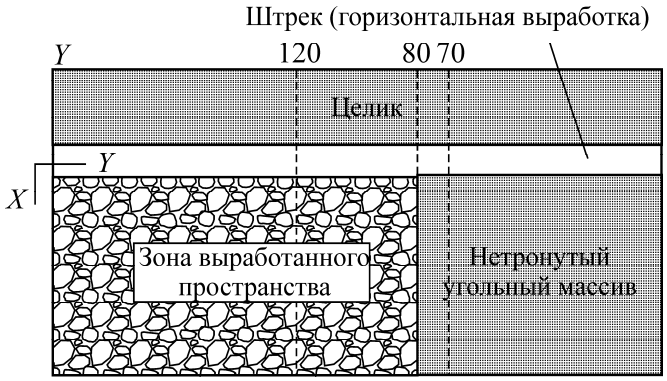

Рис. 7. Расположение линий сканирования для регистрации значений опорного давления в передней и боковой зонах

Распределение опорного давления в боковой зоне на расстоянии 70 м (10 м перед линией забоя) показано на рис. 8*а*. Видно, что с увеличением угла наклона угольного пласта пик максимального опорного давления, воздействующего на целик в боковой зоне, не подвергался большим изменениям. С ростом угла наклона максимальное опорное давление в боковой зоне проявляется ближе к краю целика. На рис. 8*б* показано распределение опорного давления в боковой зоне для точек, расположенных на линии забоя $Y = 80$ м. Оно аналогично распределению при 70-метровом расстоянии. С увеличением угла наклона угольного пласта пиковая точка напряжения также сдвигается к краю целика и горизонтальной выработке. Максимальное дав-

ление при $Y = 80$ м больше, чем на расстоянии 70 м. Кроме того, при рассмотрении воздействия опорного давления на кровлю горизонтальной выработки установлено, что на стыке с забоем максимальное уменьшение напряжения наблюдается в центре штрека.

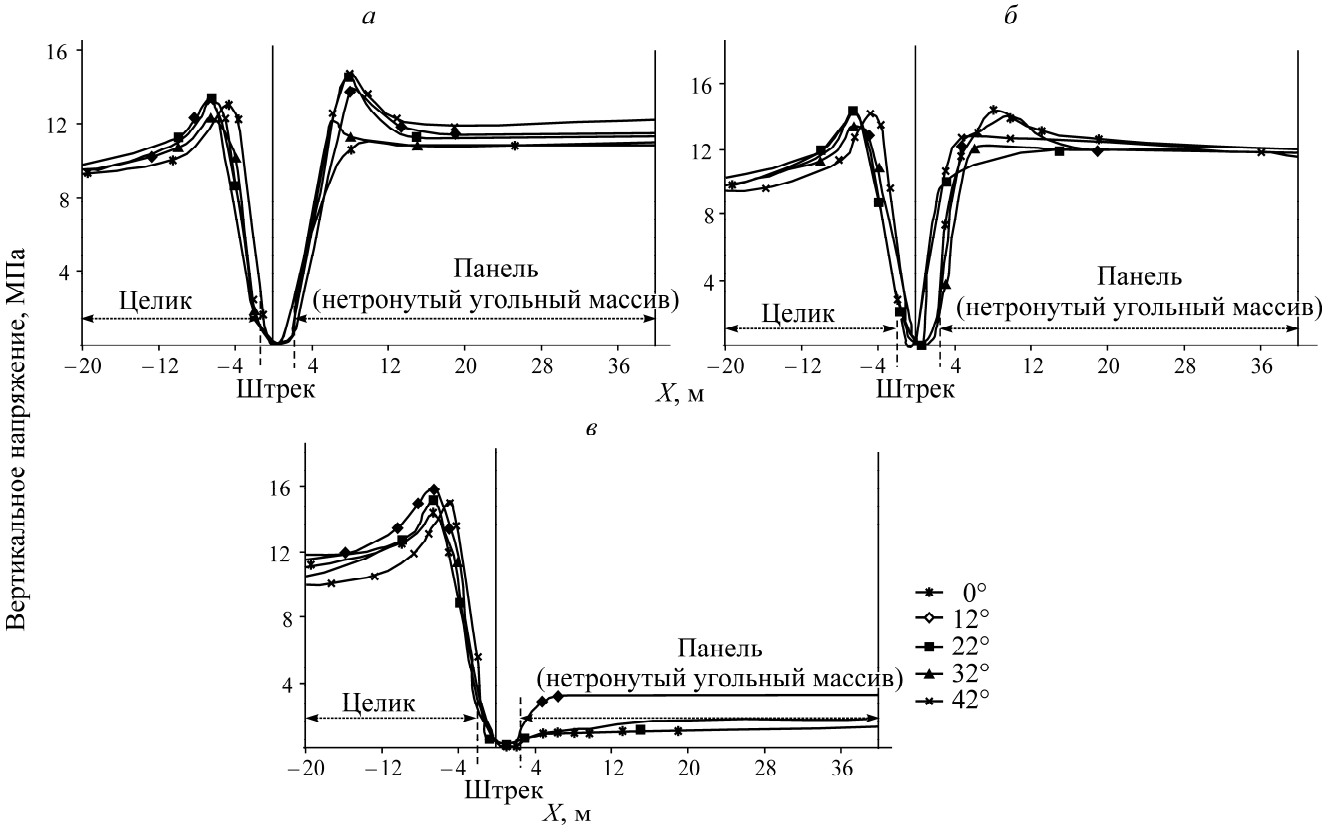

Рис. 8. Распределение опорного давления в боковой зоне на линии забоя $Y = 70$ м (*а*), $Y = 80$ м (*б*) и позади забоя $Y = 120$ м (*в*)

Распределение опорного давления в области позади забоя $Y = 120$ м приведено на рис. 8*в*. Значения бокового опорного давления увеличиваются из-за давления обрушенных пород, воздействующих на целик. В целом характер изменения напряжений аналогичен ранее описанным, т. е. с ростом угла наклона угольного пласта опорное давление боковой зоны в большей степени воздействует на край целика.

Анализ распределений опорного давления на рис. 8 позволяет сделать следующие выводы. С увеличением угла наклона угольного пласта точка максимального напряжения смещается ближе к краю целика. При углах наклона 0 и 12° максимальное давление возникает на расстоянии 5.4 м от края целика, в то время как при угле наклона 42° оно достигается в 3 м. Давление на целик уменьшается с увеличением угла наклона угольного пласта. Максимальные значения опорного давления, воздействующего на целик, близки друг к другу при различных углах наклона угольного пласта.

На рис. 9 продемонстрированы смещения точек в кровле горизонтальной выработки по мере продвигания забоя при различных углах наклона угольного пласта. Смещения увеличиваются с ростом угла наклона. В большей степени это проявляется в сечениях, расположенных на удалении от забоя. При идентичных условиях увеличение угла наклона угольного пласта от 0 до 42° приводит к движению смещений кровли в районе края забоя на 20 %.

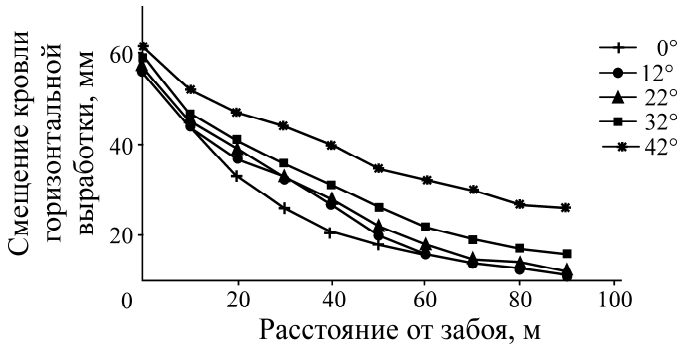

Рис. 9. Смещение кровли горизонтальной выработки при различных углах наклона

ВЫВОДЫ

Влияние угла наклона угольного пласта на распределение опорного давления изучено на угольной шахте Табас с помощью пакета компьютерных программ FLAC 3D. Показано, что опорное давление призабойной зоны, воздействующее на угольный пласт, повышается с увеличением угла наклона пласта. При определении опорного давления в боковой зоне в трех различных сечениях выявлено примерно одинаковое воздействие на целик, расположенный между двумя панелями. Установлено, что смещения в кровле горизонтальной выработки увеличиваются с ростом угла наклона угольного пласта.

Распределение опорного давления и полученные в ходе численного моделирования его значения отвечают горнотехническим и геологическим условиям шахт Ирана. Даны рекомендации по установке более прочной анкерной крепи в области целика и горизонтальной выработки на шахте Табас, где ведется разработка наклонного угольного пласта, в связи с высокими значениями опорного давления у края целика и горизонтальной выработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Deepak D.** Longwall face support design, a micro-computer model, J. Min., Metals & Fuels, 1986.
2. **Peng S. S.** Longwall mining. Richmond, West Virginia University, Morgantown, WV, 2006. — P. 513 – 514.
3. **Peng S.** Coal mine ground control, A Wiley-Interscience Publ., 2nd Ed., 1986. — P. 237 – 264.
4. **Luo J. L.** Gate road design in overlying multi-seam mines, MSc Thesis in Department of Min. and Minerals Eng., Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, Virginia, USA 24061, 1997.
5. **Thin I. G. T., Pine R. J., and Trueman R.** Numerical modelling as an aid to the determination of the stress distribution in the goaf due to longwall coal mining, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci. and Geomech. Abstracts, 1993, Vol. 30, No. 7. — P. 1403 – 1409. Pergamon.
6. **Yavuz H.** An estimation method for cover pressure re-establishment distance and pressure distribution in the goaf longwall coal mines, J. Rock Mech. and Min. Sci., 2004, Vol. 41, No. 2. — P 193 – 205.
7. **Yasitli N. E. and Unver B.** 3D numerical modelling of stresses around a longwall panel with top coal caving, J. South African Inst. Min. Metall, 2005, Vol. 105, No. 5. — P. 287 – 300.
8. **Islam M. R., Hayashi D., and Kamruzzaman A. B. M.** Finite element modeling of stress distributions and problems for multi-slice longwall mining in Bangladesh, with special reference to the Barapukuria coal mine, Int. J. Coal Geol., 2009, Vol. 78, No. 2. — P. 91 – 109.
9. **Najafi M.** Optimum design of longwall chain pillar in tabas coal mine, Shahrood University of Technology, MSc Thesis (in Persian), 2009.
10. **Vakili A., Albrecht J., and Gibson W.** Mine-scale numerical modelling of longwall operations, Underground Coal Operation Conf., University of Wollongong, 2010.

11. **Shabanimashcool M. and Li C. C.** Numerical modelling of longwall mining and stability analysis of the gates in a coal mine, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 2012, Vol. 51. — P. 24 – 34.
12. **Majdi A., Hassani F. P., and Nasiri M. Y.** Prediction of the height of destressed zone above the mined panel roof in longwall coal mining, Int. J. Coal Geol., 2012, Vol. 98. — P. 62 – 72.
13. **Jiang Y., Wang H., Xue S., Zhao Y., Zhu J., and Pang X.** Assessment and mitigation of coal bump risk during extraction of an island longwall panel, Int. J. Coal Geol., 2012, Vol. 95. — P. 20 – 33.
14. **Shabanimashcool M. and Li C. C.** A numerical study of stress changes in barrier pillars and a border area in a longwall coal mine, Int. J. Coal Geol., 2013, Vol. 106. — P. 39 – 47.
15. **Rezaei M., Hossaini M. F., and Majdi A.** Determination of longwall mining-induced stress using the strain energy method, Rock Mech. and Rock Eng., 2015, Vol. 48, No. 6. — P. 2421 – 2433.
16. **Najafi M., Shishebori A., and Gholamnejad J.** Numerical estimation of suitable distance between two adjacent panels' working faces in shortwall mining, Int. J. Geomech., 2016, 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000784 , 04016090.
17. **Meng Z., Shi X., and Li G.** Deformation, failure and permeability of coal-bearing strata during longwall mining, Eng. Geol., 2016, Vol. 208. — P. 69 – 80.
18. **Anon.** Tabas coal mine project basic design report-mining, 2005, Vol. 1. — P. 5.
19. **Badr S. A.** Numerical analysis of coal yield Pillars at deep longwall mines, Ph.D. Thesis, Department of Min. Eng. Colorado School of Mine, 2004. — 250 p.
20. **Saeedi G., Shahriar K., Rezai B., and Karpuz C.** Numerical modelling of out-of-seam dilution in longwall retreat mining, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 2010, Vol. 47. — P. 533 – 543.
21. **Salamon M. D. G.** Mechanism of caving in longwall coal mining, Paper in Rock Mechanics Contributions and Challenges: Proc. of the 31st U.S. Symp., Ed., by Hustrulid W. A. and Johnson G. A. 1990 (Denver, CO, June 18 – 20). A. A. Balkema. — P. 161 – 168.

Поступила в редакцию 18/I 2019
После доработки 18/I 2019
Принята к публикации 23/IX 2019