

## ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАСИВА В ОКРЕСТНОСТИ УГОЛЬНЫХ ЦЕЛИКОВ ПРИ ЗАТОПЛЕНИИ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА

к.т.н. Житленок Д.М. (ГК «Дзержинскуголь»)

*У статті виконана оцінка напружено - деформованого стану  
можливості руйнування вугільних ціликів залишених при веденні гірничих робіт  
випадку з затопленням і без затоплення шахт.*

## CHANGE OF THE INTENSE CONDITION ROCK MASS IN A VICINITY COAL IS WHOLE AT FLOODING THE PRODUCED SPACE

Zhitlyonok D.M.

*In clause the estimation is executed is intense - deformed condition and  
opportunity of destruction coal is whole of the mountain works, left at conducting, in a  
case with flooding and without flooding mines.*

Значительная группа шахт, которые попадают под реструктуризацию, обрабатывала крутые и крутонаклонные пласты. Это вызвано тем, что уровень механизации на таких шахтах существенно ниже, чем на шахтах, которые обрабатывают пологие и наклонные пласты. Давный фактор не позволяет обеспечить высокий уровень добычи полезного ископаемого.

Кроме того, углубление горных работ, ввиду особенностей технологии обработки крутых пластов, происходит значительно быстрее, чем на пологих пластах. К настоящему времени ряд шахт достиг отметки 800-1000 м и более. Проявления горного давления и высокая температура в выработках являются дополнительными и практически непреодолимыми при реальных затратах сдерживающими факторами для высокопроизводительной обработки крутых пластов на указанных глубинах.

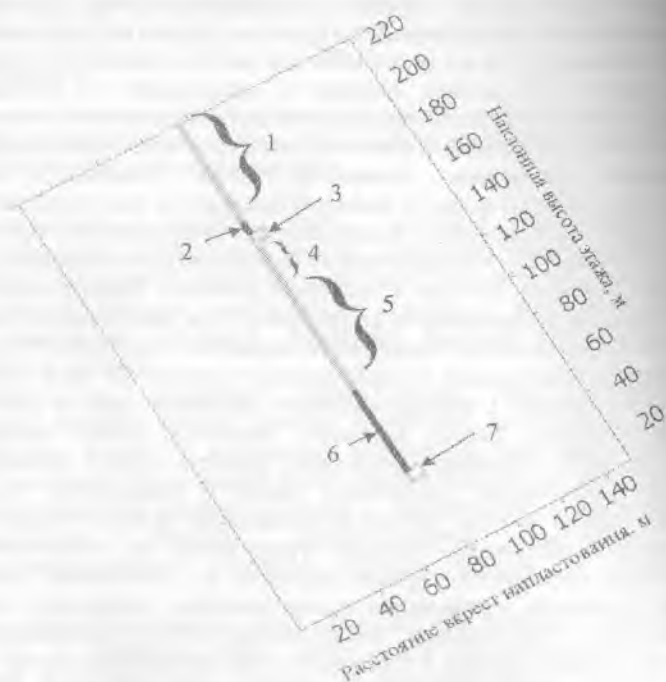
При закрытии угольных шахт возникает ряд сложных технических проблем [1]. В частности имеет место явная несимметричность зоны сдвижений при обработке крутых и крутонаклонных пластов. Это приводит к тому, что незначительные сдвигения в горном массиве в районе ведения горных работ практически полностью передаются на поверхность со стороны всячего крыла пласта [6,7]. К сожалению, исторически сложилось так, что населенные пункты основывались на выходах угольных пластов. Поэтому повсеместно имеют место случаи наличия застройки над всячим крылом крутого угольного пласта. В подобных условиях необходима оценка возможности активизации сдвижений горного массива в случае затопления шахты, и, возможно, в некотором отдаленном будущем.

Устойчивость угольных целиков является фактором, в значительной мере определяющим устойчивость состояния горного массива [3, 4]. Именно поэтому отдельной актуальной задачей является исследование устойчивости оставленных неизвлеченных запасов на пластах крутого и крутонаклонного падения в случае закрытия угольных шахт, в том числе и при условии их возможного затопления.

Поскольку выполнение экспериментальных исследований устойчивости угольных целиков сложно а в ряде случаев и невозможно [5], был использован метод математического моделирования методом конечных элементов. Метод конечных элементов (МКЭ) в последнее время получил довольно широкое распространение, что обусловлено наглядностью метода и его сравнительной простотой. Этот метод позволяет приближённо решать дифференциальные уравнения, описывающие различные физические процессы. Нашёл он применение и в горной геомеханике, где им пользуются для расчёта напряжений в массиве горных пород. Суть метода сводится к следующему: 1) исследуемая область разбивается на ряд неперекрывающихся подобластей (элементов), и 2) построение на каждой подобласти своей кусочной функции формы с применением различных выражений. Если подобласти имеют сравнительно простую форму и базисные функции на этих подобластях, то относительно просто, проводя аппроксимацию суммированием интегралов только по элементам, непосредственно примыкающим к границе, можно рассчитать значение функции в исходном элементе. Далее рассчитанное значение функции сравнивается с эталонным. При расхождении значений на значительную величину выполняется коррекция рассчитанной функции на величину расхождения и производится перерасчёт всей матрицы. Сходимость матрицы у метода конечных элементов одна из лучших из подобных методов (метод конечных разностей, метод дискретных элементов). МКЭ позволяет производить расчёты горного давления для сложных конфигураций выемочных полей с достаточной степенью точности. Исходя из того, что все рассмотренные методы обладают теми или иными недостатками, которые ограничивают их применение для определения проявлений горного давления в затопленной шахте, в качестве основного принимается метод конечных элементов, который позволяет без существенных материальных затрат проанализировать состояние горного массива в том числе и при затоплении шахты за счет корректировки данных о физико-механических свойствах пород.

Моделирование выполнялось для участка угольного пласта крутого падения, отрабатываемого щитовым агрегатом (моделирование выполнялось под методическим руководством к.т.н. Иванова И.Е.). Для моделирования угла падения  $60^\circ$  используется следующий технологический прием. Расчетная схема поворачивается на угол  $30^\circ$ . При этом граничные силы поворачиваются таким образом, чтобы они действовали вертикально, и обеспечивали эффект пригрузки модели вышележащей толщей.

Исходя из результатов анализа, полученных в предыдущем разделе принимается следующая расчетная схема, представленная на рис. 1. Глубина ведения работ 800 м. Наклонная высота этажа 120 м. Уголь извлекался щитовым агрегатом. Часть угольного пласта на вышележащем этаже извлечена. При этом над вентиляционным штреком оставлен угольный целик высотой 5 м. У вентиляционного штрека имеется зона свободно обрушенных пород. Ее размеры вниз по напластованию составляют 20 м. Ниже располагается зона, в которой в пределах пласта имеется породная подушка. Ее размеры составляют 60 м. Щитовой агрегат остановлен на расстоянии 40 м от откаточного штрека. Угольный пласт между агрегатом и откаточным штреком не извлечен.



**Рис.1.** Расчетная схема к определению напряженно-деформированного состояния горных пород при отработке пласта крутого залегания: 1 - выработанное пространство вышележащего этажа; 2 - целик над вентиляционным штреком; 3 - вентиляционный штрек; 4 - зона свободно обрушенных пород; 5 - зона породной подушки из обрушенных пород; 6 - целик над откаточным штреком; 7 - откаточный штрек.

Основные свойства вмещающих пород представлены в табл.1. Диапазоны свойств указаны для случаев сухих пород и размокших пород для расчета варианта с затоплением шахты. Наиболее характерным показателем изменения физико-механических свойств пород при их увлажнении в массиве оказался коэффициент Пуассона.

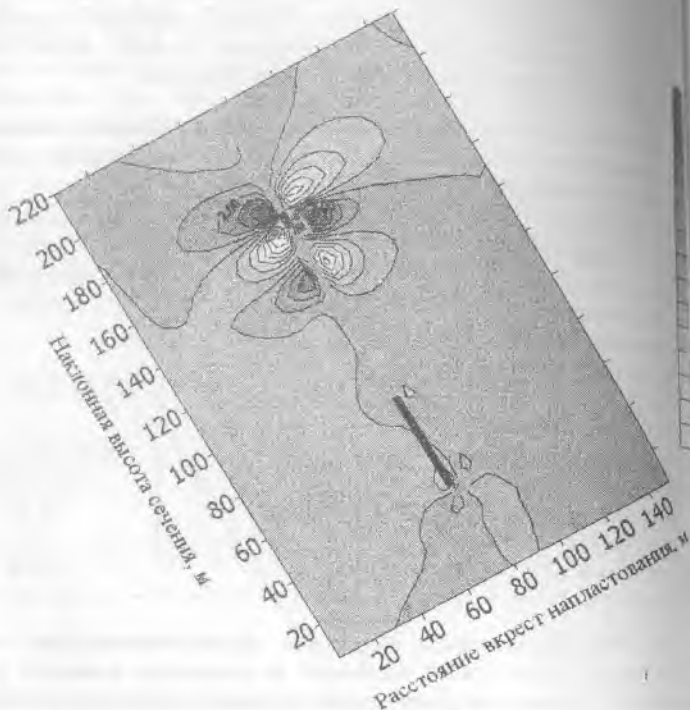
Таблица 1. Исходные данные при моделировании напряженно-деформированного состояния массива в окрестности частично извлеченного угольного крутопадающего пласта.

Параметр	Ед. изм.	Значение (интервал)
Глубина ведения работ	м	800
Расчетная область	м x м	220 x 160
Прочность на одноосное сжатие вмещающих пород	МПа	25-50
Модуль сдвига вмещающих пород	МПа	$(0,24-0,32) \times 10^4$
Модуль упругости	МПа	$(0,64-0,81) \times 10^4$
Коэффициент Пуассона	-	0,27-0,33
Угол внутреннего трения	градусы	42-55
Сцепление	-	1,5-2

За счет постепенного изменения физико-механических свойств горных пород от их сухого состояния до полностью влажного имеется возможность провести моделирование поэтапного изменения напряженно-деформированного состояния массива при различном уровне увлажнения пород. За ориентир степени увлажнения принят коэффициент Пуассона.

Первоначально произведен расчет напряженно-деформированного состояния для случая без затопления выработанного пространства. Коэффициент Пуассона для прилегающих к угольному пласту пород при данном варианте составил 0,27. На рис. 2 - 3 приведено распределение изолиний касательных напряжений и зон запредельных деформаций, полученные в результате расчетов. Следует отметить, что значения напряжений при отсутствии очистных работ составляют  $\approx 21,5$  МПа и  $\approx 24,4$  МПа на уровне вентиляционного и откаточного штреков соответственно.

Из распределения вертикальной компоненты напряжений можно видеть, что в горных породах в окрестности угольного пласта практически везде имеет место незначительное повышение горного давления, по сравнению с нетронутым массивом. Однако данное превышение незначительно и находится в пределах 10-20%. Исключения составляют места, в которых уголь извлечен, и места в кровле пласта над местом свободного обрушения пород и над породной подушкой. Здесь породы



**Рис.2.** Распределение изолиний касательных напряжений в МПа в окрестности остановленных горных работ при  $\mu = 0,27$ .

имеют возможность соответственно обрушения и плавного опускания под действием возникающих в массиве напряжений. В боках откаточного и вентиляционного штреков имеют место повышенные напряжения, которые составляют 26 и 28 МПа соответственно. Большие значения вертикальных напряжений у вентиляционного штрека объясняются наличием в его окрестности большего количества выработанных пространств (мест извлечения угля и породы). Поэтому нагрузка на оставшиеся элементы (в частности – части породного массива) увеличивается.

Места повышенных напряжений имеются в породах в боках целика, оставленного над вентиляционным штреком, и в месте перехода от зоны обрушенных пород к зоне породной подушки. Это означает, что в данных местах породы не имели возможности деформироваться под действием указанных напряжений и, соответственно, восстановить исходный фон напряжений. Максимальные значения в указанных местах составляют до 36 МПа.

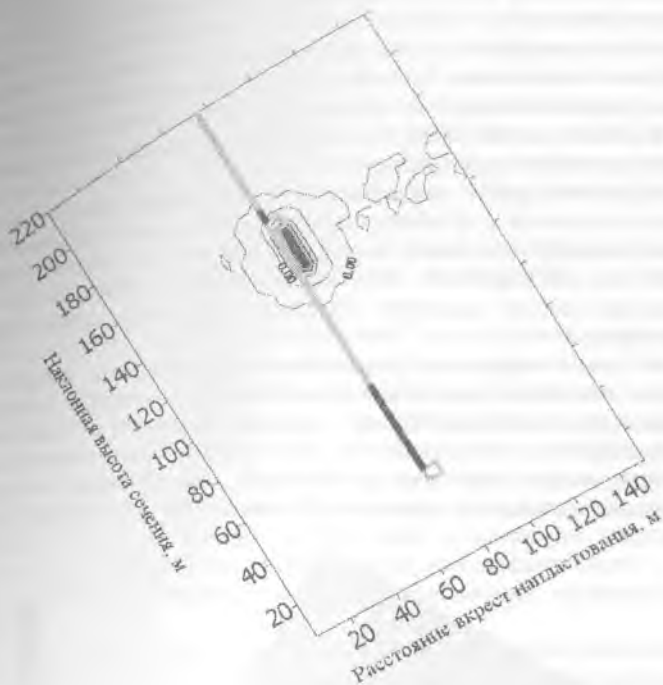


Рис.3. Распределение зон запредельных деформаций в окрестности остановленных горных работ при  $\mu = 0,27$ .

Наоборот, разгрузка от горизонтальных напряжений отмечается в породах в боках мест, где произведена выемка угля. Это означает, что породы в данных местах имели возможность деформироваться в образовавшиеся пустоты. При это наступила разгрузка массива.

Влияние, вносимое наличием штреков в массиве, незначительное, по сравнению с местами извлечения угля.

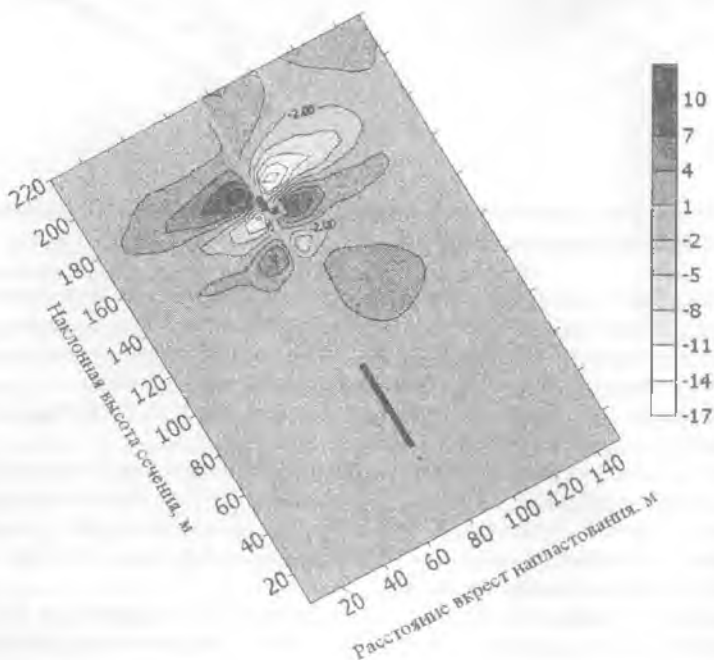
При анализе распределения касательной компоненты напряжений (рис. 2) можно видеть, что они возникают в окрестности образовавшихся в массиве пустот. В частности вокруг пустот от извлечения угля и вокруг штреков. Значения касательных напряжений достигают 5-6 МПа, что следует признать незначительным.

Распределение зон запредельных деформаций приведено на рис. 3. Определение зон, в которых породы перешли в запредельное состояние, производилось с помощью теории Кулона-Мора. Темным цветом выделены места, в которых породы перешли в запредельное состояние,

или, иными словами, разрушились. Можно видеть (рис. 3), что разрушения пород отмечены только в кровле пласта над местом, где извлечен уголь и не имеется породная подушка. Данный факт означает, что породы в данном месте обрушились. В месте над породной подушкой и над нижним целиком разрушений пород не произошло. Это означает, что деформации пород в данных местах были в пределах допустимых за счет упругости целика, и частично породной подушки.

Описанные выше качественные и количественные результаты хорошо согласуются с существующими представлениями о напряженно-деформированном состоянии пород в окрестности крутых угольных пластов при их отработке. Это свидетельствует в пользу того, что применяемая модель адекватно описывает процессы, происходящие в горном массиве.

На рис. 4 приведены результаты моделирования напряженного состояния массива по мере увеличения степени увлажнения пород. Этим моделировалось затопление шахты и реакция массива и его напряженно-деформированного состояния на постепенное увеличение степени увлажнения пород. Как уже упоминалось, за ориентир в процессе увлажнения был принят коэффициент Пуассона. Его значение изменялось



**Рис.4.** Распределение изолиний касательных напряжений в МПа в окрестности остановленных горных работ при  $\mu = 0,33$ .

дискретно от 0,27 до 0,33 с интервалом 0,02. Меньшее значение сопоставлялось с сухими породами и результаты моделирования при нем рассмотрены выше. Максимальное значение коэффициента Пуассона присуще не глинистым породам, которые имеют максимальную степень насыщенности влагой. Остальные параметры разлагались на своих интервалах значений, и их изменение принималось пропорционально изменению коэффициента Пуассона. Таким образом, всего было проведено моделирование на четырех этапах со значениями коэффициента Пуассона 0,27, 0,29, 0,31, 0,33.

Далее рассмотрим только количественные и качественные отличия результатов моделирования на 2 - 4 этапах по сравнению с исходным состоянием.

Качественная картина распределений вертикальной компоненты напряжений по мере увлажнения пород в целом сохраняется. При этом происходит увеличение по абсолютному значению напряжений у целиков и выработок. Особенно ярко это заметно у вентиляционного штрека. Так в его окрестности максимальные напряжения достигают 49 МПа, против 28 МПа при сухих породах. Промежуточные значения составляют 33 и 34 МПа. Таким образом, можно видеть, что при увеличении степени увлажнения пород увеличение вертикальной компоненты напряжений происходит неравномерно, и особенно заметно на последнем этапе.

У откаточного штрека изменений вертикальных напряжений не отмечается.

Можно видеть существенное различие в изменении напряженного состояния массива вокруг вентиляционного и откаточных штреков. В первом случае напряжения по мере возрастания увлажнения пород увеличились почти в два раза. Во втором не изменились. Такое различие может быть, предположительно, объяснено тем, что в окрестности вентиляционного штрека имеет место большее сложная конфигурация выработанных пространств, в частности значительно бо́льшая степень извлечения пород и угля. Это приводит к более интенсивному изменению напряженного состояния при изменении физико-механических свойств массива. Кроме того, при больших действующих напряжениях имеет место бо́льшая разрушенность массива (рис. 5). В этом случае нагрузка естественным образом перераспределяется на оставшиеся части массива. В качестве положительного момента следует отметить, что в окрестности целика у откаточного штрека и непосредственно вокруг самого штрека вертикальная компонента напряжений практически не изменяет своего значения. Это дает основание предполагать, что данная часть массива при увлажнении пород сохранит свою устойчивость.

При анализе горизонтальной компоненты напряжений при увлажнении пород можно видеть, что качественная картина также не претерпевает существенных изменений. Изменения происходят только в количественном отношении. Таким образом при увлажнении массива происходит общее увеличение горизонтальных напряжений. При сухих



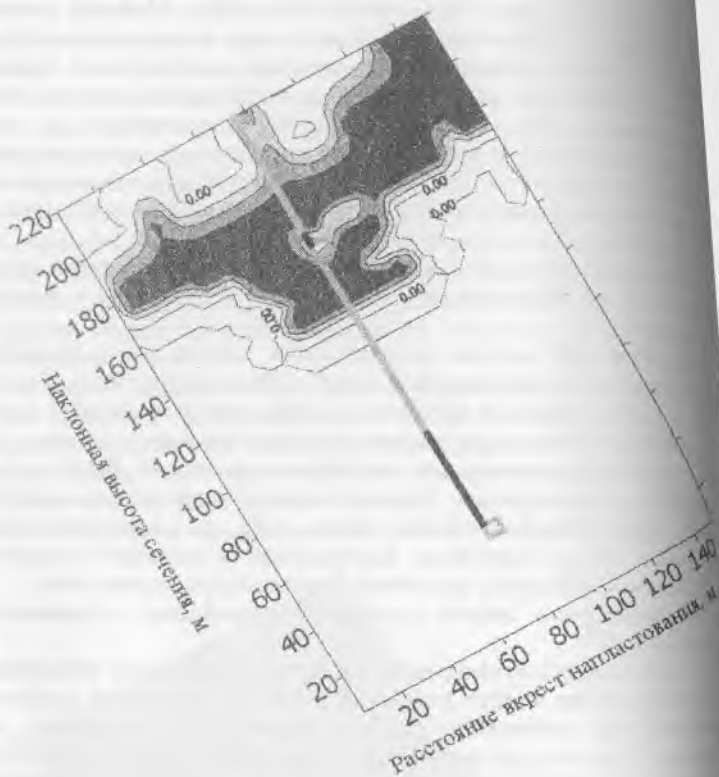


Рис.5. Распределение зон запредельных деформаций в окрестности остановленных горных работ при  $\mu = 0,33$ .

породах их фон на уровне откаточного штрека составляет  $\approx 16$  МПа. При полностью размокших  $\approx 20-21$  МПа.

Максимальные значения горизонтальных напряжений отмечаются в целике над вентиляционным штреком, где они достигают 58 МПа. Это соответствует концентрации  $\approx 1,6$ . Иными словами выработка, располагаемая на глубине 800 м, испытывает воздействие напряжений, которые соответствуют глубине почти 1300 м.

Следует отметить, что тенденция к изменению горизонтальной компоненты в значительной мере соответствует изменениям вертикальной компоненты напряжений. Так по мере увлажнения пород максимальный пророст напряжений отмечается только на последнем этапе изменения коэффициента Пуассона. На втором и третьем этапах расчета значения напряжений сопоставимы и составляют  $\approx 43$  МПа.

Максимальные значения касательных напряжений на первом этапе составляют 7,7 МПа, на втором 7,5 МПа, на третьем 16,3 МПа, на заключительном 16,1 МПа. Таким образом при увлажнении пород касательные напряжения увеличиваются. Однако это только общая зависимость. Имеют место случаи, когда при большей насыщенности пород водой касательные напряжения меньше, чем в случае с меньшей насыщенностью водой. Так на четвертом этапе они меньше чем на третьем примерно на 1,2%, на втором меньше чем на первом на 2,5%. Это объясняется тем, что имеет место изменение зон запредельных деформаций при размокании пород. В местах разрушения пород происходит разгрузка массива от напряжений. С другой стороны нагрузка перераспределяется на оставшиеся неразрушенными части массива. Хотя, еще раз отметим, общая тенденция – к увеличению касательных напряжений.

Определение зон запредельных деформаций производилось на основании теории Кулона-Мора программой автоматически. При этом учитывались значения всех действующих в массиве компонент напряженного состояния. Места, в которых в породах достигалось запредельное состояние, отмечались как разрушенные. При анализе распределений запредельных зон состояний (рис. 2 и 5) видно, что их площадь увеличивается по мере увеличения степени увлажнения пород. Это объясняется снижением прочностных характеристик вмещающих пород.

Первоначально разрушения пород отмечены только в области кровли пласта в месте, где не имеется породной подушки от обрушенных пород. Возможно, следовало ожидать разрушения пород в окрестности ранее отработанной части пласта. Но, очевидно, этого не произошло также из-за наличия в ее пределах породной подушки, что привело к уменьшению реальных смещений пород.

На втором этапе моделирования в запредельное состояние переходят уже породы в окрестности целика над вентиляционным штреком. Это объясняется тем, что именно в данном месте отмечаются одни из наибольших действующих напряжений. Естественно, что разрушения пород даже при незначительном уменьшении их прочностных свойств начались именно в данном месте.

На третьем этапе моделирования продолжилось развитие зоны разрушений. Направление развития вверх (в сторону ранее выработанного пространства), в кровлю и в почву пласта. Размеры зоны увеличились почти в два раза по сравнению со вторым этапом. Можно отметить, что в кровлю пласта зона запредельных деформаций развивается намного интенсивнее, чем в почву. Это вполне естественно, так как породы кровли в силу особенностей сдвига деформированы значительно сильнее. В почве пласта в запредельное состояние породы переходят в области, где отмечаются максимальные действующие напряжения.

На заключительном этапе моделирования, размеры зоны запредельных деформаций существенно увеличились. В первую очередь это объясняется увеличением действующих в массиве напряжений по сравнению с предыдущими этапами, что было отмечено при анализе покомпонентных распределений напряжений. Область, в которой породы перешли в запредельное состояние, теперь занимает практически всю верхнюю часть модели. При этом разрушения в кровле пласта несколько больше, чем разрушения в почве.

Следует выделить одну важную деталь. Все разрушения пород отмечаются только в пределах классического свода сдвижений, как в кровле пласта, так и в почве. Граница сводов находится у нижней границы зоны обрушенных пород над породной подушкой. Ее местоположение практически не изменяется по этапам моделирования. Таким образом, размокание пород, в случае затопления шахты, не приведет к существенным отклонениям от существующих схем сдвижений. Это означает, что все границы сдвижений, которые возникнут в случае затопления шахты, могут быть учтены существующими нормативными методиками. Особенностью будет являться большая нарушенность пород в пределах зон сдвижений. Также следует учитывать, что границей свода сдвижений является нижняя часть реально обрушенных пород.

Несмотря на то, что процесс увлажнения моделировался по всей площади модели, образования зон запредельных деформаций в районе откаточного штрека не отмечено. Это является положительным моментом с точки зрения сохранения устойчивости данной части массива.

Следует отметить, что отсутствие зона разрушений в окрестности откаточного штрека не означает, что они в данном месте отсутствуют совсем. Просто их размеры не превышают размеров дискретных элементов, которые приняты при моделировании, и составляющие для кровли и почвы пласта 5 м. Другими словами размеры зон запредельных деформаций вокруг штрека не превышают 5 м, в том числе и в случае моделирования полного увлажнения горных пород.

Таким образом, устойчивость массива в окрестности целика, оставленного над откаточным штреком при затоплении шахты сохраняется. Изменения в состоянии массива при затоплении шахты будут сводиться к увеличению размеров зон запредельных деформаций в пределах существующих зон сдвижений массива.

**В результате выполнения исследований получены следующие основные результаты.**

1. При оставлении угольного целика над откаточным штреком по мере увлажнения вмещающих пород происходит существенное изменение напряженно-деформированного состояния массива. Концентрации различных компонент напряженного состояния при увлажнении пород достигают 1,6-2,1 относительно ситуации с сухими породами.

2. Нижней границей зоны повышенных напряжений является область обрушенных пород над породной подушкой, расположенной выше щитового агрегата.

3. Изменение напряженного состояния происходит не в прямой зависимости от увлажнения пород, что объясняется тем, что в местах разрушения пород происходит разгрузка массива от напряжений. С другой стороны оставшаяся нагрузка перераспределяется на неразрушенные части массива.

4. По мере увеличения увлажнения пород происходит увеличение размеров зон запредельного состояния пород, что вызвано уменьшением их прочностных свойств.

5. Разрушения пород по мере их размокания отмечаются только в пределах классического свода сдвижений, как в кровле, так и в почве пласта.

6. Существенного увеличения значений напряжений и размеров зон запредельных деформаций (в пределах дискретности расчетной сетки) в районе откаточного штрека и целика над ним при затоплении не отмечено. Это позволяет сделать вывод об устойчивости данной части массива при увлажнении пород.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Решение геозкологических и социальных проблем при разработке и закрытии угольных шахт / Янукович В.Ф., Азаров Н.Я., Алексеев А.Д., Анцифиров А.В., Питаленко Е.И. - Донецк ООО «Алан», 2002. - 480с.
2. Методика исследования горного давления в угольных шахтах. - Л.: ВНИМИ, 1973. - С. 43.
3. Аверин Г.Н. Обоснование и разработка технологии охраны основных пластовых подготовительных выработок с применением спаренных податливых целиков: Дис... канд. техн. наук: 05.15.02. - Коммунарск, 1992. - 165 с.
4. Методические указания по применению глубинных реперов для изучения напряжённо-деформированного состояния массива горных пород. - Л.: ВНИМИ. - 1983. - 98 с.
5. Моделирование проявлений горного давления / Кузнецов Г.Н., Будько М.Н., Васильев Ю.И. и др. - Л.: Недра. 1968. - 280 с.
6. Черняев В.И. Расчет напряжений и смещений пород при разработке свиты пластов - Киев: Техника, 1987. - 148с.
7. Земисев В.Н. Принципы расчета вероятных сдвижений и деформаций земной поверхности под влиянием подземных горных разработок / Труды ВНИМИ «Сдвигание горных пород» - Л.: - 1978.- № 108. - С.40-48.