

УДК 622.838.51:622.831.3

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА В ОКРЕСТНОСТИ УГОЛЬНЫХ ЦЕЛИКОВ ПРИ ЗАТОПЛЕНИИ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА

Васютина В. В.

(УкрНИИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина)

У статті виконана оцінка напружено-деформованого стану і можливості руйнування вугільних ціликів залишених під час ведення гірничих робіт у випадку із затопленням і без затоплення шахт.

Evaluation of stress-deformed state and possibility for failure of coal pillars established during mining in case of flooding/non-flooding of a mine is made in the paper.

В процессе реструктуризации угольной промышленности Украины законсервировано более 100 угольных шахт, эксплуатация которых в современных условиях является нерентабельной. Вместе с тем отсутствует необходимый опыт, по оценке влияния возникающих при этом процессов, на изменение гидрогеологической обстановки в горном массиве и его геомеханического состояния. Наиболее сложно эти процессы протекают при крутонаклонном и крутом залегании угольных пластов, а значительная группа шахт Центрального района Донбасса, которые попадают под реструктуризацию, имеют именно эти горногеологические условия. Поэтому исследование геомеханических процессов, происходящих в горном массиве при увлажнении, является актуальной задачей [1].

Не разработано надежных способов прогнозирования гидрогеологических и геомеханических процессов в горных массивах и на поверхности, что при наличии соседних действующих уголь-

ных предприятий и большой плотности застройки поверхности могут привести к возникновению аварийных ситуаций: заболачиванию территорий, изменению режимов поверхностных водотоков, опасных деформаций зданий и сооружений и т.д.

При закрытии угольных шахт возникает ряд сложных технических проблем. В частности, при отработке крутых пластов щитовыми агрегатами в верхней части полосы под угольным целиком образуется своеобразный купол, размерами до 20-30 м и в высоту до 6-8 мощностей отрабатываемого пласта. В результате обрушения и перемещения вниз за щитовым агрегатом образуется породная подушка, играющая роль своеобразной дополнительной крепи. При «мокрой» консервации происходит увлажнение горных пород, изменяются их физико-механические свойства, а развитие геомеханических процессов при этом изучены недостаточно [1].

На крутом залегании пород сдвигания земной поверхности в значительной степени зависят от неоднородности массива. Они наблюдаются по напластованиям на небольшом удалении в лежачем боку пласта [2].

Исторически сложилось так, что населенные пункты основывались на выходах угольных пластов и в этих условиях необходимо оценить возможности активизации сдвижений горного массива в случае затопления [1, 2].

Устойчивость угольных целиков является фактором, в значительной мере определяющим устойчивость состояния горного массива [3]. Именно поэтому одной из важных задач является исследование устойчивости барьерных целиков на пластах крутого и крутонаклонного падения в случае закрытия угольных шахт при условии их затопления.

Поскольку выполнение экспериментальных исследований устойчивости угольных целиков в результате затопления выработанного пространства выполнить не представляется возможным, было использовано математическое компьютерное моделирование, задачей которого было изучение особенностей развития напряженно – деформированного состояния в окрестности барьерного целика при щитовой отработке крутопадающих угольных пластов до затопления и после него.

Рассмотрим наиболее типичные условия для шахт Центрального района Донбасса, разрабатывавших крутые пласты механизированным способом отработки и в процессе реструктуризации поставленные на «мокрую» консервацию.

Для решения задачи был применен метод конечных элементов (МКЭ), который наиболее часто используется при выполнении такого вида статических задач, что обусловлено его наглядностью и сравнительной простотой. Он позволяет приближённо решать дифференциальные уравнения, описывающие различные физические процессы, а в геомеханике, используются для расчёта напряжений в массиве горных пород.

Исходя из результатов проведенного анализа для математического моделирования, использовались необходимые величины, характеризующие упругие свойства материала и показатели характеристик деформационных свойств (модуль Юнга и коэффициент Пуассона), которые могут влиять на физические характеристики горных пород до увлажнения и после него. Также в математическую модель были введены данные значений напряженно-деформированного состояния массива, в окрестности частично извлеченного угольного крутопадающего пласта для сухих и увлажненных пород в усредненных показателях для всего литологического состава пород горного массива таблица 1.

Приведем краткое описание методики моделирования. Процесс решения задач механики твердого тела (а также задач общей теории поля) по (МКЭ) состоит из следующих этапов:

- дискретизация континуума путем деления на конечные элементы;
- введение интерполяционных функций, то есть аппроксимация переменных поля внутри одного конечного элемента через значения переменных в выбранных опорных точках (узлах элемента);
- вывод уравнений для каждого элемента;
- объединение уравнений элементов в единую систему для всего рассматриваемого континуума;
- решение этой общей системы уравнений;
- вычисление искомых величин поля.

Таблица 1

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

Параметр, ед изм.	Значение (усредненное)	
	<i>сухое состояние</i>	<i>увлажненное состояние</i>
Прочность на одноосное сжатие вмещающих пород, МПа	25	60
Модуль сдвига вмещающих пород, МПа	$0,24 \times 10^4$	$0,32 \times 10^4$
Модуль упругости, ГПа	2	1,6
Коэффициент Пуассона, μ	0,27	0,33
Угол внутреннего трения, β градусы	20	25
Сцепление, c КПа	10	20

Вывод уравнений для конечных элементов и их объединение в систему уравнений, описывающих континуум, можно осуществить различными способами. В данной работе использовалась программа ANSYS, это универсальная программная система конечно-элементного (КЭ) анализа [4].

При исследовании напряженно-деформированного состояния пород в окрестности, моделируемого выработанного пространства рассматривалась невесомая плоскость с полостями в центре, эквивалентными различным пустотам в массиве – лавы, выработки, выработанные пространства (рис. 1). Для примера показана одиночная выработка арочного сечения. К внешнему контуру данной плоскости приложены нагрузки, которые соответствуют напряжениям в массиве (в частности эквивалент вышележащей толщи): вертикальные γH и горизонтальные $\lambda \gamma H$; H - глубина заложения выработки, м; γ – объемный вес пород, кН/м^3 ; λ – коэффициент бокового распора пород. Размер рассматриваемой области выбирался из соображений исключения влияния границ расчетной области на картину перераспределения напряжений в окрестности выработанного пространства. Для каждого сечения он индивидуален и зависит от принятого масштаба.

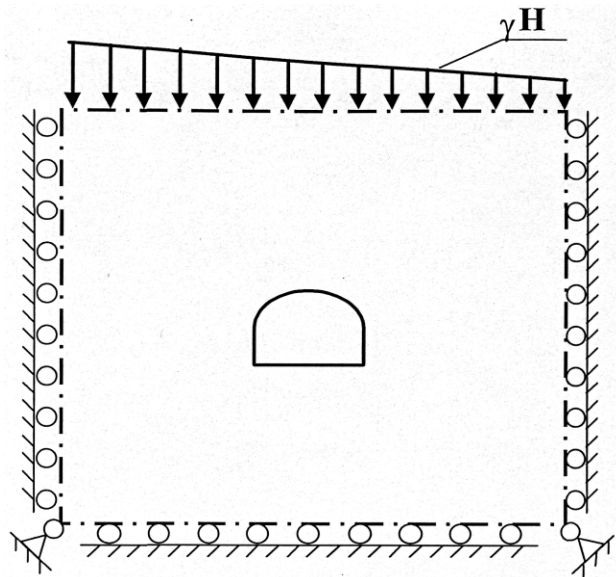


Рис. 1. Расчетная схема для численного моделирования методом конечных элементов (на примере одиночной выработки)

Дискретизация континуума путем разделения на конечные элементы осуществлялась с одной особенностью, а именно – часть массива горных пород, примыкающую к выработке, из-за криволинейных очертаний последней разбивали на треугольные конечные элементы. При этом основная часть массива разбивалась на конечные элементы прямоугольной формы. Общее количество конечных элементов составило 1740.

Сформировали матрицу жесткости всей системы из коэффициентов матриц жесткости отдельных элементов:

$$K_{ij} = \sum_{m=1}^N (k_{ij})_m, \quad (1)$$

где N – число элементов;

k_{ij} – матрица жесткости m - элемента.

Решается систему уравнений элементов вида:

$$\{P\} = [K]\{q\}, \quad (2)$$

где $\{P\}$ – вектор-столбец узловых сил, эквивалентных внешней нагрузке;

$\{q\}$ – вектор-столбец узловых перемещений элементов;

[K] – матрица жесткости системы.

Система решалась методом исключения Гаусса. При этом для каждого элемента формировали вектор перемещений узлов, вычисляли матрицу сил и внутренние усилия. Каждый узел треугольного конечного элемента имеет две степени свободы, а именно – линейные перемещения по осям x и z , которые аппроксимируются линейными полиномами, что обеспечивает условие совместности деформаций как внутри, так и по контуру элемента:

$$U = f_1 + f_2x + f_3z, \quad (3)$$

$$V = f_4 + f_5x + f_6z, \quad (4)$$

где f_1, f_2, \dots, f_6 - независимые параметры, определяющие перемещения.

Линейные перемещения по осям x и z определяли через функцию напряжений:

$$\varphi = f_1x^3 + f_2x^2 + f_3xz + f_4z^2 + f_5z^3. \quad (5)$$

Такое представление обуславливает линейное распределение нормальных и постоянство касательных напряжений по области прямоугольника:

$$\sigma_x = \frac{d^2\varphi}{dz^2} = 6f_5z + 2f_4, \quad (6)$$

$$\sigma_x = \frac{d^2\varphi}{dx^2} = 6f_1x + 2f_2, \quad (7)$$

$$t_x = -\frac{d^2\varphi}{dxdz} = -f_3. \quad (8)$$

Перемещение узлов при этом аппроксимируется следующими полиномами:

$$U = \frac{1}{E}(-3\nu f_1x^2 - 3f_1z^2 + 6f_5xz + 2f_4x - 2\nu f_2x + \mu f_7z - \mu f_3z + \mu f), \quad (9)$$

$$V = -\frac{1}{E}(-3f_5\chi^2 - 3f_5\nu z^2 + 6f_1xz - \mu f_3x + 2f_2z^2 - 2f_4\nu z - \nu f_6) \quad (10)$$

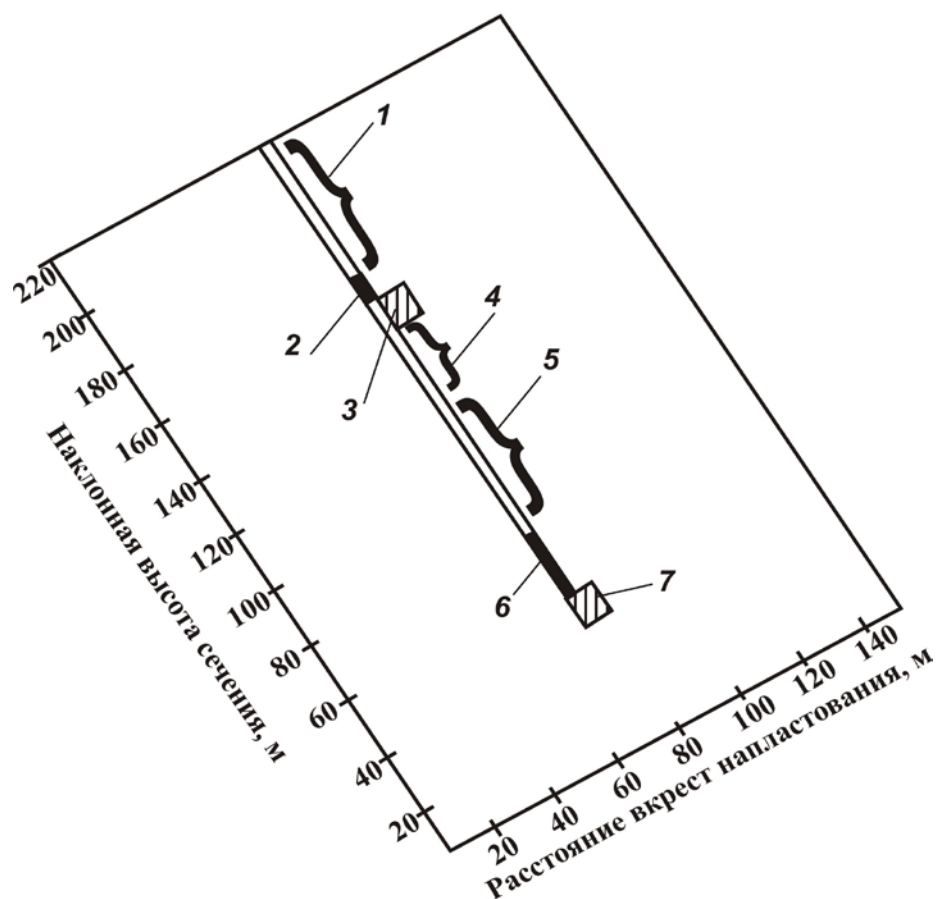
где μ – параметр, связанный с коэффициентом Пуассона ν зависимостью $\mu = 1 + \nu$.

Моделирование выполнялось для участка угольного пласта крутого падения, обрабатываемого щитовым агрегатом. Глубина ведения работ 800 м. Расчетная область 220×160 м. Наклонная высота этажа 120 м. Для учета угла падения 60° используется следующий технологический прием. Расчетная схема поворачивается на угол 30° . При этом граничные силы поворачиваются таким образом, чтобы они действовали вертикально, и обеспечивали эффект пригрузки модели вышележащей толщи, на основе чего строится следующая расчетная схема (рис. 2).

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.

При введении в математическую модель параметров изменения физико-механических свойств горных пород (коэффициент Пуассона и модуля упругости) для сухих и увлажненных горных пород, возможно, провести моделирование изменения напряженно-деформированного состояния массива в окрестности барьерного целика.

Первоначально произведен расчет напряженно-деформированного состояния для случая без затопления выработанного пространства. Введены коэффициенты для прилегающих к угольному пласту пород в сухом состоянии. На рисунках 3 - 4 приведено распределение изолиний касательных напряжений и зон запредельных деформаций, при моделировании исследуемого процесса до увлажнения.



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.

Рис. 2. Расчетная схема к определению напряженно-деформированного состояния горных пород при отработке пласта крутого залегания

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.

В горных породах в окрестности угольного пласта практически везде имеет место незначительное повышение горного дав-

ления, по сравнению с нетронутым массивом. Однако данное превышение незначительно и находится в пределах 10 – 20 %.

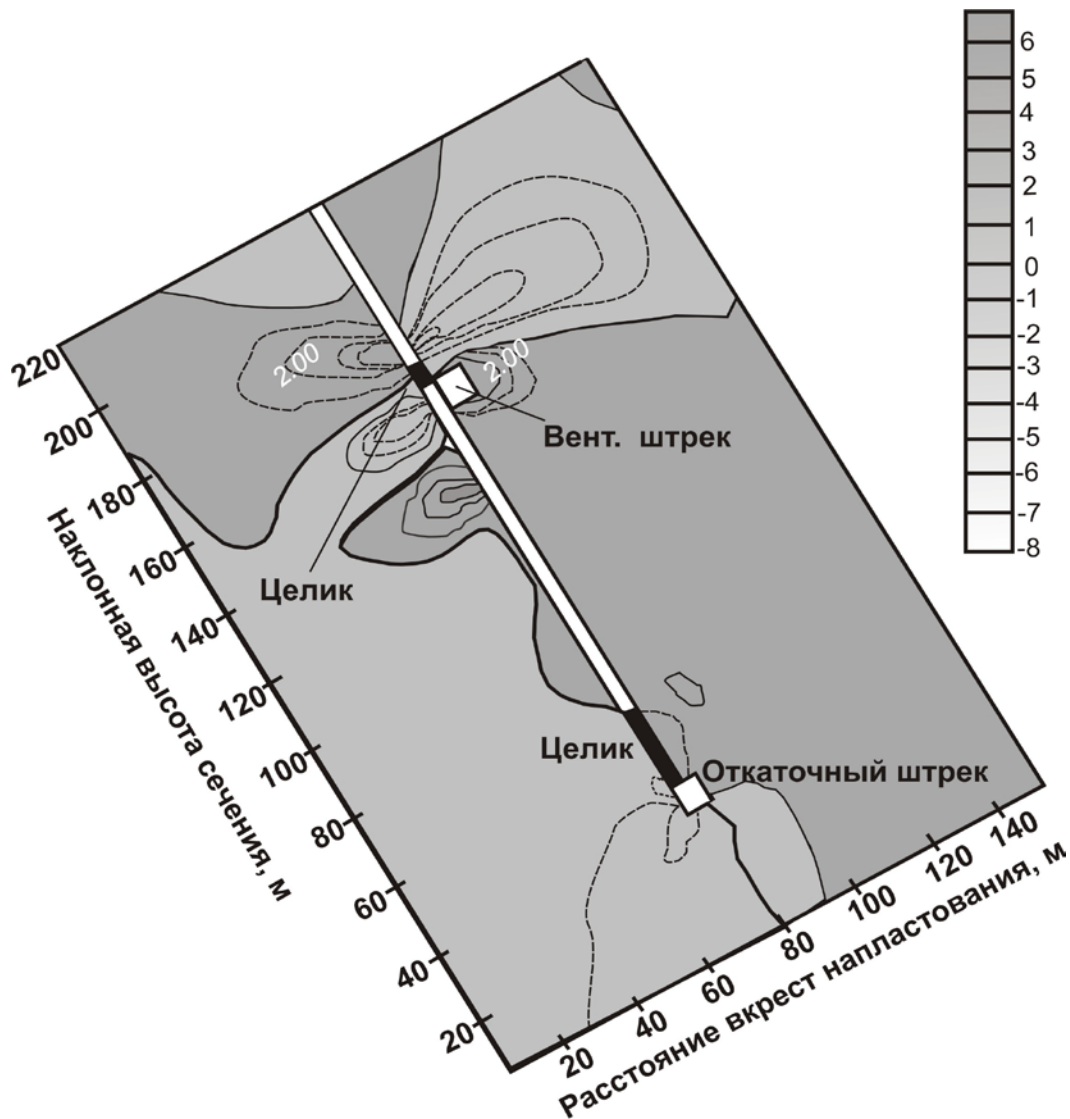


Рис. 3. Распределение изолиний касательных напряжений, в окрестности остановленных горных работ до увлажнения

Исключения составляют места, в которых уголь извлечен, и места в кровле пласта над местом свободного обрушения пород и над породной подушкой. Здесь породы имеют возможность соответственно обрушения и плавного опускания под действием возникающих в массиве напряжений.

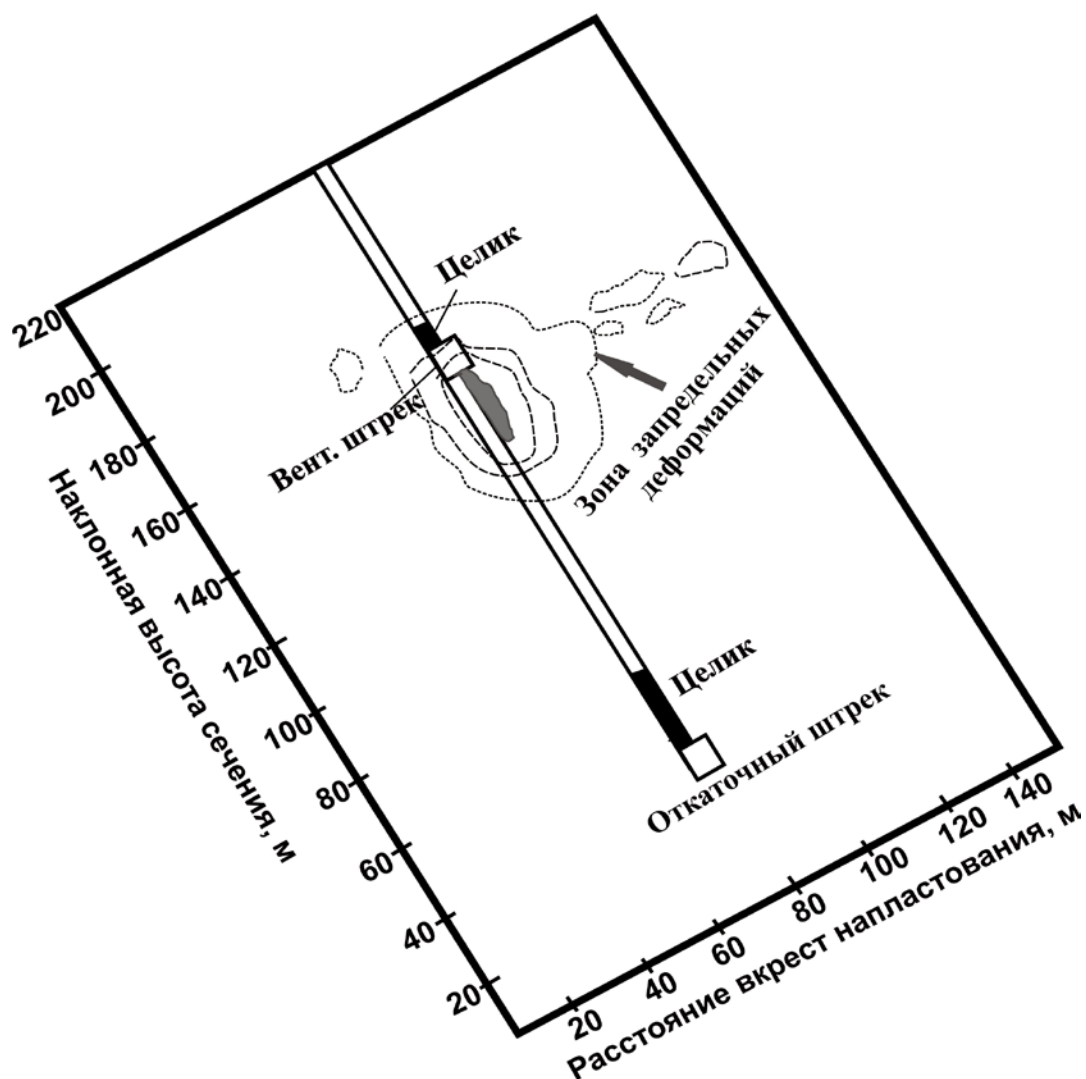


Рис. 4. Распределение зон запредельных деформаций, в окрестности остановленных горных работ до увлажнения

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.

Максимальные значения в указанных местах составляют до 36 МПа.

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 этом, наступила разгрузка массива.

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

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. 4), что разрушения пород отмечены только в кровле пласта над местом, где извлечен уголь и нет породной подушки. В промежутке 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.

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 рисунке 5 приведены результаты моделирования напряженного состояния массива после увлажнения пород. При моделировании процесса затопления выработанного пространства рассматривалась реакция массива и его напряженно-деформированное состояние при увеличении степени увлажнения пород. В процессе увлажнения значение коэффициента Пуассона изменялись дискретно от (сухих - 0,27 до влажных - 0,33). Максимальное значение коэффициента Пуассона присуще глинистым породам, которые имеют максимальную степень насыщенности влагой. Модуль упругости при этом соответственно уменьшался. Рассматривалась система перехода разрушения от жесткого, хрупкого до более пластичного состояния.

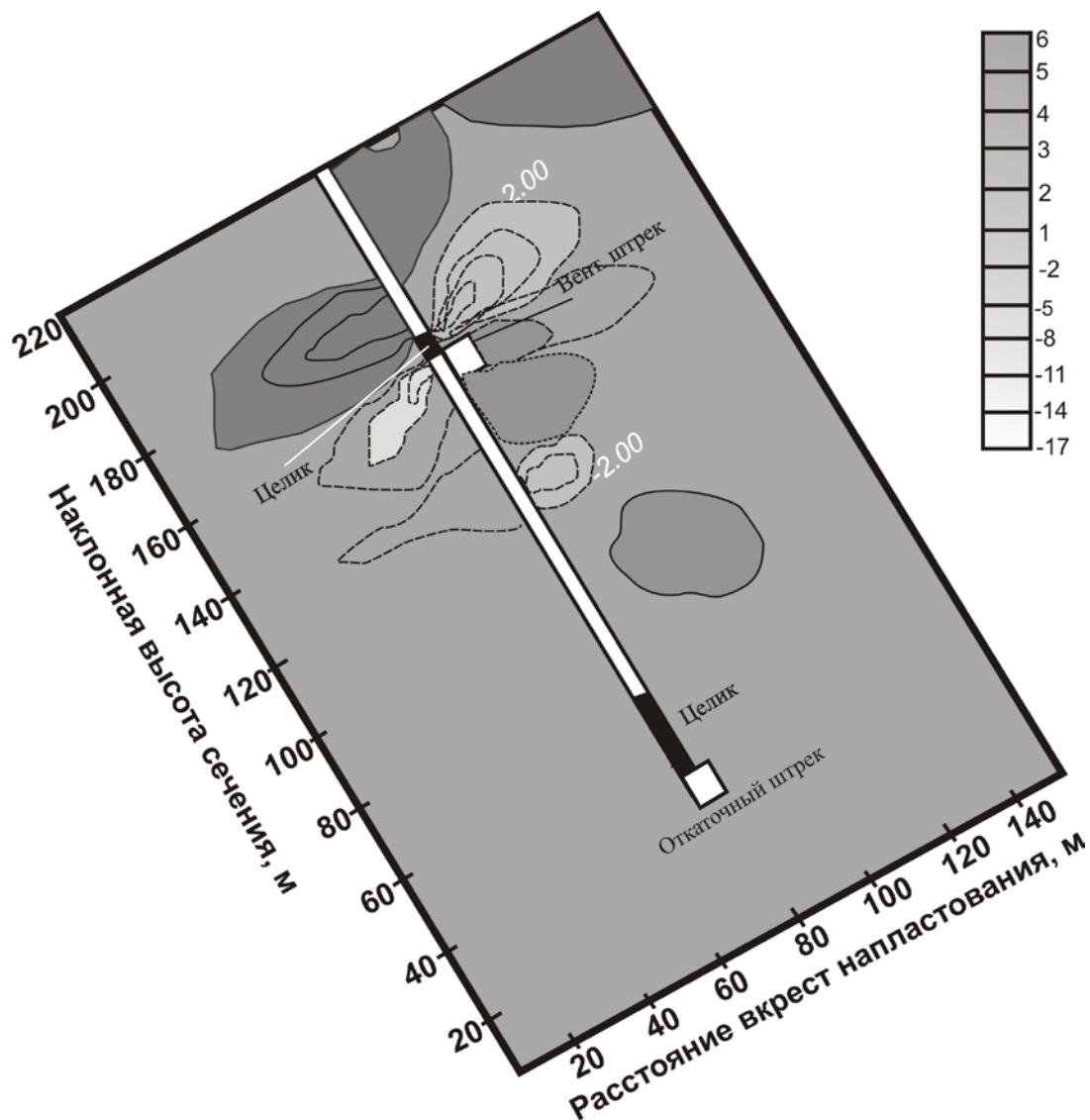


Рис. 5. Распределение изолиний касательных напряжений в окрестности, остановленных горных работ после увлажнения пород

Далее анализируем только количественные и качественные отличия результатов моделирования на этапах исходного состояния и конечного.

Качественная картина распределений вертикальной компоненты напряжений по мере увлажнения пород в целом сохраняется. При этом происходит увеличение значений напряжений у целиков и выработок. При увеличении степени увлажнения пород увеличение вертикальной компоненты напряжений происходит неравномерно, и особенно это заметно при увлажнении пород.

Наблюдается изменение напряженного состояния массива вокруг вентиляционного и откаточных штреков, а именно по мере возрастания увлажнения пород оно увеличилось почти в два раза. Это может быть объяснено тем, что в окрестности вентиляционного штрека имеет место более сложная конфигурация выработанных пространств, в частности значительно бóльшая 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 бóльшая разрушенность массива (рис. б).

Темным цветом выделены места, в которых породы перешли в запредельное состояние или иными словами разрушились.

В качестве положительного момента можно сказать, 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.

Следует отметить, что тенденция к изменению горизонтальной компоненты в значительной мере соответствует изменениям вертикальной компоненты напряжений. Так по мере увлажнения пород максимальное увеличение напряжений отмечается только на этапе увлажнения.

Максимальные значения касательных напряжений при сухих породах составляют 7,7 МПа, а при увлажненных 16,1 МПа. Таким образом, при увлажнении пород касательные напряжения увеличиваются. Однако это только общая зависимость. С другой стороны нагрузка перераспределяется на оставшиеся неразрушенными части массива.

Определение зон запредельных деформаций производилось на основании теории Кулона-Мора программой моделирования автоматически. При этом учитывались значения всех действующих в массиве компонент напряженного состояния. Места, в которых в породах достигалось запредельное состояние, отмечались как разрушенные.

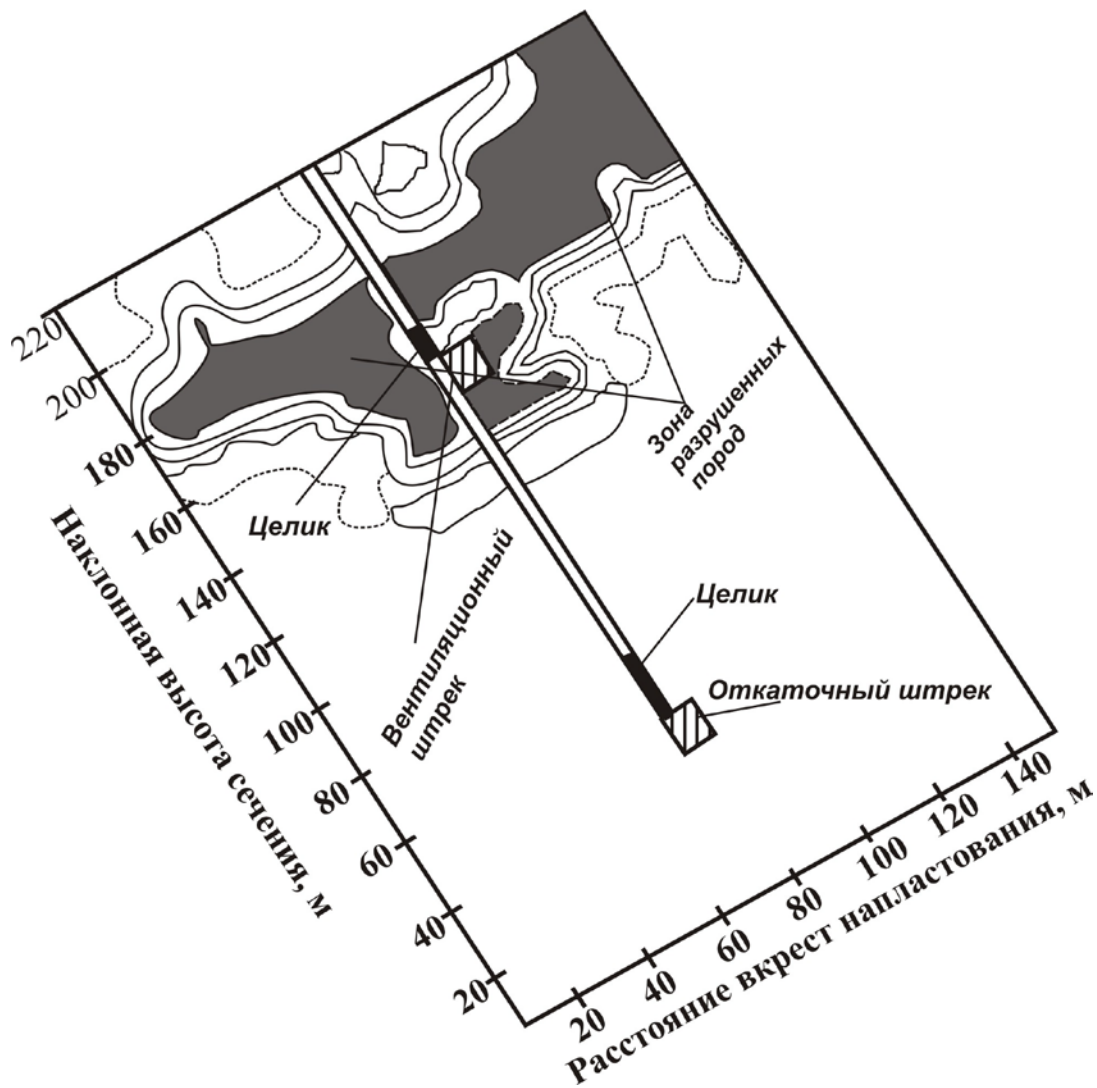


Рис. 6. Распределение зон запредельных деформаций, в окрестности остановленных горных работ после увлажнения

При анализе распределений запредельных зон состояний (рис. 4 и 6) видно, что их площадь увеличивается по мере увеличения степени увлажнения пород. Это объясняется снижением прочностных характеристик вмещающих пород [5].

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. В дальнейшем 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.

В процессе моделирования наблюдалось продолжение развития зоны разрушений 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 сдвижения деформированы значительно сильнее [6]. В почве пласта в запредельное состояние породы переходят в области, где отмечаются максимальные действующие напряжения.

На заключительном этапе моделирования, т.е. в увлажненном состоянии, 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 [6]. Это означает, что все границы сдвижений, которые возникнут в случае затопления шахты, могут быть учтены уже существующими нормативными методиками [7]. 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 зоны 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 как размеры зон запредельных деформаций вокруг штрека, как до увлажнения, так и после него.

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.

Выводы.

1. При оставлении угольного целика над откаточным штреком по мере увлажнения вмещающих пород происходит существенное изменение напряженно-деформированного состояния массива.

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

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

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

СПИСОК ССЫЛОК

1. Решение геоэкологических и социальных проблем при разработке и закрытии угольных шахт [Текст] моногр. / В. Ф. Янукович, Н. Я. Азаров, А. Д. Алексеев, А. В. Анциферов, Е. И. Питаленко - Донецк: ООО «Алан» – 2002. – 480 с.
2. Гавриленко Ю. Н. Техногенные последствия закрытия угольных шахт Украины [Текст] моногр. / Ю. Н. Гавриленко, В. Н. Ермаков, Ю. Ф. Кренида, О. А. Улицкий, В. А. Дрибан - Донецк: «НОРД-ПРЕС» – 2004. – 631 с.
3. Методика исследования горного давления в угольных шахтах [Текст]. – Л.: ВНИМИ, 1973. – 43 с.
4. Каплун А. Б. ANSYS в руках инженера. Практическое руководство [Текст] / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева М.: Едиториал. УРСС, 2003. - 272 с.
5. Черняев В.И. Расчет напряжений и смещений пород при разработке свиты пластов [Текст] / В. И. Черняев – Киев: Техника, 1987. – 148 с.
6. Принципы расчета вероятных сдвижений и деформаций земной поверхности под влиянием подземных горных разработок [Текст] / В. Н Земисев. // Труды ВНИМИ «Сдвижение горных пород» – Л.: – 1978. – № 108. – С. 40 – 48.
7. Правила підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом: ГСТУ 101.00159226.001 – 2003: Затв. Мінпалиенерго України 28.11.2003. – Київ, 2004. – 128 с.