

*Болотов А.П.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРВИЧНОЙ ПОСАДКИ ТРУДНООБРУШАЕМОЙ КРОВЛИ В ЛАВЕ ПРИ ПОЭТАПНОМ РАЗВОРОТЕ ЛИНИИ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ

Проведені дослідження напружено-деформованого стану методом математичного моделювання важкообвалюваного масиву при розвороті лінії очисного вибою в усереднених умовах антрацитових шахт. Установлені контури зон поетапного руйнування безпосередньої й основної покрівлі й величин максимальних опускань останньої в межах оголеного виробленого простору.

Ключові слова: *важкообвалюваний масив, вугільний пласт, лава, математичне моделювання, опускання, руйнування.*

Проведены исследования напряженно-деформированного состояния методом математического моделирования труднообрушаемого массива при развороте линии очистного забоя в усредненных условиях антрацитовых шахт. Установлены контуры зон поэтапного разрушения непосредственной и основной кровли и величины максимальных опусканий последней в пределах обнаженного выработанного пространства.

Ключевые слова: *труднообрушаемый массив, угольный пласт, лава, математическое моделирование, опускание, разрушение.*

Выемка комплексно-механизированными лавами пластов с труднообрушаемой кровлей, особенно до её первичной посадки, даже при использовании крепей повышенного сопротивления, не всегда обеспечивает устойчивое управление этим динамическим проявлением горного давления. Повышение интенсивности смещений пород, сопровождаемое увеличением нагрузки на крепь, не исключает посадку её секций на «жесткую базу», вывалообразование кровли в пределах призабойного пространства, завалы лав, а также воздушные удары [1, 2]. Типовыми проектами отхода механизированных комплексов от монтажных камер предусматриваются схемы подвигания линий очистного забоя параллельно кромки краевой части оставленного угольного массива. При этом первичная посадка обнаженного массива кровли с шагом, величина которого зависит от категории её обрушаемости, происходит одновременно по всей длине лавы.

Одним из способов локализации негативных проявлений горного давления в лаве до первичной посадки труднообрушаемой кровли является предварительный разворот линии очистного забоя при отходе лавы от монтажной камеры [3]. Поскольку механизм и параметрические характеристики опусканий кровли при попеременно-диагональном обнажении её массива не изучены, исследования рассматриваемого вопроса носят актуальный характер.

Цель работы – на базе усредненных исходных характеристик обнажаемого массива труднообрушаемой кровли разработать математическую модель для определения напряженно-деформированного состояния и опусканий слагающих его пород при поэтапном развороте линии очистного забоя от монтажной камеры.

Сформулированы следующие задачи:

разработать математическую модель напряженно-деформированного состояния массива труднообрушаемой кровли с применением метода конечных элементов при развороте линии очистного забоя на различных участках по длине лавы;

установить особенности формирования зон разрушения обнажаемого труднообрушаемого слоя кровли, характера и величин его опусканий для условий разработки антрацитовых пластов глубокими шахтами Украинского Донбасса.

При моделировании учитывались следующие условия: глубина заложения выработок $H = 1000$ м, мощность горизонтального пласта $m = 1,0$ м; непосредственная кровля (первый слой) – глинистый сланец мощностью 3,5 м прочностью на одноосное сжатие 50 МПа, труднообрушаемый (второй слой) – песчаник (8,0 м; 90 МПа); объемный вес пород и угля соответственно 2,7 и 1,6 кН/м³. Поскольку в рассматриваемых условиях средние значения длины лавы составляют 200 м и шаг первичной посадки – 80 м, то эти величины, исходя из построения модели, принимаются близкими к последним соответственно $l_y = 201,6$ м и $l_x = 78,4$ м.

Моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) массива в окрестности лавы осуществлялось методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программного комплекса «ЛИРА». При расчете применялась объёмно-деформированная модель в нелинейной постановке, с использованием объёмных конечных элементов (КЭ) типа № 236 [4]. При расчете моделируемого массива под действием собственного веса размеры его должны превышать область влияния очистных работ. При этом форма исследуемой области выбрана в виде параллелепипеда [5]. Для определения размеров расчетной схемы (рисунок 1), включающие область влияния очистных работ, учитывались: ψ_1 , ψ_2 и ψ_3 – углы полных сдвижений массива по контурам, ограничиваю-

щим исследуемый участок; δ_0 – граничный угол его сдвижения по подвиганию линии очистного забоя.

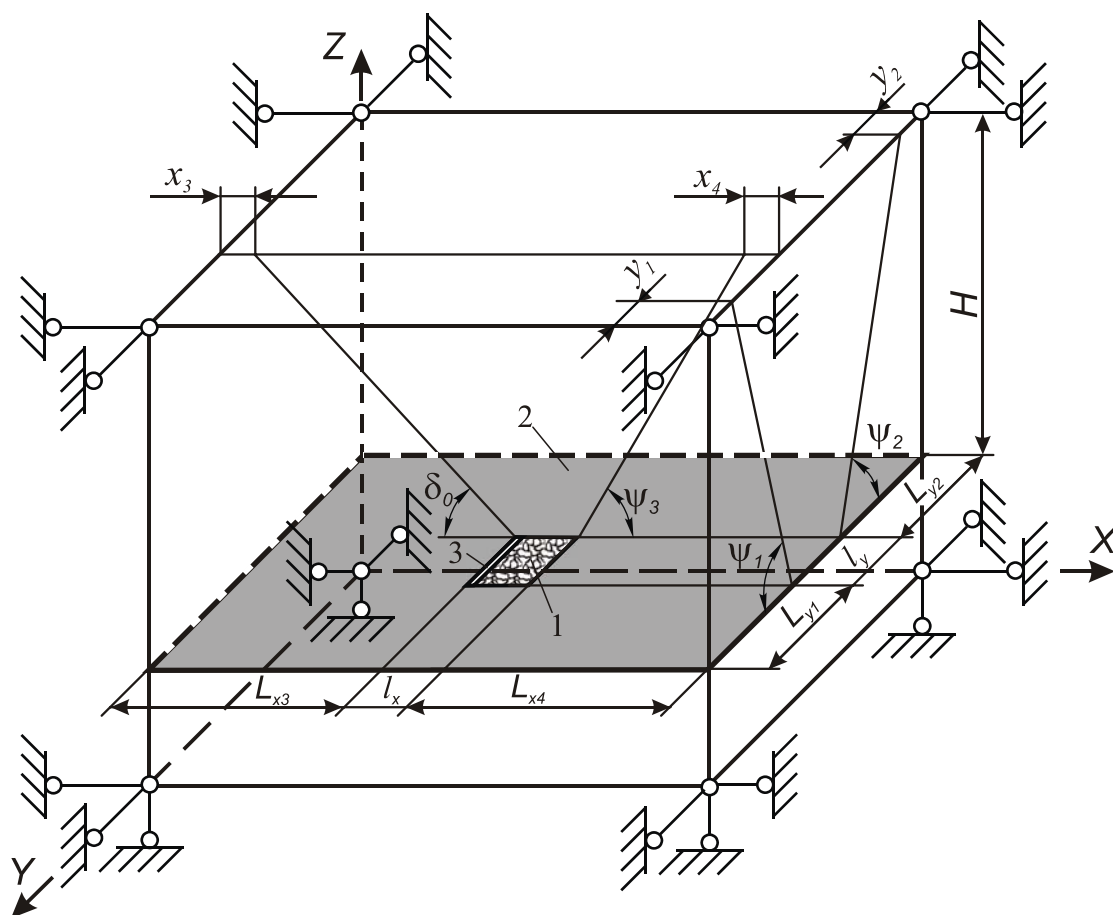


Рисунок 1 – Схема объёмной модели НДС разрабатываемого породугольного массива МКЭ: **1** – выработанное пространство исследуемого участка; **2** – угольный пласт; **3** – очистная выработка

При решении задачи определение размеров исследуемой области породного массива вокруг длинной очистной выработки осуществляется по формулам [5]:

$$L_{y1} = (H + l_y/2 \sin\alpha) \operatorname{ctg}(\psi_1 - \alpha) + y_1, \text{ м}; \quad (1)$$

$$L_{y2} = (H - l_y/2 \sin\alpha) \operatorname{ctg}(\psi_2 + \alpha) + y_2, \text{ м}; \quad (2)$$

$$L_{x3} = H \cdot \operatorname{ctg} \delta_0 + x_3, \text{ м}; \quad (3)$$

$$L_{x4} = H \cdot \operatorname{ctg} \psi_3 + x_4, \text{ м}; \quad (4)$$

где L_{y1} , L_{y2} и L_{x3} , L_{x4} – расстояния от забоя до левой и правой вертикальных границ расчетной схемы соответственно по осям Y и X , м;
 α – угол падения пласта, град (в рассматриваемой схеме $\alpha = 0^0$);
 y_1 , y_2 , x_3 и x_4 – запасы расстояний, связанные с необходимостью повышения точности определения границы зоны сдвижения земной поверхности, равные 50-100 м.

Расстояния от забоя до верхней границы расчетной схемы приняты равными глубине разработки H , а до нижней – H_1 – не менее 300 м [5]. Для исследуемых условий, согласно [6]: $\psi_1 = \psi_2 = \psi_3 = 55^0$; $\delta_0 = 70^0$; L_{y1} и L_{y2} не менее 750 м, L_{x3} и L_{x4} не менее соответственно 414 и 750 м.

Тогда размеры модели по осям X , Y и Z составят:

$$L_X = L_{x3} + L_{x4} + l_x \text{ м}; \quad (5)$$

$$L_Y = L_{y1} + L_{y2} + l_y \text{ м}; \quad (6)$$

$$L_Z = H + H_1 + m, \text{ м}. \quad (7)$$

Расчетная схема, охватывающая область моделирования, представлена на рисунке 2, а.

Согласно методике расчета в модели (рисунок 1) на боковых границах исследуемой области приняты только вертикальные перемещения, на нижней – жесткое закрепление. На верхней границе у земной поверхности могут проявляться как вертикальные, так и горизонтальные перемещения.

Моделируемое пространство разделено на блоки (рисунок 2, а): угольный пласт – Б1, первый слой кровли – Б2, второй – Б3. Вышележащая толща массива представлена блоком Б4, а нижележащая – Б5. Минимальный размер КЭ принят равным 1,0x1,6 м, максимальный – 42,6x43,2 м. Сгущение сетки в блоках Б1-Б3 выполнено на исследуемом участке, имитирующем выемку угольного пласта при развороте линии очистного забоя, с использованием элементов в плоскости пласта трапециевидной формы. Исследуемый участок и его фрагмент с разбивкой области на КЭ представлены на рисунке 2, б и 2, в.

Расчет НДС с использованием модели производится в физически нелинейной постановке шагово-итерационным методом с разделением на 2 равных по величине шага. Для всех КЭ модели принят экспоненциальный закон деформирования геоматериала [4], усреднённые прочностные характеристики которого представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Прочностные характеристики пород

Тип пород	Количественное значение параметра прочности пород, МПа			Коэффициент Пуассона
	предел прочности на		модуль упругости	
	сжатие	растяжение		
	условное обозначение			
	$\sigma_{сж}$	σ_p	E	μ
Песчаник	90	9	36000	0,2
Глинистый сланец	50	5	34000	0,25
Угольный пласт	20	2	20000	0,27

Расчет модели состоит из 12 стадий: первая – нагружения, последующие – моделирования полостей, имитирующих попеременно-диагональное подвигание линии очистного забоя на участках разворота I и II относительно сопряженных с лавой боковых краевых частей угольного массива соответственно у транспортной (стадии ② - ⑦) и вентиляционной (стадии ⑧ - ⑫) выработок (рисунок 2, г), расчетные параметры которых представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные параметры на участках разворота линии очистного забоя

Участок разворота	№ стадии расчета	Подвигание линии очистного забоя по оси X на участках разворота относительно сопряженных с лавой боковых краевых частей угольного массива выработок, м	
		транспортной (Vm_i)	вентиляционной (Vv_i)
I	② - ⑦	11,2	1,6
II	⑧ - ⑪	1,6	14,4
	⑫	4,8	11,2

По результатам моделирования установлены величины вертикальных сжимающих напряжений N_z (МПа) и контуры формируемых зон разрушения породных слоев над угольным пластом (рисунки 3 и 4).

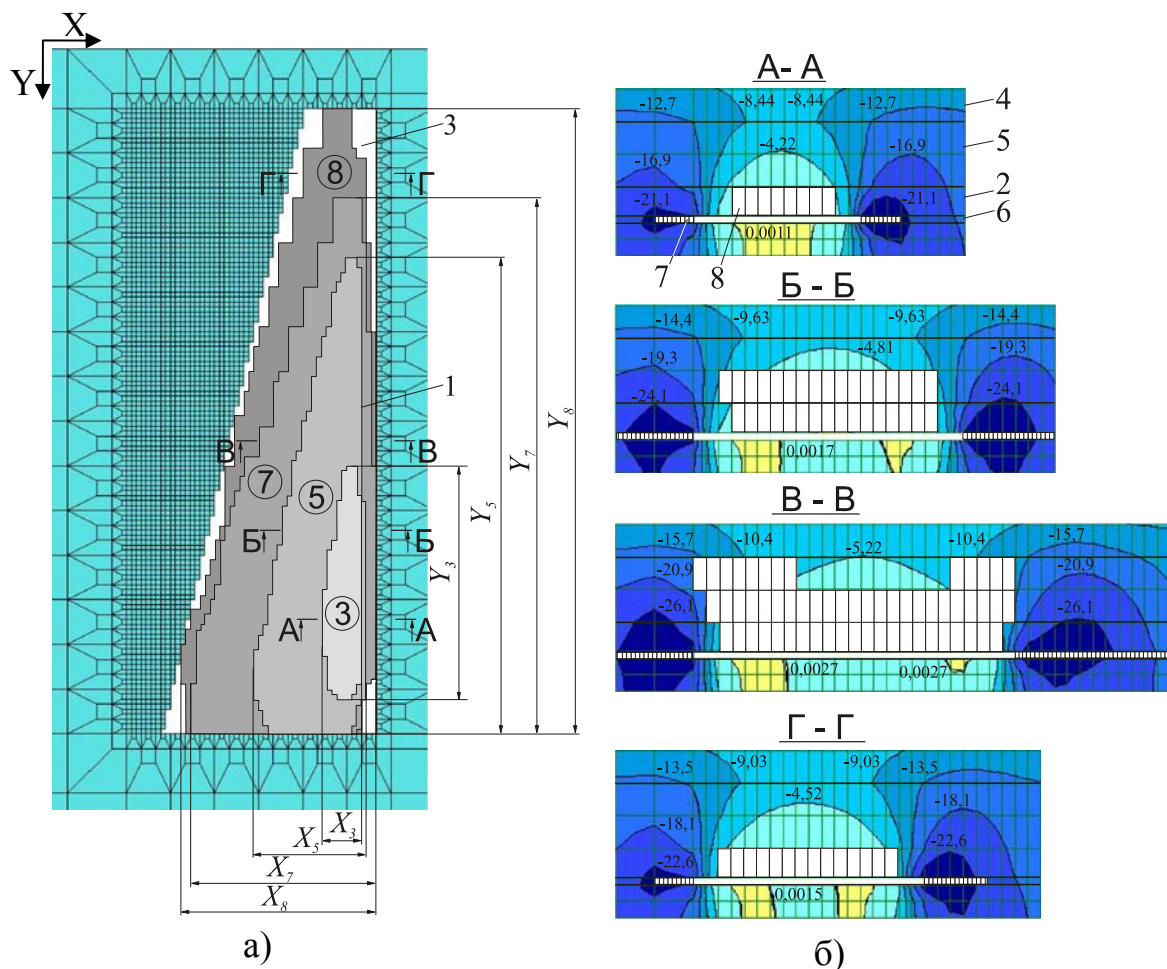


Рисунок 3 – Контуры напряжений N_z и формируемых зон разрушения

1 по результатам стадий расчета (3), (5), (7) и (8): а – первого слоя кровли 2 в пределах площади её обнажения 3; б – массива 4 по высоте: 5 – второй слой кровли; 6 – угольный пласт; 7 и 8 – разрушенные соответственно угольный пласт и кровля

Первый слой кровли разрушается на стадии расчета (3) (рисунок 3, а) и формирует контур зоны с максимальными размерами $X_3 = 12,8$ м и $Y_3 = 75,2$ м соответственно по осям X и Y и площадью $S_3 = 740$ м² (таблица 3). Подвигание очистного забоя у транспортной и вентиляционной выработок составило соответственно $Vm_3 = 22,4$ м и $Vv_3 = 3,2$ м. На I участке разворота линии очистного забоя по мере отхода лавы от монтажной камеры на стадиях расчета (5) и (7) геометрические параметры контуров этих зон разрушения увеличиваются и составляют $X_5 = 36,8$ м; $X_7 = 59,2$ м и $Y_5 = 153,6$ м; $Y_7 = 172,8$ м, соответственно площадями $S_5 = 4303$ м² и $S_7 = 6863$ м². Полное формирование контура зоны разрушения первого слоя кровли по всей длине лавы площадью $S_8 = 8988$ м² происходит на II участке её разворота (стадия расчета (8)),

при максимальной и минимальной величинах подвигания лавы соответственно у транспортной $Vm_8 = 68,8$ м и вентиляционной $Vв_8 = 24,0$ м выработок.

Вертикальные величины сжимающих напряжений по указанным сечениям (рисунок 3, б) составляют максимальные значения $N_{z3} = 21,1$ МПа; $N_{z5} = 24,1$ МПа; $N_{z7} = 26,1$ МПа и $N_{z8} = 22,6$ МПа соответственно на стадиях расчета (3), (5), (7) и (8), распространяются вокруг краевых частей вынимаемого угольного массива. Минимальные значения этих напряжений составили 4,2 -5,2 МПа.

Таблица 3 – Размеры формируемых контуров зон разрушения первого слоя кровли на участках разворота

Участок разворота	№ стадии расчета	Максимальный размер зоны разрушенных пород, м		Площадь контура зоны разрушенных пород, м ²
		продольный	поперечный	
		условное обозначение		
		X_i	Y_i	S_i
I	(3)	12,8	75,2	740
	(5)	36,8	153,6	4303
	(7)	59,2	172,8	6863
II	(8)	62,4	201,6	8988

Второй слой кровли (рисунок 4) разрушается на I участке разворота лавы, начиная со стадии расчета (6), при подвигании очистного забоя у транспортной и вентиляционной выработок соответственно $Vm_6 = 56$ м и $Vв_6 = 8$ м. Площадь зоны разрушения этого слоя составляет $Sp_6 = 837$ м² при общей площади его обнажения $So_6 = 4981$ м² (таблица 4). На стадии расчета (7) ($Vm_7 = 67,2$ м и $Vв_7 = 9,6$ м) общие площади зон обнажения и разрушения возрастают и составляют соответственно $So_7 = 7862$ м² и $Sp_7 = 4644$ м². На II участке разворота лавы наблюдается рост площадей зон разрушения, которые по стадиям расчета (8), (9) и (10) составляют соответственно $Sp_8 = 6151$ м², $Sp_9 = 9454$ м² и $Sp_{10} = 12358$ м² при общих площадях обнажения $So_8 = 9623$ м², $So_9 = 10972$ м² и $So_{10} = 12549$ м². Полное формирование зоны разрушения второго слоя кровли по всей длине лавы происходит при расчете на стадии (10) ($Vm_{10} = 72$ м и $Vв_{10} = 52,8$ м). Как видно из рисунка 4, на угловых участках площади обнажения разрушение кровли не происходит и по мере разворота лавы величина их уменьшается.

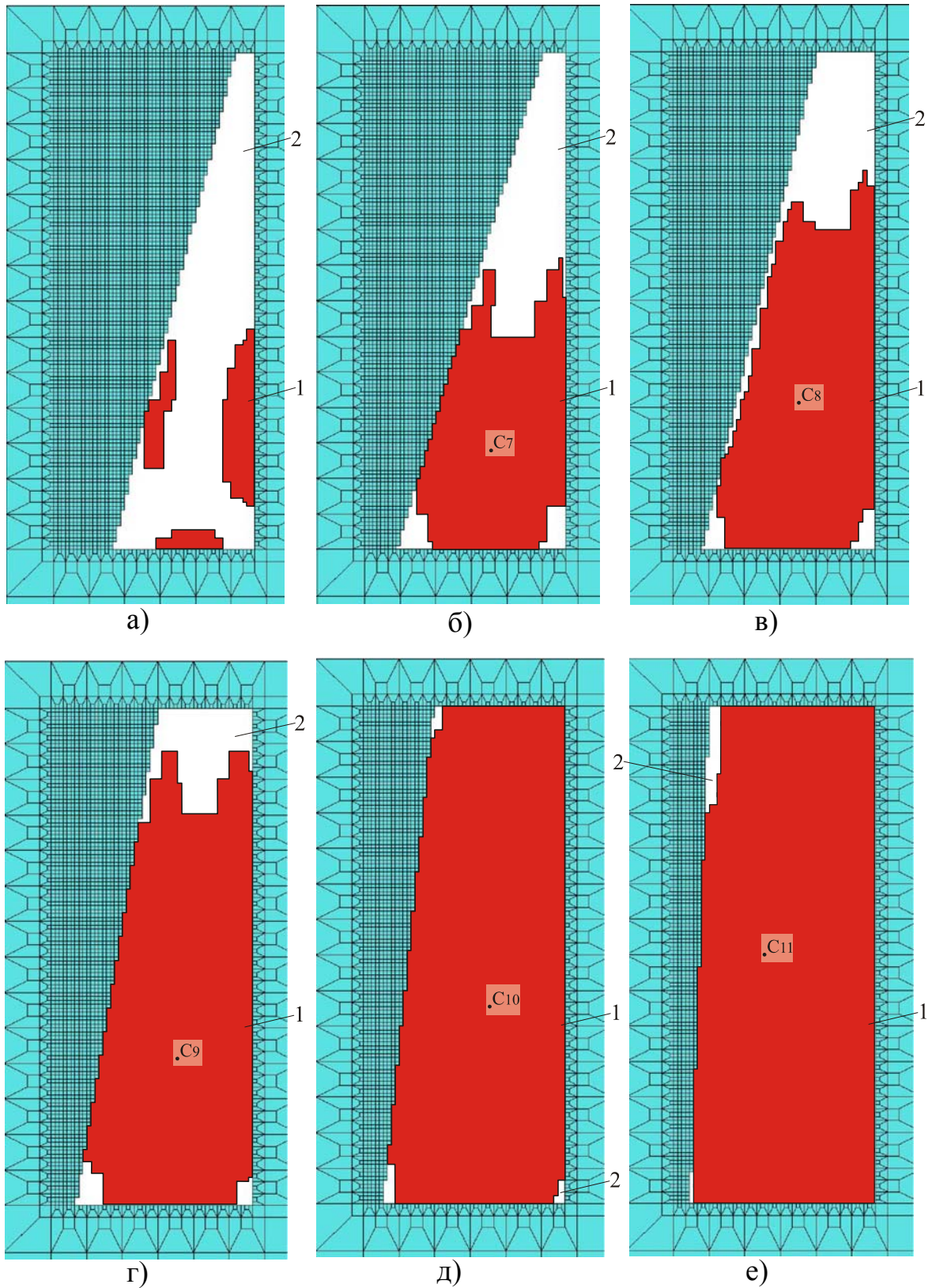


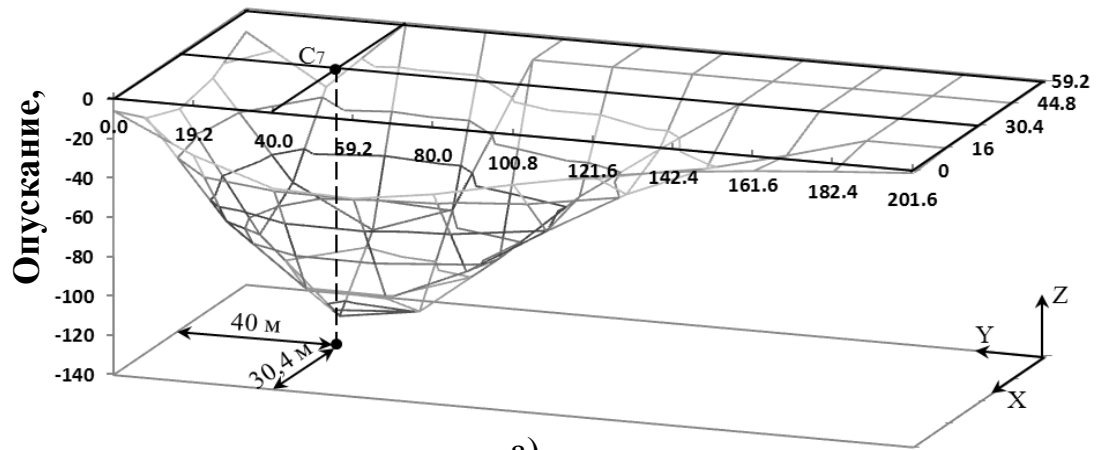
Рисунок 4 – Контуры формируемых разрушенных **1** и неразрушенных **2** зон второго слоя кровли в пределах обнажения исследуемого участка: **а, б, в, г, д** и **е** – соответственно по результатам стадий расчета (6), (7), (8), (9), (10) и (11): C7 – C11 – точки максимальных опусканий кровли

Таблица 4 – Соотношение площадей обнажения второго слоя кровли и его разрушения на участках разворота

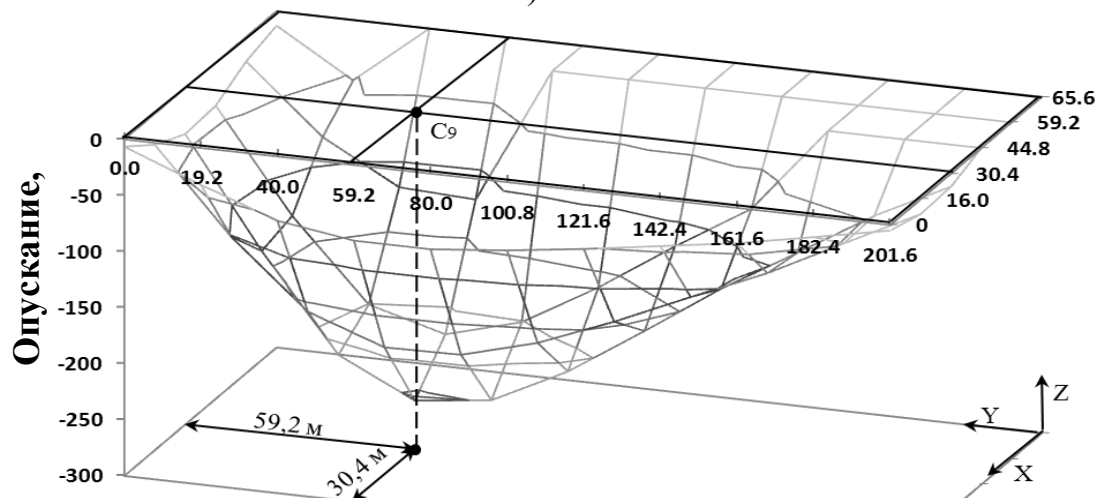
Участок разворота	№ стадии расчета	Площадь зоны, м ²		Относительная величина
		общая обнажения	разрушения	
		условное обозначение		
		So_i	Sp_i	p_{si}
I	⑥	4981	837	0,17
	⑦	7862	4644	0,59
II	⑧	9623	6151	0,64
	⑨	10972	9454	0,86
	⑩	12549	12385	0,99
	⑪	14387	14186	0,99

Для сравнения количественных значений площадей общего обнажения (So_i) и её разрушенной части (Sp_i) целесообразно использовать их относительную величину $p_{si} = Sp_i / So_i$, значения которой представлены в таблице 4. С увеличением общих площадей обнажения доля площадей разрушенных участков возрастает неравномерно от 0,17 до 0,99 соответственно на начальной и конечной стадиях. Максимальное вовлечение в процесс второго слоя кровли происходит на стадии расчета ⑦ с наибольшим приростом относительной величины p_s , равной 0,42.

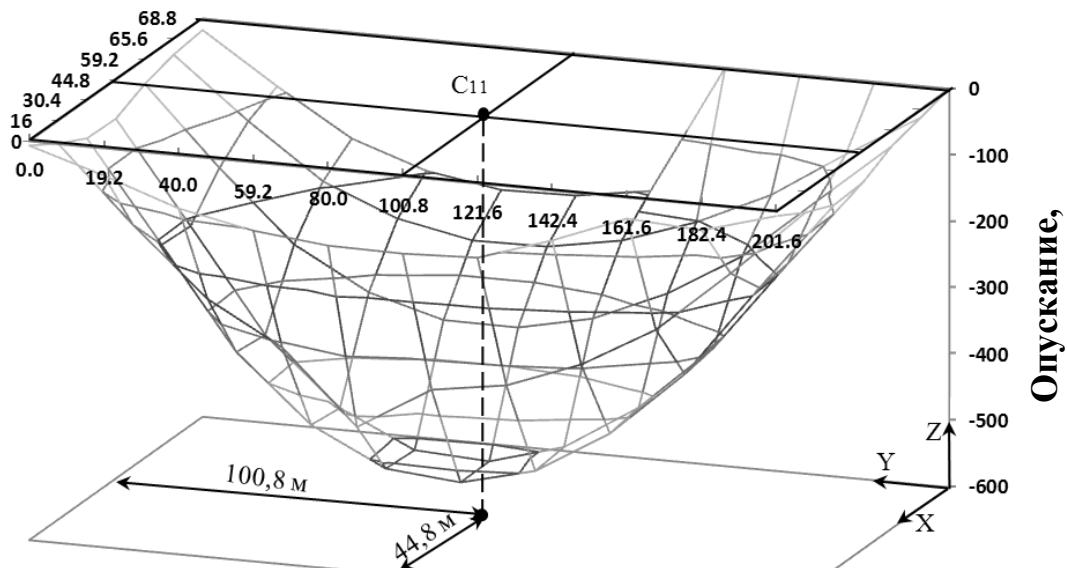
Графическая интерпретация изменений опусканий второго слоя кровли по стадиям расчета ⑦, ⑨ и ⑪ представлена на рисунках 5 и 6. Максимальная величина опускания кровли в точке С7 на стадии расчета ⑦ (рисунки 5, а и 6, а) составляет 126 мм и находится по длине лавы на расстоянии 40 м относительно сопряженной с лавой транспортной выработки и 30,4 м по подвиганию лавы от монтажной камеры. На стадиях расчета ⑨ и ⑪ максимальные величины опусканий кровли в точках С9 и С11 составили соответственно 256 мм и 521 мм. При этом точки по длине лавы относительно транспортной выработки сместились в соответствии с координатами 59,2 м и 100,8 м, а по подвиганию очистного забоя – 30,4 м и 44,8 м (рисунки 5, б, в и 6, б, в).



а)



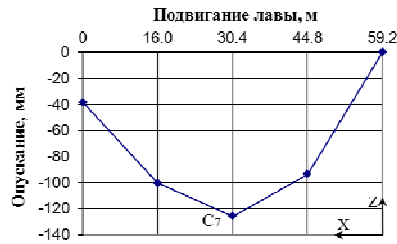
б)



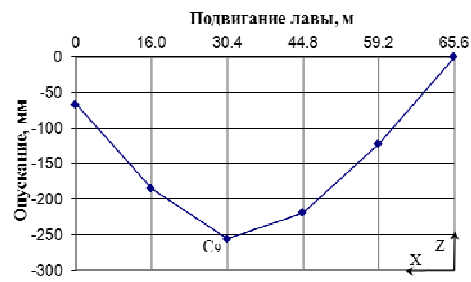
в)

Рисунок 5 – Графическая интерпретация изменений опускания второго слоя кровли соответственно по результатам стадий расчета

⑦ (а), ⑨ (б) и ⑪ (в)



а)



б)



в)

Рисунок 6 – Изменения величин опускания второго слоя кровли по взаимоперпендикулярным плоскостям, проведенным соответственно через точки С7 (а), С9 (б) и С11 (в)

Из рисунков 5 и 6 видно, что опускания труднообрушаемого (второго слоя) кровли в трёхмерном измерении представляет собой изменяющуюся по стадиям обнажения неправильную вогнутую поверхность с перемещающимся центром величин максимальных опусканий, стремящихся к центру площади обнажения.

Выводы.

Площадь зоны разрушения непосредственной кровли при попеременно-диагональном обнажении массива на различных участках пролёта его зависания по длине лавы возрастает. Полное разрушение этого слоя относительно сопряженных с лавой вентиляционной и транспортной выработок происходит соответственно при максимальных пролётах зависания на 24 и 68,8 м с вовлечением в процесс смещения труднообрушаемого слоя.

Параметры контуров распространения вертикальных сжимающих напряжений, разрушений и опусканий попеременно-обнажаемого массива кровли зависят от пролётов зависания.

Поверхность прогиба труднообрушаемого слоя представляет собой неправильную вогнутую форму с асимметричным расположением её центра в точках максимальных опусканий, перемещающихся по мере обнажения массива.

Полное разрушение труднообрушаемого слоя происходит по всей площади обнажения с максимальной величиной опускания 521 мм на удалении от оставленной краевой части угольного массива у монтажной камеры 44,8 м и транспортной выработки 100,8 м, что примерно совпадает с центром лавы по её длине и подвиганию.

На угловых участках лавы труднообрушаемый слой кровли зависает и по мере обнажения площадь его неразрушенной части уменьшается.

Математические модели напряженно-деформируемого состояния массива методом конечных элементов рекомендуется использовать для прогнозирования в конкретных исходных условиях зон разрушения массива кровли до первичной её посадки при поэтапном развороте лавы.

Библиографический список

1. Журило А. А. Горное давление в очистных забоях с труднообрушающимися кровлями / А. А. Журило. – М.: Недра, 1980. – 124 с.

2. Овчинников В.П. Геомеханічне обґрунтування технології управління важкообвальною покрівлею на викидонебезпечних пластах // В.П. Овчинников, Ю.М. Халімендик, В.Д. Петренко, В.П. Романенко. – Луганськ: Книжковий світ, 2005. – 208 с.

3. Борzych А.Ф. Опыт поэтапной первичной посадки кровли в комплексно-механизированных лавах / А.Ф. Борzych, А.П. Болотов, В.Н. Григоряк // Уголь Украины. – 2009. - № 5. – С. 3-4.

4. Лира[®] 9.4. Примеры расчета и проектирования: учебное пособие / [Борисов В.Е., Гензерский Ю.В., Гераймович Ю.Д. и др.]. – К.: ФАКТ, 2008. – 280 с.

5. Комиссаров С.Н. Управление массивом горных пород вокруг очистных выработок / С.Н. Комиссаров. – М.: Недра, 1983. – 237 с.

6. Правила підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом. ГСТУ 101.00159226.001-2003. – К.: Мінпаливенерго України, 2004. – 127 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Борzychом А.Ф.