

УДК 622.831.27

Е.Д. Стаднюк<sup>1</sup>, И.В. Жуковцов<sup>2</sup>, С.В. Козырь<sup>3</sup>

## ЭВОЛЮЦИЯ МОДЕЛЕЙ РАСЧЕТА ШАГА ОБРУШЕНИЯ ОСНОВНОЙ КРОВЛИ

<sup>1</sup>Институт физики горных процессов НАН Украины

<sup>2</sup>Шахта им. А.Ф.Засядько

<sup>3</sup>Шахтоуправление "Трудовское"

Вследствие проведения выработки (образования полости в горном массиве) происходят качественные и количественные изменения массива горных пород. При увеличении полости обнажения пролет кровли достигает предельного значения. В основном это сопровождается потерей устойчивости обнажения и обрушением пород в выработанное пространство. Геометрические размеры и момент появления зон ослабления являются важным технологическим параметром ведения очистных работ. Его знание позволяет избежать экономических убытков и сохранить безопасность работ в очистном забое.

Еще со времени промышленной революции (XVIII в.) вследствие увеличившегося объема добычи полезных ископаемых возник вопрос о безопасности ведения добычных работ. Прежде всего это было связано с обрушением пород в горные выработки, которое происходило со значительной частотой и сопровождалось гибелью горняков. По этой причине горные инженеры и ученые пытались создать методы расчёта и прогноза поведения горных пород в выработках.

Опыт подземных работ и анализ обрушений показал, что при обрушении образуется сводообразная зона обрушения, которая и оказывает давление на крепь. В середине XIX в. считалось, что после своего образования эти своды принимают устойчивую форму. Назывались эти своды сводами естественного равновесия. Различными учеными были предприняты попытки определения размеров сводов для определения возможной нагрузки на крепь.

В разных странах с середины XIX в. начинают появляться научно обоснованные гипотезы о горном давлении. Первоначально, когда глубины разработки были чрезвычайно малы, полагалось, что на крепь оказывает воздействие весь столб породы над ней. Шульц (1867 г.) рассматривал слой породы в кровле как изгибающуюся балку. В 1878 г. швейцарский геомеханик

А. Гейм [1] опубликовал первую научную гипотезу о силах, действующих в нетронутым горном массиве. Согласно его гипотезе горное давление формируется под весом толщи пород. Давление в нетронутым массиве действует по всем направлениям гидростатически. Гипотеза А. Гейма о напряжениях в ненарушенном массиве на протяжении прошедшего столетия не была опровергнута и находит применение в трудах специалистов в области горной геомеханики.

В. Риттером (1879 г.) рассчитывалось уравнение свода оторвавшейся породы, оказывающего собственным весом давление на крепь. По излому крепи пытался установить давление Греггер (1881 г.). Были сделаны попытки лабораторного моделирования сводов, вследствие чего Энгессер (1882 г.) определил условия образования сводов (их форма считалась параболической). Также с помощью лабораторных исследований Фейоль (1885 г.) изучил изгибы слоев на различном удалении от кровли. В 1892 г. Биргбаумером было выдвинуто предположение, что на крепь давит вес жесткого столба над выработкой, частично удерживаемый боковыми силами трения. В 1894 г. Манцель продемонстрировал, что в массиве пород присутствуют напряжения, способные разрушить любую крепь [2].

Каждый новый автор пытался внести абсолютно новое представление о картине горного давления. В первой половине XX в. в работах академика А.Н. Динника (1928 г.) была выдвинута гипотеза об идеально упругом деформировании пород верхних горизонтов земной коры. В рамках этой гипотезы были выполнены оценки распределения по глубине напряжений, показавшие наличие существенной девиаторной компоненты, вызванной меньшим в 2-3 раза уровнем напряжений горизонтального сжатия в сравнении с вертикальными напряжениями, значение которых равно (в механике сжатия для напряжений отвечают отрицательные значения, а для изотропного давления – положительные значения) весу вышележащих пород – литостатическому давлению ( $\sigma_{zz} = -p_{lt} = -\rho g H$ ,  $\rho g$  – удельный вес пород,  $H$  – глубина,  $p_{lt}$  – литостатическое давление) [3]. Заметим, что получаемое согласно гипотезе А.Н. Динника напряженное состояние, наибольшее сжимающее напряжение которого действует в вертикальном направлении, в рамках терминологии, используемой в геодинамике, соответствует режиму горизонтального растяжения, определяющему максимальные скорости удлинения в субгоризонтальном направлении. Горные геологи использовали данные о напряжениях, следующие из той или иной теории (А. Гейма или А.Н. Динника), в качестве начального состояния при расчетах возмущенного напряженного состояния горного массива, вызванного проходкой подземной выработки. Поскольку наблюдались отклонения поведения породного массива вблизи горных выработок от результатов таких горно-инженерных расчетов, предпринимались попытки развития теоретических представлений о генезисе напряжений. Выполнялось объединение этих теорий [4]. В расчетные формулы А.Н. Динника стали вводить поправочные коэффициенты (коэффициенты боко-

вого отпора), увеличивающие напряжения горизонтального сжатия ( $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ) вплоть до значений литостатического давления  $p_{lt}$ , определяемого весом столба горных пород на данной глубине. Объяснение этого эффекта связывали не только с вязким течением, проявляющимся длительное время, как это было сделано в работе Ю.М. Либермана, но и с пластическим деформированием горных пород, возникающим после достижения в массиве на определенных глубинах предельного напряженного состояния (критерии Кулон – Мора или Друккер – Прагера). Отметим, что все представленные выше концепции формирования современного напряженного состояния верхних слоев земной коры опирались на массовые силы как на источник генерации напряжений. В горном деле напряженное состояние породного массива, вызываемое только действием массовых сил в случаях упругой, упруго-пластической или упруго-вязкой реакции среды, принято называть гравитационным напряженным состоянием.

В начале XX в. в теорию горного дела внес неоценимый вклад проф. М.М. Протоdjяконов (1931 г.) [5]. В своей докторской диссертации он предложил наиболее простую гипотезу образования свода над выработанным пространством. На основании наблюдений и замеров величины горного давления, фактически развивающегося в тоннелях, М.М. Протоdjяконов установил значения коэффициента крепости для разных горных пород. Наименьшее значение соответствует плавунным и другим слабым грунтам, наибольшее, равное 20, – наиболее плотным крепким и вязким кварцитам и другим прочным породам. Большим достижением Протоdjяконова является разработка гипотезы горного давления, основанная на коэффициенте крепости пород. Он поставил перед собой задачу обосновать количественную гипотезу и получить расчѐтные формулы, удобные для использования. Согласно его представлениям вся вышележащая толща не может давить на крепь, т.к. форма свода определена в условиях собственного равновесия. Крепь испытывает давление пород, обрушившихся в пределах свода, исходя из площади параболы и объемной массы породы, при этом высота свода и давление на крепь не зависят от глубины разработки. Гипотеза М.М. Протоdjяконова была актуальной для глубины разработки 150-200 м.

Первая попытка установления предельных пролетов устойчивости кровли была предпринята В.Д. Слесаревым в 1938 г. Теория горного давления Слесарева [6] исходит из предположения о том, что характер деформаций породы определяется кривой давления, построенной на силах, действующих на породу кровли. На единичный элемент породы шириной  $dx$  и высотой  $h$  действует вес столба породы  $q=\gamma h dx$ , а также силы реакции опор  $R$  и  $R_1$ , направленные по касательным к кривой давления. Уравнение кривой давления определяется выражением

$$y = \frac{\gamma h}{2H} (lx - x^2), \quad (1)$$

где  $\gamma$  – объемный вес пород,  $h$  – мощность однородной породы в кровле выработки,  $H$  – величина бокового распора кривой давления (проекция  $R$  и  $R_l$  на ось абсцисс),  $l$  – пролет выработки.

Для связных пород плиту породы в кровле выработки можно рассматривать как балку, свободно лежащую на двух опорах или защемленную на концах. Первое предположение (балка, свободно лежащая на двух опорах) вносит в расчет дополнительный запас прочности, поэтому в дальнейшем изложении формулы В.Д. Слесарева приведены только для этого случая. Величина бокового распора принимается равной силе сцепления, которая приближенно равна абсолютной величине сопротивления породы растяжению, т. е.

$$H = K_p h, \quad (2)$$

где  $K_p$  – сопротивление породы растяжению,  $h$  – мощность пласта породы над выработкой.

При этом наибольший подъем кривой давления для связных пород достигается при  $x = 1/2$ .

Кривая давления представляет собой кривую эксцентриситетов приложения сил  $H$ . В зависимости от величины эксцентриситета определяются предельные пролеты выработки, характеризующие деформации пород кровли.

Первый предельный пролет (рис. 1):

$$L_I = \sqrt{\frac{4K_p h}{3\gamma}}. \quad (3)$$

При ширине выработки  $l \leq L_I$  породы кровли испытывают только упругие деформации.

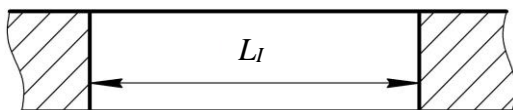


Рис. 1. Кровля в условиях первого предельного пролета

Второй предельный пролет  $a$ :

$$L_{IIa} = \sqrt{\frac{2K_p h}{\gamma}}. \quad (4)$$

При  $l = L_{IIa}$  кровля выработки испытывает максимально возможный прогиб без разрыва сплошности.

Второй предельный пролет (рис. 2):

$$L_{II} = \sqrt{\frac{3K_p h}{8\gamma}}. \quad (5)$$

При  $L_{IIa} < l \leq L_{II}$  в кровле выработки появляются трещины, разрывы.

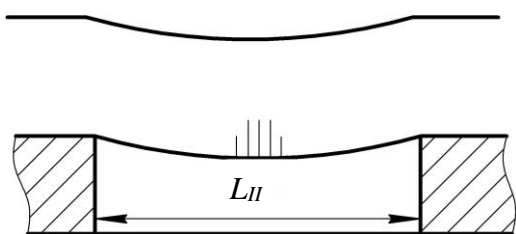


Рис. 2. Кровля в условиях второго предельного пролета

Третий предельный пролет (рис. 3):

$$L_{III} = 2\sqrt{\frac{K_p h}{\gamma}}. \quad (6)$$

При  $L_{II} < l \leq L_{III}$  происходит полное обрушение породы кровли.

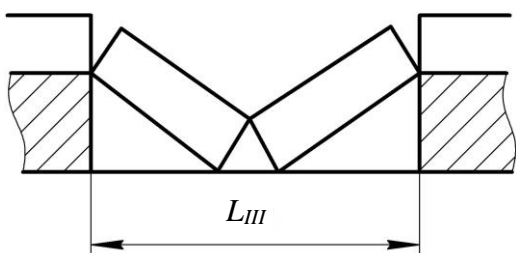


Рис. 3. Кровля в условиях третьего предельного пролета

Однако гипотеза В.Д. Слесарева об эквивалентных пролетах содержит ошибочные утверждения о том, что для всякой выработки ограниченного контура в плане можно найти эквивалентную выработку бесконечно большой длины, кровля которой будет находиться в тех же условиях равновесия, что и кровля данной выработки [7].

Начало аналитических исследований характера распределения напряжений вокруг выработок положено Р. Феннером [8] в 1938 г. и А. Лабассом [9] в 1946–1947 гг. Они создали стройную математическую теорию, отражающую процессы деформирования пород вблизи поверхностей обнажения. Феннер предположил следующее: в одной изотропной упругой среде деформации растяжения равны соответствующим напряжениям; максимальное напряжение сдвига определяется произведением коэффициента трения на нормальные напряжения. Теория Феннера доказывает и объясняет наличие вокруг полости в упругой среде зоны, свободной от напряжений, и зоны пониженных напряжений вокруг полости в пластичной среде. Лабасс развил идеи Феннера, а также доказал, что вокруг выработки существуют три зоны: пониженного давления, повышенного давления и естественных напряжений, имевших место до проведения выработки.

В 1974 г. А.В. Савостьянов представил теоретические основы управления состоянием массива горных пород [10]. Разработанная им теория сдвижения слоистого массива позволяет осуществлять математическое моделирование состояния горных пород в зависимости от природных, технологических и временных факторов для выбора рациональных технологических параметров добычи угля. Выполнив анализ основных механических свойств осадоч-

ных горных пород и произведя физическое моделирование на эквивалентных и оптико-поляризационных материалах, он установил закономерности сдвигения слоистого массива. Для моделирования слоистых пород использовались законы сопротивления материалов, которые рассматривались в виде балок-полосок, лежащих на податливом основании.

В результате анализа влияния природных, технологических и временных факторов на состояние массива горных пород установлено, что эпюры нагрузок, формирующиеся вокруг очистных и подготовительных выработок, состоят из нескольких зон опорного давления. То есть прослеживается тенденция увеличения числа зон разгрузки-концентрации напряжений, количество которых возрастает с увеличением прочности пород и упругих деформаций. В работах, опубликованных после 2006 г., А.В. Савостьянов перешел от прямолинейных зависимостей, описывающих углы сдвигения и разрушения пород, к эллиптическим зонам разгрузки-концентрации напряжений, формирующихся вокруг очистного и выработанного пространства.

Также проблемами управления горным давлением в очистных забоях занимались такие ученые, как А.Ф. Булат [11], С.Н. Комиссаров [12], Г.Н. Кузнецов [13], К.В. Руппенейт [14], П.М. Цимбаревич [15], И.Л. Черняк [16], Л.Д. Шевяков [17], Е.И. Шемякин [18], И.В. Антипов [30, 31, 32] и др.

В 60–70-е годы прошлого века А.А. Борисовым были предложены численные методы для расчета предельного пролета пород кровли пласта над выработанным пространством очистного забоя. Принимая во внимание трещиноватую природу горного массива, были сделаны следующие выводы:

1. Зона обрушений в трещиноватых породах имеет в общем случае форму, близкую к неправильной трапеции, а не форму свода, как при разрушении однородных связных пород.
2. Зона обрушений в общем случае несимметрична относительно вертикальной оси выработки и развивается в направлении, нормальном к поверхностям наибольших ослаблений, подобно тому, как при слоистых породах она развивается по нормали к поверхностям наслоений.
3. Высота зоны обрушений непостоянна: она зависит не только от пролета выработки, но и от глубины ее расположения и от времени.
4. При обрушении образуются несплошные плиты, состоящие из отдельных блоков (кусков), связанных между собой силами трения, которые контурируются поверхностями трещин наибольшего ослабления, а также плоскостями наслоения.
5. Под нагрузкой у такого рода несплошной балки начинает опускаться середина, что сразу же приводит к образованию трехшарнирных арок.
6. Блоки, составляющие каждую половину этой арки, удерживаются между собой благодаря наличию сил распора.
7. Разрушения в кровле выработок, пройденных в твердых трещиноватых породах (слоистых и неслоистых), происходят в результате потери трехшар-

нирными арками несущей способности и развития деформаций ползучести в шарнирах.

8. Наклон плоскости обрушения к плоскости наибольшего ослабления, а также к слоистости (для слоистых трещиноватых пород) зависит от свойств пород и отношения  $a/L$ . По данным опытов эти углы для твердых трещиноватых пород составляют  $\delta = 70\text{--}80^\circ$ . В трещиноватых породах уменьшение пролета в направлении снизу вверх объясняется несовпадением трещин, что приводит к зажиму кусков на границах зоны обрушения и образованию своего рода «карнизов» [19].

Развивая теорию трещин, Борисов сделал вывод о том, что работа основной кровли аналогична работе тонких плит. При достижении предельного пролета основной кровли происходит первое обрушение основной кровли, называемое генеральным. К этому моменту основная кровля обладает огромным запасом потенциальной энергии, ее освобождение при обрушении проявляется весьма бурно и нередко сопряжено с завалами лав. Характер первого обрушения основной кровли в срединном сечении, ее взаимодействие с непосредственной кровлей и характер опорного давления на краевые зоны разрабатываемого пласта схематично представлены на рис. 4, на котором показаны реакции крепи ( $R$  и  $r$ ), ширина призабойного пространства  $l_n$  и пролет обрушения  $b$ .

В процессе потери несущей способности работа основной кровли в режиме первого обрушения соответствует работе прямоугольной плиты, защемленной на опорном контуре.

Разломы основной кровли при установившемся движении происходят периодически. Пролеты этих разломов называются шагом вторичного обрушения. Соотношение шагов первичного и вторичного обрушений в зависимости от условий колеблется в пределах от 3 до 13.

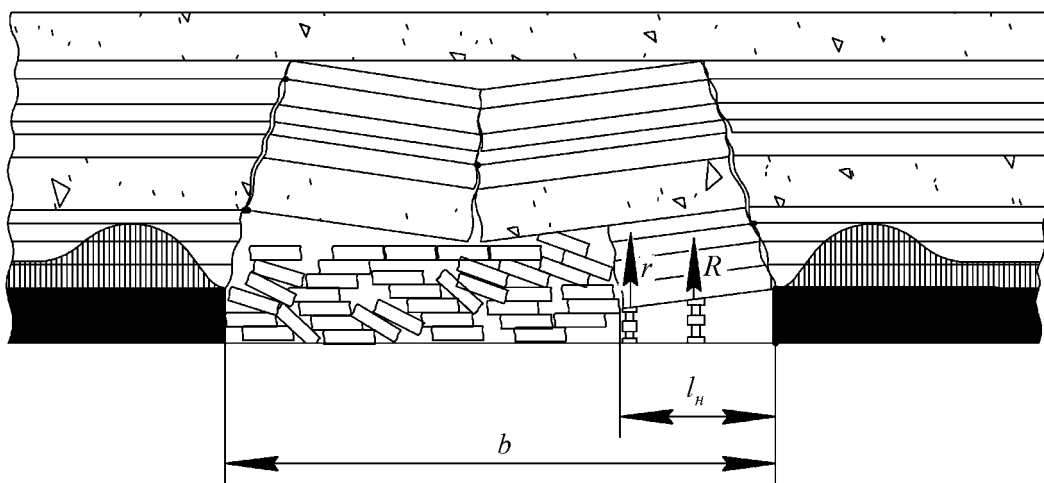


Рис. 4. Характер первого обрушения основной кровли в срединном сечении и распределение опорного давления на краевые зоны пласта

Рассчитывается шаг обрушения следующим образом [20]. Для упрощения плита заменяется эквивалентной по напряжениям балкой. Шаг первого обрушения рассчитывается по формуле В.Д. Слесарева:

$$L_{осн} = a l_3 / (a - l_3), \quad (7)$$

где  $a$  – длина лавы,  $l_3$  – эквивалентный пролет балки с закрепленными концами.

Эквивалентный пролет такой балки

$$l_3 = \sqrt{2h_{осн}(\sigma_{из} / q_{осн}) - \psi(q_{зак} / q_{осн})}, \quad (8)$$

где  $h_{осн}$  – мощность основной кровли,  $q_{осн}$  – интенсивность загрузки на основную кровлю, включая собственный вес и вес нагружающих слоев,  $q_{зак}$  – закрепляющая нагрузка на основную кровлю в местах заделки,  $\psi$  – параметр, определяемый опытным путем, принимается равным 0,5–0,7 м<sup>2</sup>;

$$q_{зак} = 1,5\gamma_{cp} H_i, \quad (9)$$

где  $H_i$  – глубина от поверхности до основной кровли.

Пролет основной кровли в режиме установившегося давления

$$L_1 = \sqrt{(q_{зак} / q_{осн}) \left[ (h_{осн}^2 \sigma_{из} / 6q_{зак}) - \psi \right]}, \quad (10)$$

где  $q_{осн}$  – интенсивность загрузки на основную кровлю.

$$q_{осн} = \gamma_{cp} (h_{осн} + \sum h_{осн}), \quad (11)$$

где  $\sum h_{осн}$  – мощность пачки слоев, нагружающих основную кровлю.

В конце прошлого века и в начале XXI века А.Д. Алексеев и В.Н. Ревва, пользуясь результатами А.А. Борисова, применили теорию трещин для описания состояния горного массива [21]. При этом они впервые использовали энергетический критерий, а именно, предположение А. Гриффитса [22] с учетом поправок Г.Р. Ирвина [23] и Е. Орована [24]. Впервые была доказана возможность замены величины удельной поверхностной энергии на эффективную поверхностную энергию, включающую собственно поверхностную энергию, энергию пластической деформации (основные затраты энергии) и др., а также был разработан новый способ определения эффективной поверхностной энергии при объемном сжатии.

Исходя из этих предположений [25], величина предельного пролета кровли  $l_{пред}$  определяется согласно [26] по формуле:

$$l_{пред}^2 = \frac{k_1^2 \varphi^2 h^2 |\sigma_{cp}|}{q}, \quad (12)$$

где  $k_1$  – расчетный безразмерный коэффициент,  $\varphi$  – коэффициент интенсивности защемления кровли на опорах,  $h$  – мощность кровли,  $\sigma_{cp}$  – предел



прочности кровли на растяжение;  $q$  – интенсивность равномерно распределенной нагрузки, действующей на кровлю.

Согласно критерию, вытекающему из уравнения Гриффитса-Орвана для условий плоской деформации [27], разрушающее напряжение

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E\Gamma}{\pi(1-\nu^2)a}}, \quad (13)$$

где  $a$  – критическая длина трещины,  $\Gamma$  – эффективная поверхностная энергия менее трещиностойкого слоя,  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Полагая, что  $\sigma_{ср} = \sigma_f$ , получим

$$l_{пред}^2 = \frac{k_1^2 \varphi^2 h^2}{q} \sqrt{\frac{2E\Gamma}{\pi(1-\nu^2)a}}. \quad (14)$$

Из (13) следует, что с увеличением уровня трещиностойкости пород будет увеличиваться величина предельного пролета, а, следовательно, повышаться устойчивость кровли.

Н.И. Лобков предложил усовершенствованный метод расчета шага первичной и вторичной посадок основной кровли [28–31]. Он развил представления о слоистой структуре породного массива и впервые установил аналитическую зависимость шага посадки кровли. Его модель расчета шага первичной посадки имеет следующий вид. Шаг первичной посадки основной кровли под действием разрушающих касательных напряжений:

$$L_{np}^{сж} = \sqrt{\frac{4h^2}{5(1-\mu^2)v_x} \left[ \frac{h^2}{5(1-\mu^2)v_x} + \frac{2(\sigma_{сж} - \gamma H)}{q} \right] - \frac{v_y L_l^2}{5v_x} - \frac{2h^2}{5(1-\mu^2)v_x}}, \quad (15)$$

где  $v_x$  и  $v_y$  – корректирующие коэффициенты соответственно для напряжений по осям  $x$  и  $y$ :

$$v_x = -0,0008 \cdot h^2 + 0,029 \cdot h + 1,5; \quad v_y = 0,0004 \cdot h^2 + 0,002 \cdot h - 0,021; \quad (16)$$

$q$  – распределенная нагрузка, действующая на слой кровли:

$$q = \gamma(h + h_n), \text{ Н/м}^2; \quad (17)$$

$\sigma_{сж}$  – предельно допустимые сжимающие напряжения в слое, МПа;  $\gamma$  – объемный вес породы в слое, Н/м<sup>3</sup>;  $H$  – глубина ведения очистных работ, м;  $L_l$  – длина лавы, м;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Шаг первичной посадки кровли от действия растягивающих напряжений:

$$L_{np}^p = h \sqrt{\frac{2 \left[ \gamma H \left( f - \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} \right) - \sigma_p \right]}{k_x q (1 - \mu^2)}}. \quad (18)$$

$f$  – коэффициент трения пород в межслоевом контакте. Для аргиллитов  $f = 0,2–0,3$  для алевролитов  $0,3–0,4$ , для песчаников  $0,4–0,5$ .  $\sigma_p$  – предельно допустимые растягивающие напряжения в слое, МПа.

$$k_x = \sqrt{\frac{158,7}{L_d}}. \quad (18)$$

Из полученных значений  $L_{np}^{сж}$  и  $L_{np}^p$  минимальная величина определяет величину шага посадки породного слоя кровли.

Однако при расчетах по формулам Н.И. Лобкова максимальная ошибка 9% обуславливает ошибку  $\pm 18$  метров при шаге первичной посадки основной кровли 200 м. Практика угледобычи нуждается в более точном предсказании шага первичной посадки основной кровли.

Анализ научных выводов по вопросу первичной посадки основной кровли приводит к заключению, что шаг первичной посадки зависит от двух групп факторов: горно-геологических и технологических.

Из горно-геологических следует выделить следующие: мощность пласта, угол падения, глубина разработки, площадь распространения, механические свойства и структурные особенности строения пород, и др. Влияние этих факторов на посадку кровли в достаточной степени изучено, что доказывает сказанное выше.

Технологические факторы зависят от деятельности человека и, в отличие от горно-геологических факторов, не остаются неизменными, их воздействие можно регулировать. Из основных технологических факторов следует отметить: применяемую систему разработки или способ управления горным давлением, порядок ведения горных работ, интенсивность очистной выемки, длину лавы и др. Этими факторами (за исключением длины очистного забоя) в существующих аналитических методах в основном пренебрегают, что принципиально неверно, т.к. именно этими факторами мы можем управлять для достижения безопасности работ и экономического эффекта. Поэтому сейчас одним из основных вопросов, связанных с посадкой кровли, является изучение влияния на нее скорости подвигания очистного забоя.

1. Heim A. Mechanismus der Gebirgsbildung. Bale, 1978.
2. Джагер Ч. Механика горных пород и инженерные сооружения [Текст] / Ч. Джагер. – Москва: Мир, 1975. – С. 255.
3. Динник А.Н. О давлении горных пород и расчете крепи круглой шахты [Текст] / А.Н Динник // Инженерный работник, № 3, 1926. – С. 1–12.
4. Крупенников Г.А. Распределение напряжений в природных массивах [Текст] / Г.А. Крупенников, Н.А.Филатов, Б.З.Амусин, В.М.Барковский. – Москва: Недра, 1972. – С. 143.
5. Протодяконов М.М. Давление горных пород на рудничную крепь [Текст] / М.М. Протодяконов. – Екатеринбург, 1907. – С. 43.

6. Слесарев В.Д. Механика горных пород [Текст] / В.Д. Слесарев. – Москва: Углетехиздат, 1948.
7. Слесарев В.Д. Управление горным давлением при разработке угольных пластов Донецкого бассейна [Текст] / В.Д. Слесарев. – Москва: Углетехиздат, 1952. – С. 380.
8. Феннер Р. Исследование горного давления [Текст] / Р. Феннер // Вопросы теории горного давления. – Москва: Госгортехиздат, 1961. – С. 5–59.
9. Лабасс А. Давление горных пород в угольных шахтах [Текст] / А. Лабасс // Вопросы теории горного давления. – Москва: Госгортехиздат, 1961.
10. Савостьянов А.В. Критерии оценки состояния массива и организации оперативного контроля [Текст] / А.В Савостьянов // Вопросы механики горных пород при разработке месторождений твердых полезных ископаемых. – Москва: ИП-КОН АН СССР, 1982. – С. 114–128.
11. Булат А.Ф. Управление геомеханическими процессами при отработке угольных пластов [Текст] / А.Ф. Булат, А.Т. Курносков. – К.: Наукова думка, 1987. – 197 с.
12. Комиссаров С.Н. Управление массивом горных пород вокруг очистных выработок [Текст] / С.Н. Комиссаров. – М.: Недра, 1983. – 237 с.
13. Кузнецов Г.Н. Определение полной несущей способности кровли подземных выработок [Текст] / Г.Н. Кузнецов. – Л.: ВНИМИ, 1950.
14. Руппштейн К.В. Давление и смещение горных пород в лавах полого-падающих пластов [Текст] / К.В. Руппштейн. – М.: Углетехиздат, 1957. – 228 с.
15. Цимбаревич П.М. Механика горных пород [Текст] / П.М. Цимбаревич. – М.: Углетехиздат, 1948. – 184 с.
16. Черняк И.Л. Периодические проявления горного давления при разработке угольных пластов [Текст] / И.Л. Черняк. – М.: МГИ, 1992. – 69 с.
17. Шевяков Л.Д. Разработка месторождений полезных ископаемых [Текст] / Л.Д. Шевяков. – Л., 1928.
18. Шемякин Е.И. Введение в теорию упругости [Текст] / Е.И. Шемякин. – М.: МГУ, 1993. – 95 с.
19. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов [Текст] / А.А. Борисов. – Москва: Недра, 1980. – С. 94–120.
20. Борисов А.А. Управление горным давлением [Текст] / А.А. Борисов, В.И. Матанцев, Б.П. Овчаренко, Ф.Н. Воскобоев. – Москва: Недра, 1983. – С. 29–39.
21. Алексеев А.Д. Разрушение горных пород в объемном поле сжимающих напряжений [Текст] / А.Д. Алексеев, В.Н. Ревва, Н.А. Рязанцев. – К.: Наукова думка, 1989. – 166 с.
22. Griffiths A. The phenomenon of rupture and flow in solids. *Trans. Roy. Phil. Soc.*, 1920, A. V. 220 p. 150–160.
23. Irwin G. R. Linear fracture mechanics, fracture transitions and fracture control // *Engineering fracture mechanics*. 1968. – Vol. 1, № 2. – p. 241–257.
24. Orowan E. *Dislocations in details*. New York: AJME, 1954.
25. Ревва В.Н. Научные основы деформирования и разрушения [Текст] / В.Н. Ревва. – Донецк, 2005.
26. Борисов А.А. Основы геомеханики горных массивов [Текст] / А.А. Борисов. – Ленинград: ЛГИ, 1989. – С. 294.
27. Хеккель К. Техническое применение механики разрушения [Текст] / К. Хеккель. – Москва: Металлургия, 1974. – С. 64.

28. Лобков Н.И. Определение разрушающих напряжений и предельного пролета кровли в очистных забоях [Текст] / Н.И. Лобков, А.И. Сергиенко, Е.Н. Халимендигов // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках, XVIII Международная научная школа: Крым, Алушта, 2008. – С. 199–201.
29. Лобков Н.И. Определение разрушающих напряжений при первичной посадке кровли [Текст] / Н.И. Лобков, А.И. Сергиенко, Е.Н. Халимендигов. – Донецк: ДонНТУ, Вісті Донецького гірничого інституту, № 2, 2008. – С. 79–86.
30. Антипов И.В. Геомеханическое обоснование характера обрушения кровли в очистных забоях [Текст] / И.В. Антипов, Н.И. Лобков / Межвед. сб. научн. тр. "Геотехническая механика". – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины. – Вып. 93. – 2011. – С. 38–45.
31. Антипов И.В. Формирование разрушающих напряжений в изгибающихся породных слоях [Текст] / И.В. Антипов, Н.И. Лобков / Межвед. сб. научн. тр. "Геотехническая механика". – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины. – Вып. 96. – 2011. – С. 172–176.
32. Антипов И.В. Новая высокоточная математическая модель шага первичной посадки кровли [Текст] / И.В. Антипов, Е.Д. Нагорная / Межвед. сб. научн. тр. "Геотехническая механика". – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, вып. 102. – 2012. – С. 171–177.

*К.Д. Стаднюк, І.В. Жуковцов, С.В. Козыр*

## **ЕВОЛЮЦІЯ МОДЕЛЕЙ РОЗРАХУНКУ КРОКУ ОБВАЛЕННЯ ОСНОВНОЇ ПОКРІВЛІ**

Наведено аналіз розвитку уявлень про управління станом гірничого масиву і методів розрахунку кроку первинного обвалення основної покрівлі.

*E.D. Stadnyuk, I.V. Ghukovtsov, S.V. Kozyr*

## **EVOLUTION OF CALCULATION MODELS OF THE FIRST ROOF CAVING STEP**

Present analysis of solution of longwall massif control and methods for calculating of the first roof caving step.