

УДК 622.834

СТОХАСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗУ ЗОН ОБРУШЕНИЙ КРОВЛИ В ОЧИСТНЫХ ЗАБОЯХ

Назимко В.В., Иванов И.Е. (ДонНТУ, г. Донецк, Украина),
Красько А.Н. (ДУНПГО, г. Донецк, Украина)

Обґрунтовано нову методіку прогнозування обвалень покрівлі у очисному вибої, що враховує стохастичні коливання критерію стійкості порід

New approach has been developed to predict roof fall in a longwall panel considering stochastic deviation of the stability criterion

Введение

Вывалы непосредственной кровли в длинных очистных забоях приносят весьма значительные убытки и повышают опасность подземных работ [1]. В результате обрушений непосредственной кровли увеличивается травматизм рабочих, количество смертельных случаев, на 7–15% возрастает зольность горной массы и соответственно падает ее качество и цена, а также увеличивается интенсивность износа горно-шахтного оборудования, включая исполнительные органы добычных комбайнов, скребковые конвейеры, перегружатели и другое оборудование, встроенное в транспортную цепочку. Дополнительно к этому увеличивается износ обогатительного оборудования и повышается стоимость обогащения горной массы. Все эти негативные факторы, в конечном счете, ухудшают экономику угледобывающих и перерабатывающих предприятий.

В работах отечественных и зарубежных ученых достигнут значительный прогресс по разработке способов, мероприятий и технологий предотвращения или минимизации обрушений непосредственной кровли в длинных очистных забоях угольных пластов. Несмотря на это острота проблемы не только не

снимается, но и продолжает обостряться. Одной из причин такого положения является отсутствие эффективных методов прогноза зон обрушений пород непосредственной и основной кровли в очистных забоях. В последнее время развивается новый метод такого прогнозирования, основанный на численном расчете распределения прочностных факторов R , уровня горного давления σ , а также учете отпора P механизированных крепей по всей площади выемочного столба [2, 3]. На основании полученных распределений определяется критерий устойчивости k по зависимости:

$$k = RP / \sigma. \quad (1)$$

Прочность пород непосредственной кровли и горное давление имеют размерность напряжений, а величина отпора крепи выражается в безразмерной величине и изменяется от 1 в случае полной исправности секции крепи до 0 в случае полной потери несущей способности. Прочность пород кровли определяется как средневзвешенная с учетом расстояния слоев до обнажения.

После нахождения распределения критерия устойчивости по площади прогнозируемого участка, находится такое же распределение по площади отработанного участка, местоположение обрушений и вывалов на котором достоверно известно. Затем определяется критическая величина критерия устойчивости по этим данным и осуществляется выделение опасных по обрушениям участков на прогнозном участке. Этот подход достаточно широко признан [4] и последнее время применяется на многих шахтах Украинского Донбасса. Вместе с тем, достоверность разработанной методики остается неудовлетворительной. Причина заключается в том, что описанная методика ориентирована на определение детерминированной величины критерия устойчивости кровли, тогда как все основные входящие факторы имеют стохастическую природу.

Анализ показателей разброса исходных факторов

Исследования показали [5], что прочность пород кровли очистного забоя в любом ограниченном конкретном месте распределена по нормальному закону и имеет вид, приведенный на рис. 1. Здесь единица соответствует максимальной величине прочности, а 0 минимальной. При этом коэффициент вариации прочности при уменьшении коэффициента крепости по шкале Протодеяконова от 9 до 2 увеличивается от 33% до 150%.

Установлено также [5], что вертикальная компонента горного давления имеет среднюю величину разброса около 6 МПа и также распределена по нормальному закону. Такой разброс обусловлен современными тектоническими подвижками земной коры и реологическими свойствами слагающих ее пород.

Анализ реальной величины отпора крепи в очистном забое показывает, что далеко не все секции механизированной крепи обеспечивают нормативное сопротивление опусканию пород кровли. Даже в новом комплексе после его монтажа имеются секции, которые не обеспечивают нормативный отпор. Это происходит не столько по вине изготовителей крепи, сколько из-

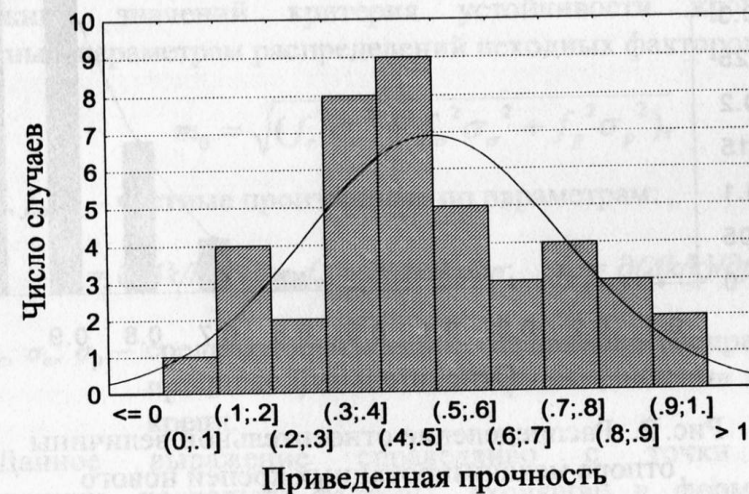


Рис. 1. Распределение приведенной прочности пород

за повреждений, накапливающихся в процессе доставки и монтажа секций в конкретном очистном забое. Полученное по результатам обработки данных по состоянию отпора секций механизированных крепей [6, 7] распределение показано на рис. 2.

После определенного времени эксплуатации комплекса, особенно в сложных горно-геологических условиях, накапливается значительное количество секций, которые в той или иной мере теряют несущую способность, поэтому распределение секций по отпору становится более пологим (рис. 3). Можно видеть, что процент полностью исправных секций (в которых отмечается номинальный отпор) в данном случае уменьшается от $\approx 42\%$ (рис. 2) до $\approx 24\%$ (рис. 3). Впрочем, данные показатели могут быть сугубо индивидуальными для каждого очистного забоя и зависеть от культуры производства.

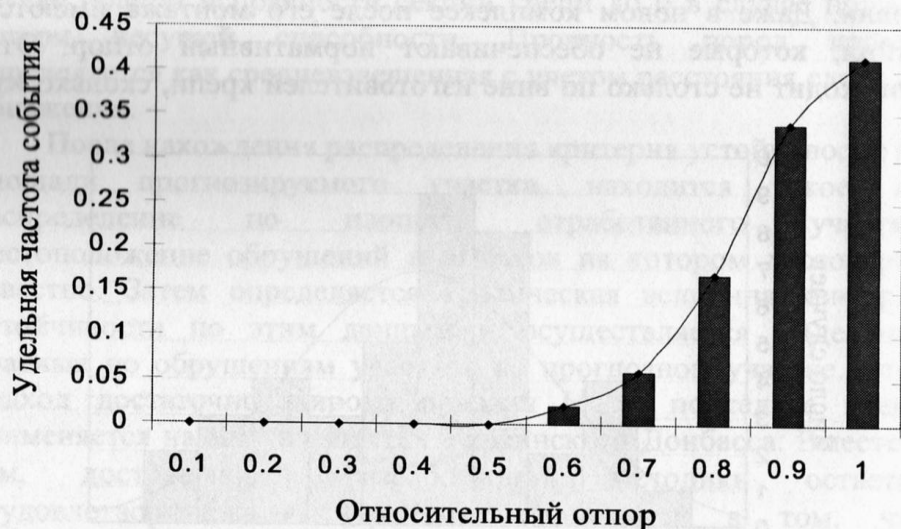


Рис. 2. Распределение относительной величины отпора механизированных крепей нового смонтированного комплекса

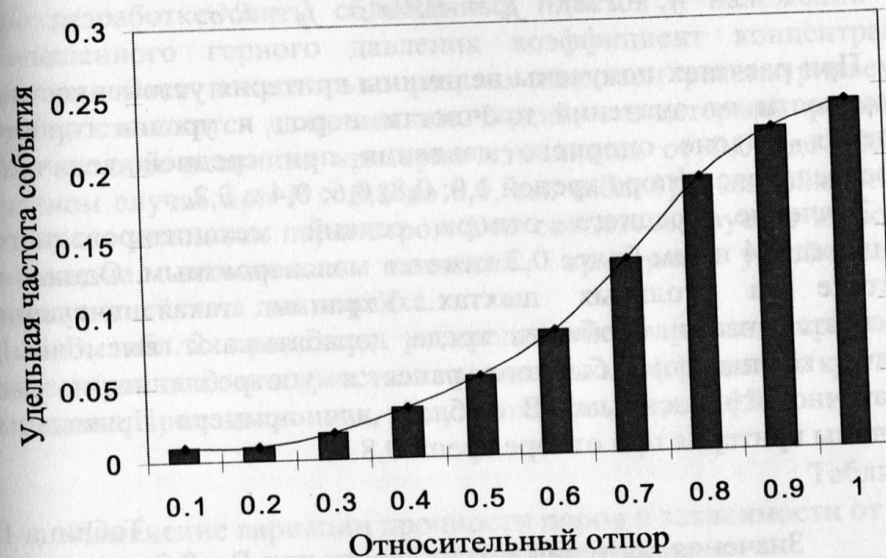


Рис. 3. Распределение относительного отпора секций крепи изношенного комплекса

Используя подход [5], можно определить интервал возможных значений критерия устойчивости кровли по известным параметрам распределений исходных факторов:

$$m_0 = \sqrt{(f_r^2 \sigma_r^2 + f_\sigma^2 \sigma_\sigma^2 + f_p^2 \sigma_p^2)}, \quad (2)$$

где f_r, f_σ, f_p – частные производные по параметрам:

$$f_r = \partial(\Delta k/k)/\partial r; \quad f_\sigma = \partial(\Delta k/k)/\partial \sigma; \quad f_p = \partial(\Delta k/k)/\partial p,$$

где $\sigma_r, \sigma_\sigma, \sigma_p$ – среднеквадратические отклонения распределений прочности, величины горного давления и отпора крепи.

Данное выражение справедливо с точки зрения геомеханики, поскольку факторы, входящие в формулу для критерия устойчивости являются независимыми. Выражения для частных производных по переменным запишутся в виде:

$$f_r = P/\sigma; \quad f_\sigma = -RP/\sigma^2; \quad f_p = R/\sigma.$$

При расчетах получены величины критерия устойчивости в зависимости от значений прочности пород и уровня горного давления в зоне опорного давления при средней величине относительного отпора крепей 1,0; 0,8; 0,6; 0,4 и 0,2.

Значение среднего отпора секций механизированного комплекса 0,4 и тем более 0,2 кажется маловероятным. Однако в практике на угольных шахтах Украины такая ситуация встречается часто, особенно когда дорабатывают выемочный участок комплексом, бывшим ранее в употреблении и уже достаточно изношенным. В табл. 1 для примера приведены величины критерия при отпоре крепи 0,8.

Таблица 1

Значения критерия устойчивости при $P = 0,8$

Уровень горного давления, МПа	Средневзвешенная прочность пород кровли, МПа			
	10	30	50	70
7	1,14	3,43	5,71	8,0
12	0,67	2,0	3,33	4,67
25	0,32	0,96	1,6	2,24
37	0,22	0,65	1,08	1,51
50	0,16	0,48	0,8	1,12
75	0,11	0,32	0,53	0,75

Диапазон прочности пород кровли принят от 10 МПа до 70 МПа, что соответствует наиболее типичным условиям разработки угольных месторождений. Горное давление впереди очистного забоя изменяется в пределах от 7 МПа до 75 МПа. С учетом коэффициента концентрации напряжений в зоне опорного давления, равном 2,5–3, это отвечает диапазону глубин разработки от 300 м до 1000 м. Если принять во внимание, что

при разработке свиты сближенных пластов и наложении зон повышенного горного давления коэффициент концентрации увеличивается в несколько раз, то диапазон рассматриваемых глубин становится даже меньше. Видно, что детерминированная или средняя величина критерия изменяется от 0,08 до 10,0 (в частном случае при $P = 0,8$ до 8,0, см. табл. 1) в зависимости от значения исходных параметров. Это свидетельствует о широком диапазоне возможных значений критерия устойчивости, изменяющейся на два порядка.

В табл. 2 приведено распределение вариации прочности пород кровли в зависимости от величины коэффициента крепости по шкале Протодяконова, полученное по данным [5].

Таблица 2

Изменение вариации прочности пород в зависимости от величины коэффициента крепости

Крепость пород по шкале проф. Протодяконова	2,2	4,2	5,7	7,2
Коэффициент вариации прочности на одноосное сжатие, %	133,9	82,9	56,7	40,5
Абсолютное отклонение, МПа	13,4	24,9	28,4	28,3

Как видим, вариация прочности изменяется в несколько раз в зависимости от величины коэффициента крепости, причем она сильнее для слабых пород.

Вариация уровня горного давления по данным [5] принимается равной 6 МПа. Необходимо отметить, что данное значение вариации может использоваться только в первом приближении. Для повышения достоверности прогноза при определении напряженного состояния массива следует учитывать то, что оно в значительной мере зависит от существующей планировки горных работ. Это означает, что в местах, где уровень действующих напряжений меньше и их вариация будет

меньше. В местах повышенного горного давления его вариация больше.

Вторым существенным моментом кроме планировки горных работ, который влияет на напряженное состояние пород, является шаг обрушения кровли позади очистного забоя. Данный фактор является весьма существенным. Ведь он влияет на напряженное состояние массива непосредственно впереди очистного забоя, то есть там, где происходит создание предпосылок для образования вывала. При меньшем шаге обрушения (слабые породы) колебания напряжений незначительные. При наличии в кровле пласта крепких пород шаг обрушения увеличивается, так как зависит большая породная консоль.

На основании статистического анализа распределения величин отпора секций механизированной крепи [6, 7] получены значения стандартного отклонения отпора в зависимости от степени износа комплекса, которая в данном случае измеряется обратно пропорционально величине среднего относительного отпора (табл. 3).

Таблица 3

Изменение вариации отпора секций крепи в зависимости от степени износа комплекса в целом

Отпор секций крепи в долях от номинального (обратно степени износа комплекса)	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2
Коэффициент вариации отпора	0,09	0,2	0,31	0,43	0,54

Как и следовало ожидать, стандартное отклонение отпора секций крепи увеличивается со средним износом комплекса в целом.

В результате анализа рассчитаны величины частных производных функции критерия устойчивости по переменным R , P и σ для всех степеней износа комплекса. В табл. 4 для примера приведены значения частных производных для $P = 0,6$.

Таблица 4

Значения частной производной функции критерия устойчивости по уровню горного давления при $P = 0,6$

Уровень горного давления, МПа	Средневзвешенная прочность пород кровли, МПа			
	10	30	50	70
7	-0,12	-0,37	-0,61	-0,86
12	-0,047	-0,13	-0,21	-0,29
25	-0,0096	-0,029	-0,048	-0,067
37	-0,00448	-0,013	-0,022	-0,031
50	-0,0024	-0,0072	-0,012	-0,017
75	-0,00107	-0,0032	-0,0053	-0,0075

Из табл. 4 можно видеть, что значения частной производной по горному давлению имеют отрицательный знак и увеличиваются по абсолютной величине с увеличением прочности вмещающих пород и уменьшением уровня горного давления, а также с уменьшением степени износа комплекса. Значения частной производной по параметру прочности пород уменьшаются с увеличением степени износа комплекса и уровня горного давления, действующего впереди лавы (табл. 5).

В свою очередь значения частной производной критерия устойчивости пород кровли увеличиваются с ростом прочности вмещающих пород и уменьшением уровня горного давления, действующего впереди лавы, что видно из табл. 6.

Таблица 5

Значения частной производной функции критерия устойчивости по прочности пород кровли

Уровень горного давления, МПа	Средний отпор секций крепи механизированного комплекса				
	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2
1	2	3	4	5	6
7	0,14	0,11	0,086	0,057	0,029
12	0,083	0,067	0,05	0,033	0,017

1	2	3	4	5	6
25	0,04	0,032	0,024	0,016	0,008
37	0,027	0,022	0,016	0,011	0,0054
50	0,02	0,016	0,012	0,008	0,004
75	0,013	0,011	0,008	0,0053	0,0027

Таблица 6

Значения частной производной функции критерия устойчивости по величине относительного отпора секций крепи

Уровень горного давления, МПа	Средневзвешенная прочность пород кровли, МПа			
	10	30	50	70
7	1,43	4,29	7,14	10,0
12	0,83	2,5	4,17	5,83
25	0,4	1,2	2,0	2,8
37	0,27	0,81	1,35	1,89
50	0,2	0,6	1,0	1,4
75	0,13	0,4	0,67	0,93

Нахождение распределения разброса критерия

После подстановки данных из табл. 1–6 в формулу (2) получены распределения стандартных отклонений критерия устойчивости кровли очистного забоя при разной степени износа механизированного комплекса. Для примера в табл. 7 приведены значения стандартного отклонения критерия устойчивости кровли при $P=1,0$ (новый комплекс). На рис. 4 данная информация приведена в виде распределения.

Таблица 7

Значения стандартного отклонения критерия устойчивости кровли при $P=1,0$

Уровень горного давления, МПа	Средневзвешенная прочность пород кровли, МПа			
	10	30	50	70
1	2	3	4	5
7	2,27	5,13	7,37	9,52

1	2	3	4	5
12	1,19	2,43	3,17	3,79
25	0,55	1,04	1,25	1,34
37	0,37	0,69	0,81	0,84
50	0,3	0,51	0,59	0,6
75	0,18	0,34	0,39	0,39

Анализ распределений отклонений для всех исходных условий показывает, что общая тенденция заключается в уменьшении степени разброса величины критерия при увеличении действующих в кровле пласта напряжений и уменьшении прочности пород. Максимальный разброс критерия устойчивости кровли (до 10,0) имеет место при полностью исправных секциях механизированных крепей, при минимальных напряжениях и максимальной прочности пород. Минимальный разброс критерия устойчивости кровли ($<0,1$) отмечается при максимально неисправных секциях механизированной крепи, минимальной прочности пород и максимальных действующих напряжениях.

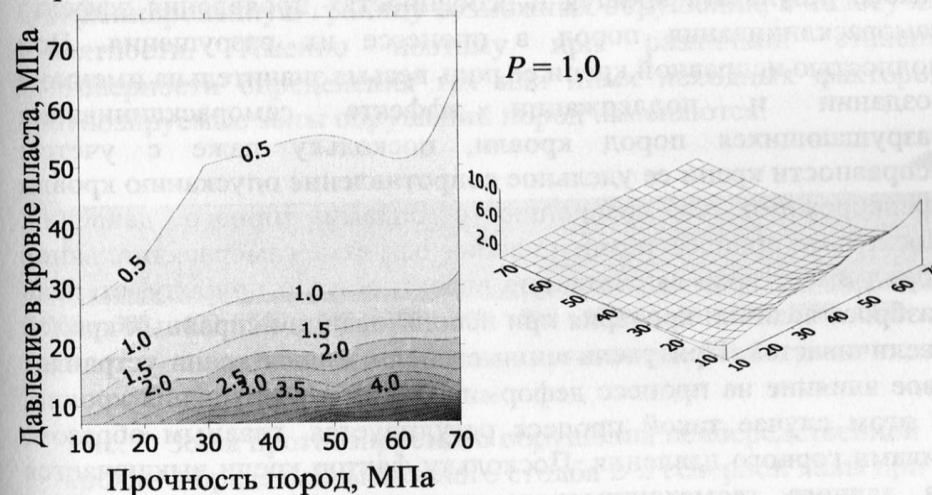


Рис. 4. Распределение значений стандартного отклонения критерия устойчивости кровли при $P=1,0$

Установленные закономерности весьма полезны для практического определения контуров зон кровли, опасных по обрушениям. Кроме того, эти закономерности позволяют прояснить ряд особенностей взаимодействия механизированных крепей с породами кровли очистного забоя. Так, при высоком уровне горного давления степень разброса значений критерия устойчивости уменьшается, что создает предпосылки для повышения точности определения границ возможных зон обрушений. Это позволит повысить надежность очистных работ в целом. С физической точки зрения, это можно объяснить тем обстоятельством, что при увеличении уровня горного давления большую роль в формировании предельного напряженного состояния кровли играют природные силы, обусловленные весом налегающей толщи. При этом доля отпора крепи в этом процессе уменьшается, что приводит к большей определенности оценки устойчивости.

Вместе с этим, увеличение степени износа комплекса приводит к уменьшению неопределенности оценки положения границ зон, опасных по обрушениям. Физическое объяснение такого результата кроется в особенностях проявления эффекта саморасклинивания пород в процессе их разрушения. При полностью исправной крепи ее роль весьма значительна именно в создании и поддержании эффекта саморасклинивания разрушающихся пород кровли, поскольку даже с учетом исправности крепи ее удельное сопротивление опусканию кровли пренебрежимо по сравнению с силами горного давления. Поскольку процесс возникновения эффекта саморасклинивания пород имеет ярко выраженную вероятностную природу, степень разброса величин критерия при использовании исправных крепей увеличивается. При увеличении степени износа крепь устраняет свое влияние на процесс деформирования и разрушения кровли. В этом случае такой процесс регулируется, главным образом, силами горного давления. Поскольку фактор крепи выключается из данного геомеханического процесса, его определенность повышается, что приводит к повышению точности прогноза степени вывалоопасности.

Минимальная достоверность определения местоположения опасных по обрушениям зон имеет место при весьма прочных породах. Такая закономерность может быть обусловлена тем, что прочные породы склонны образовывать блоки, которые легче самозаклиниваются в процессе перемещения и опускания в выработанное пространство очистного забоя. Как уже упоминалось выше, с увеличением вероятности самозаклинивания пород разброс величины критерия устойчивости кровли становится выше.

Таким образом, можно предположить, что существенную роль в формировании степени разброса критерия устойчивости кровли очистного забоя играет эффект саморасклинивания блоков, на которые она разрушается.

В конечном счете, прогноз обрушений кровли заканчивается определением местоположения или координат границ вывалов и достоверности. На рис. 5 приведено интегральное распределение критерия устойчивости кровли в пределах выемочного поля 2-й северной лавы по пласту k^1_7 шахты «Новодонецкая». По существу разработанная методика определяет не детерминированную границу возможных обрушений, а полосу их вероятности. Именно поэтому при различной степени достоверности определения тех или иных исходных факторов прогнозируемые зоны обрушений пород изменяются.



Рис. 5 Зоны прогнозируемого обрушения непосредственной кровли в пределах выемочного столба 2-й северной лавы при достоверности определения прочности пород 80%;

▨ — зоны обрушений пород непосредственной кровли

В результате нахождения зон вероятных обрушений кровли, в очистном забое возникает необходимость применения мероприятий по устранению этого негативного процесса. Такие мероприятия ранее разработаны [1, 2, 6] и широко применяются в практике ведения очистных работ. Однако до сих пор не разработана методика по оценке эффективности этих мероприятий с учетом естественного разброса параметров, влияющих на их эффективность. Разработанная выше методика является хорошей геомеханической базой для такой оценки.

подавляющее большинство мероприятий можно однозначно классифицировать с точки зрения факторов, входящих в формулу критерия устойчивости кровли (1). Так, региональная разгрузка пласта путем его надрезки приводит к уменьшению уровня горного давления. Тот же эффект имеет и локальная разгрузка, реализуемая путем увлажнения краевой части пласта, гидроотжима, подрезки пласта врубовой щелью и другие.

Упрочнение пород полимерными смолами, породными болтами или анкерными креплениями влияют на средневзвешенную прочность пород кровли и, таким образом, повышают критерий ее устойчивости.

Ремонт крепи, замена обратных клапанов, гидравлики, замена комплекса на более мощный прямым образом улучшают отпор механизированных секций и, таким образом, повышают значение критерия устойчивости кровли.

Вместе с тем, разные факторы имеют разную степень влияния на величину разброса критерия устойчивости кровли. В связи с этим после применения мероприятий по повышению устойчивости кровли необходимо производить перерасчет значения критерия кровли для установления степени их влияния на устойчивость кровли.

Задачей дальнейших исследований является нахождение зависимостей степени разброса критерия устойчивости кровли как функции шага посадки основной кровли в очистном забое, который, в свою очередь, является величиной случайной.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Зубов В.П. Научные основы разработки тонких и средней мощности пологих угольных пластов на больших глубинах: Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.15.02. / ЛГИ, 1990. – 47 с.
2. Грядущий Ю.Б. Геомеханические основы управления вывалоопасными кровлями в очистных забоях. – К.: Техника, 1998. – 100 с.
3. Шипачев В.К., Козак Ю.А., Панибратченко В.Ф., Иванов И.Е., Пономарев М.А., Красько А.Н. Модифицированная модель для расчета горного давления при отработке свиты пластов // Проблемы горного давления. – Донецк: ДонНТУ. – 2001. – №6. – С. 136–155.
4. Nazimko V.V., Lapteev A.A., Sazhnev V.P., Naprasnikov S.V., Alexandrov S.N., Ivanov I.E. Longwall Panel Roof Stability Assessment // Int. Coft. On Geomechanics / Ground Control in Mining and Underground Construction. – 1998. – Wollongong: NSW, Australia. – P. 599–608.
5. Назимко В.В., Сажнев В.П., Захаров В.С., Грядущий В.Б. Расчет смещений на контуре подготовительных выработок с учетом разброса прочностных свойств вмещающих пород // Проблемы горного давления. – Донецк: ДонНТУ. – 2001. – №6. – С. 156–163.
6. Иванов И.Е. Совершенствование метода прогнозирования зон обрушений пород непосредственной кровли в очистных забоях тонких пологих пластов: Дисс. канд. Техн. наук: 05.15.11. – Донецк, 2000. – 163 с.
7. Harris R.G. Longwall Support Monitoring // Proceeding of 12-t International Conference on Ground Control in Mining. – Department of Mining Engineering College of Mineral and Energy Resources, West Virginia University. – Morgantown (USA). – 1993. – P. 143–151.