

Белогуб О.Ю., аспирант ДонНТУ, ассистент каф. ГиОТ КИИ ДонНТУ
Соловьев Г.И., канд. техн. наук, доцент каф. РПМ ДонНТУ
Бачурин Л.Л., канд. техн. наук, доцент каф. ГиОТ КИИ ДонНТУ
Сергиенко А.И., канд. техн. наук, доцент каф. ГиОТ КИИ ДонНТУ
Федоренко М.В., магистрант КИИ ДонНТУ
Козырь С.В., аспирант ИФГП НАН Украины, начальник участка
ОП «Шахта «Трудовская» ГП «ДУЭТ»

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЯ ВЫВАЛООБРАЗОВАНИЯ ПОРОД КРОВЛИ ОЧИСТНЫХ ЗАБОЕВ

Білогуб О.Ю., аспірант ДонНТУ, асистент каф. ГіОП КІІ ДонНТУ
Соловйов Г.І., канд. техн. наук, доцент каф. РРКК ДонНТУ
Бачурін Л.Л., канд. техн. наук, доцент каф. ГіОП КІІ ДонНТУ
Сергієнко О.І., канд. техн. наук, доцент каф. ГіОП КІІ ДонНТУ
Федоренко М.В., магістрант КІІ ДонНТУ
Козир С.В., аспірант ІФГП НАН України, нач. дільниці
ВП «Шахта «Трудовська» ДП «ДВЕТ»

РОЗРОБКА КРИТЕРІЮ ВИВАЛОУТВОРЕННЯ ПОРІД ПОКРІВЛІ ОЧИСНИХ ВИБОЇВ

O. I. Bilogub, Doctoral Student of DonNTU
G. I. Soloviev, Ph.D. (Tech.), Associate Professor DonNTU
L. L. Bachurin, Ph.D. (Tech.), Associate Professor KII DonNTU
A. I. Sergienko, Ph.D. (Tech.), Associate Professor KII DonNTU
M. V. Fedorenko, M.S (Tech.) KII DonNTU
S. V. Kozir, Doctoral Student of IFMP NASU

THE DEVELOPMENT OF CRITERION FORMATION OF FALLING ROOF ROCKS IN THE COAL FACES

Аннотация. В статье представлены результаты анализа вывалообразования пород кровли в очистных забоях на основании обобщения геологических разрезов по длине лавы и замеров куполов вывалов при различных литологических составах пород кровли. Анализ критериев устойчивости пород кровли выявил сложности в получении корректных данных для подсчета по существующим на данный момент критериям. Также была выполнено математическое моделирование процесса формирования вывала в очистном забое в программном комплексе «Solidworks». На основании полученных данных предложен критерий вывалообразования пород кровли, включающий в себя последние разработки энергетических критериев теории разрушения.

Для условий ОП «Шахта «Стаханова» ГП «Красноармейскуголь» было получено численное значение критерия вывалообразования по предложенной авторами методике.

Ключевые слова: эффективная поверхностная энергия, вывал, устойчивость, мощность

ВВЕДЕНИЕ

Общая картина процессов, происходящих в массиве пород вокруг очистной выработки, заключается в изменении поля статических напряжений и, как следствие этого, в деформировании окружающих пород. В первую очередь на контуре выработанного пространства и в окружающем массиве пород происходят упругие смещения. В некоторых, правда очень немногочисленных, случаях, указанными упругими смещениями процессы деформирования массива пород и исчерпываются. Однако это может иметь место только при очень крепких породах и высокой степени монолитности массива. Гораздо чаще в выработанном пространстве вслед за упругими смещениями пород кровли развиваются неупругие деформации и происходят локальные разрушения пород кровли. Этому способствует развитие в окружающем массиве зон концентрации как сжимающих, так и растягивающих напряжений. В процессы деформирования привлекаются большие объемы пород, а вследствие этого – проявляются неоднородности низких порядков, по поверхностям которых массив наиболее ослаблен. В результате этого в очистных забоях развиваются вывалы пород кровли.

В условиях залегания в основной кровле пласта мощных и достаточно прочных пород, которые зависая на большой площади, пригружают приконтурную часть пласта. При этом над опорным контуром пласта происходит интенсивное деформирование непосредственной кровли с раскрытием структурно-литологических трещин и образования таких новых систем, как трещины скола, отрыва, раздавливания. Неудовлетворительное состояние слабой вывалоопасной кровли в значительной степени усиливается наличием в горном массиве разных пликативных, дизъюнктивных нарушений, и особенно, соотношением мощностей и прочностных характеристик литологических отдельностей пород кровли, которые тяжело поддаются прогнозированию и предварительному выявлению. Вывалы пород непосредственной кровли в призабойное пространство приводят к значительным материальным затратам на ликвидацию их последствий и существенно снижают безопасность работ в лаве.

МЕТОДИКА

В программном комплексе «Solidworks» была создана трехмерная модель (рис. 1) участка очистного забоя для проведения инженерного анализа на прочность пород кровли над опорным контуром лавы и выявления напряжений, впоследствии приводящих к образованию вывала. Модель выполнена для условий 1-й северной лавы группового уклона пласта l_1 ОП «Шахты «Стаханова». Длина лавы составляла 280 м. Промышленные запасы – 569 тыс. т. Система управления кровлей – полное обрушение. Угольный пласт l_1 на участке ведения очистных работ имел сложное строение в составе двух угольных пачек и одного разделяющего породного прослоя, представленного глинистым сланцем мощностью от 0,04 до 0,10 м. Угольные пачки аналогичны по характеристике и представлены углем блестящим, тонко-полосчатым, с единичными включениями пирита в виде линз, с тонкими линзами фюзена,

вязким. Мощность верхней угольной пачки колебалась от 0,88 м до 1,0 м, мощность нижней от 0,20 м до 0,29 м, прочность $\sigma_{сж} = 15$ МПа. Общая мощность пласта в пределах выемочного поля составляла от 1,18 м до 1,34 м, при средней – 1,25 м. Непосредственная кровля представлена глинистым сланцем темно-серым, слоистым, неустойчивым – Б₂, с плоскостями притирания, мощностью от 0,0 м до 1,6 м.

Основная кровля представлена песчаником l_1Sl_2 от мелкозернистого до среднезернистого, кварцево-полевошпатовый, слоистый, выбросоопасный, водоносный мощностью от 6,4 м до 12,2 м (в отдельных интервалах выступал непосредственной кровлей).

На модели представлен очистной забой (вид сбоку), причем смоделированы вертикальные и горизонтальные нагрузки на массив, а также отпор секций крепи. Размеры модели 18x12 x25 м.

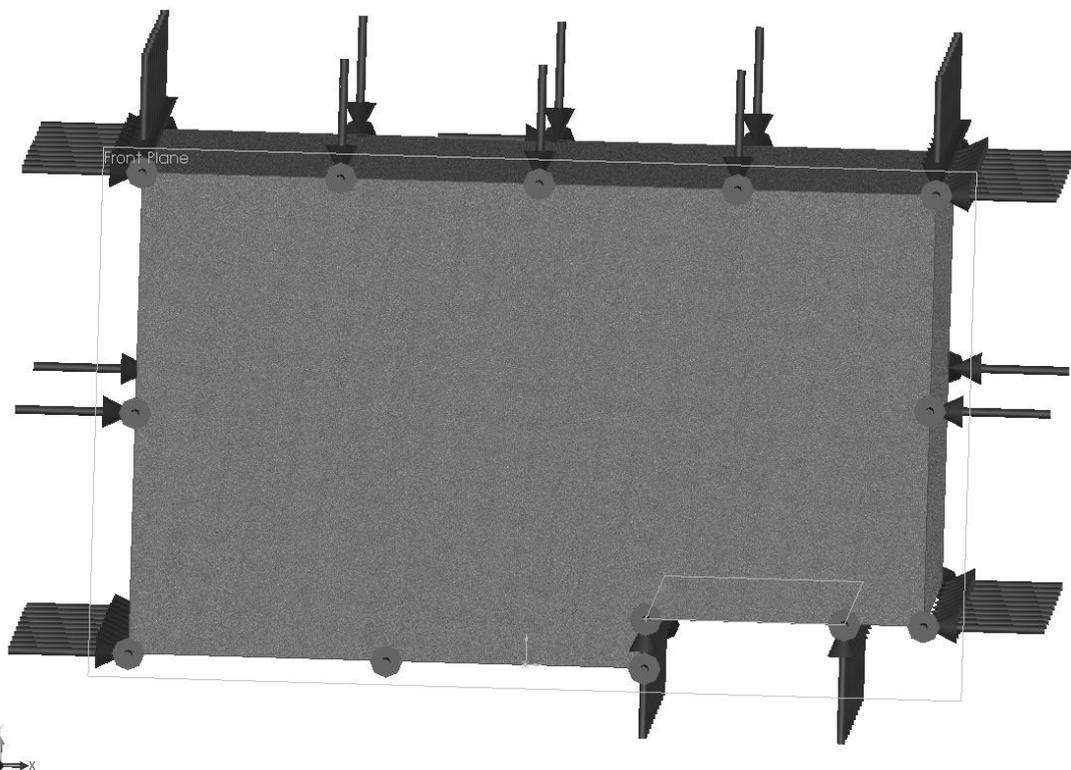
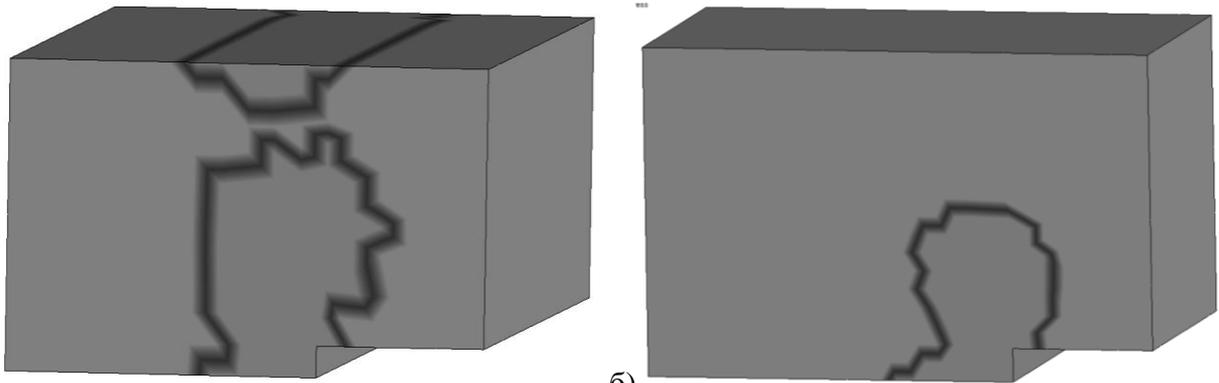


Рис. 1 – Модель участка очистного забоя с указанием приложенных нагрузок

Выполнив расчет, были получены две модели распределения разрушений над опорным контуром лавы (рис. 2), при различных способах управления кровлей. Причем, в первом случае (а) разрушение пород кровли происходит как над опорным контуром, формируя полость вывала в лаве, так и на верхней границе слоя пород кровли, приводя к зарождению трещины. А в случае (б) оставления опор в выработанном пространстве [1], мы получаем значительно меньшую зону разрушения причем только над опорным контуром. Кустовая армированная крепь, как способ оставления опор в выработанном пространстве, работает в качестве частичной закладки выработанного пространства. А при частичной закладке, как известно, породы кровли существенно устойчивее.



а)

б)

Рис. 2 – Модель распределения зон разрушений над опорным контуром лавы при условии: а) управления кровли полным обрушением; б) оставлении опор в выработанном пространстве

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Как известно, горные породы являются анизотропными, поэтому их механические свойства отличаются как в плоскости напластования, так и по мощности пласта. По мнению В. И. Кравченко [2] эта анизотропность объясняется как свойствами самого материала, так и условиями отложения и образования различных слоев.

Слоистость и трещиноватость приводят к уменьшению сопротивления на растяжение и прочностные характеристики пород. При этом установлено [2], что чем выше удельная трещиноватость, тем ниже являются указанные характеристики. Одним из факторов, влияющих на устойчивость и определяющих характер обрушения пород кровли, является слоистость. Устойчивость и характер обрушения определяется не общей мощностью кровли, а мощностью отдельных ее слоев: чем слабее связь между слоями и меньше их мощность, тем легче они обрушаются.

В. И. Кравченко [2] предлагает выразить устойчивость пород следующей зависимостью:

$$s = \frac{m \cdot \sigma_{ст} \cdot k}{H \cdot \gamma \cdot q} \quad (1)$$

где s – коэффициент устойчивости незакрепленной кровли;

$\sigma_{ст}$ – временный предел прочности на сжатие непосредственной кровли;

m – мощность пластовой отдельности непосредственной кровли;

k – величина, обратная площади незакрепленного пространства кровли;

H – глубина залегания пластовой отдельности;

γ – средний объемный вес пород, залегающих над углем;

$q = \sqrt{a}$ – коэффициент трещиноватости;

a – количество трещин на 1 м^2 кровли.

Но эта формула не учитывает скорость подвигания очистного забоя, что не позволяет получить достоверные результаты.

Целесообразно привести экспериментальные исследования Ю. Б. Грядущего [3], где он говорит о составляющих горного давления и их

влиянии на устойчивость пород кровли. Он отмечает, что решающее значение имеет не только структурный состав слоев кровли, но и свойства составляющих их пород и, в частности, прочность. В общем случае вклад породного слоя в динамическую составляющую горного давления тем больше, чем больше его мощность, прочность составляющих его пород и близость расположения к обнажению очистного забоя. Установленная особенность была использована Ю. Б. Грядущим для разработки критерия устойчивости кровли:

$$F = \frac{R}{k \cdot \gamma \cdot H} \cdot \frac{\ln T_d}{\left(\frac{R_0 \cdot h_0}{Y_0^2} + \sum_{i=1}^n \frac{R_i \cdot h_i}{Y_i^2} \right)^{\frac{\lambda}{1+n}}} \cdot \frac{P}{\ln t_0} \quad (2)$$

где R – средневзвешенная прочность пород кровли;

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} \frac{R_i \cdot h_i}{Y_i}}{\sum_{i=1}^{n+1} \frac{h_i}{Y_i}} \quad (3)$$

k – коэффициент концентрации горного давления;

H – глубина разработки;

γ – объемный вес пород;

T_d – долговечность пород кровли при их длительном обнажении;

R_0 – прочность основной кровли;

h_0 – мощность пород основной кровли;

Y_0 – расстояние от центра основной кровли к обнажению в очистном забое;

$\lambda=0,0017$ – эмпирический коэффициент;

R_i – прочность i -го слоя в массиве;

h_i – мощность i -го слоя в массиве;

y_i – расстояние от центра i -го слоя в массиве к обнажению в очистном забое;

t_0 – время обнажения пород кровли;

P – отпор крепи;

Критерий F (2) является величиной, обратно пропорциональной вероятности вывалообразования. Кроме того, Ю. Б. Грядущим был предложен комбинированный способ разгрузки-укрепления кровли путем гидроразрыва толщи и нагнетания скрепляющего состава. Эффект от этого мероприятия учитывает коэффициент концентрации в знаменателе формулы (2). Но следует отметить, что такой же эффект, по мнению автора, имеет и закладка выработанного пространства, поскольку она также уменьшает прогиб породных слоев кровли. С другой стороны, по мнению Ю. Б. Грядущего [3] закладка реализует эффект горизонтального подпора кровли, ограничивает сдвиги кровли в сторону выработанного пространства. Закладка частично дополняет роль крепления эффективным отпором в числителе формулы (2).

Н. В. Хозяйкина [4] предлагает использовать интегральный критерий прочности пород кровли:

$$a_{кр} = \frac{\sum R_{c_i}^k \cdot k_{c_i} \cdot h_i}{2 \cdot \gamma_{ср} \cdot \sum h_i} \quad (4)$$

где R_c – средневзвешенное значение предела прочности пород кровли на одноосное сжатие;

k_c – средневзвешенное значение коэффициента структурного ослабления пород кровли;
 γ_{cp} – среднее значение объемного веса горных пород;
 h_i – прочность i -го слоя горных пород кровли.

По мнению Н. А. Рязанцева [5] факт разрушения пород на опорном контуре означает, что действующие на ее контуре максимальные напряжения σ_{max} достигли или превысили предел прочности массива на объемное трехосное сжатие. Разрушение кровли – явный признак того, что в массиве максимальными по величине являются горизонтальные напряжения, т.е., что исходное напряженное состояние является гравитационно-тектоническим. Коэффициент концентрации вертикальных напряжений мало отличается от единицы, в то время как коэффициент концентрации горизонтальных напряжений на границе слоев различных литологических разностей достигает десяти [4].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Авторы исследовали поведение пород кровли очистных забоев ОП «Шахты «Стаханова» ГП «Красноармейскуголь». Непосредственная кровля 4-й южной лавы пласта l_1 была представлена глинистым сланцем (малоустойчивой - БЗ), мощностью $0,75 \div 2,20$ м, $\sigma_{сж} = 36$ МПа. А основную кровлю составлял песчаник мощностью до $6,70$ м и $\sigma_{сж} = 80-90$ МПа. Геологический разрез на рис. 3 иллюстрирует взаимодействие слоев кровли и характер вывалообразования в забое.

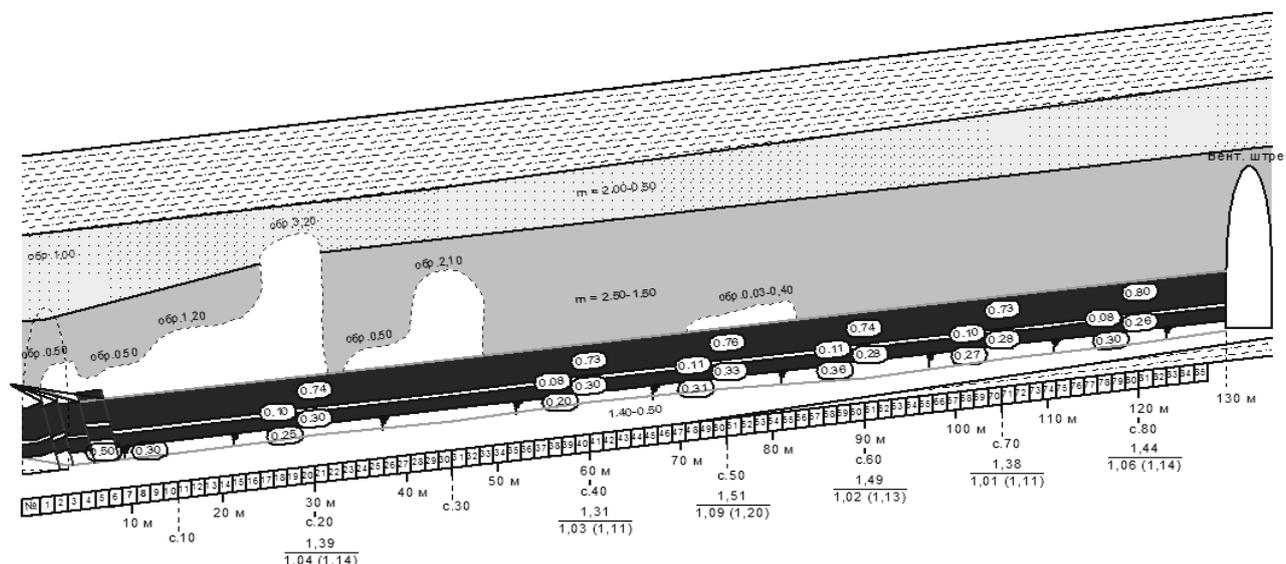


Рис. 3 – Геологический разрез по 4-й южной лаве пласта l_1 ОП «Шахты «Стаханова»

Анализ геологических разрезов по длине очистного забоя 1-й северной лавы группового уклона пласта l_1 ОП «Шахты «Стаханова» показал, что максимальные зоны вывалов были зафиксированы в момент первичной посадки основной кровли, а также при максимальном приближения песчаника основной кровли к пласту.

При первичной посадке основной кровли на расстоянии 210 м от разрезной печи на протяжении 30 м подвигания лавы происходили заколы в кровле очистного забоя и наблюдалась интенсификация вывалов непосредственной кровли в центральной части лавы (рис. 4). Высота купола этих вывалов составляла от 0,6 м до 1,6 м, а размер полостей вывалов разуплотненного песчаника на отдельных участках лавы достигал 1 м.



Рис. 4 – Распределение зон вывалов по площади выемочного поля 1-й северной лавы пласта I₁ ОП «Шахты «Стаханова»

Ранее авторами [6] было установлено, что на количественные показатели критерия вывалообразования в большей степени влияют: эффективная поверхностная энергия пород кровли, скорость подвигания очистного забоя, долговечность пород кровли при обнажении, наличие зон ПГД в выемочном поле лавы, наличие в кровле пласта естественной плоскости расслоения в виде слоев угля или резкого контакта слоев пород различных литологических разностей, ориентирование естественной системы трещин в направлении забоя, изменение литологии пород кровли над забоем.

При чем оказалось, что такой показатель, как глубина ведения очистных работ не имеет существенного влияния на формирование полости вывала в кровле очистного забоя.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Поэтому, с учетом вышесказанного, предлагаемый критерий вывалоопасности пород кровли имеет вид:

$$k_{\text{виз}} = \frac{k \cdot \gamma \cdot N \cdot h}{\sqrt{\frac{E \cdot \gamma_s \cdot v \cdot m_{\text{НК}} \cdot T}{b \cdot m_{\text{ОК}}}}} \quad (5)$$

где k – значение коэффициента концентрации горного давления;

γ – значение объемного веса пород кровли, Н/м³;

N – количество трещин на м² кровли, шт;

h – расстояние от мощного слоя основной кровли до обнажения кровли в очистном забое, м;

T – долговечность пород кровли при обнажении, сутки;

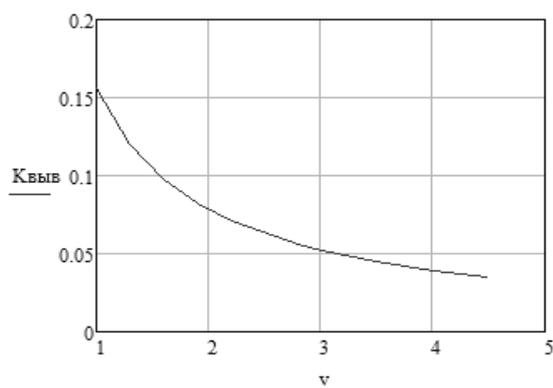
b – расстояние между берегами трещин, м;

E – модуль Юнга, ГПа;

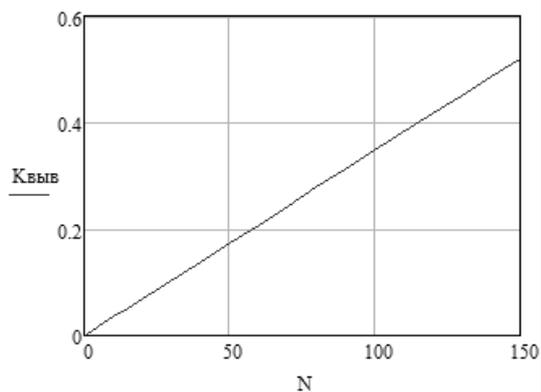
γ_s – поверхностная энергия, Дж/м²;

v – скорость подвигания очистного забоя, м/сут;

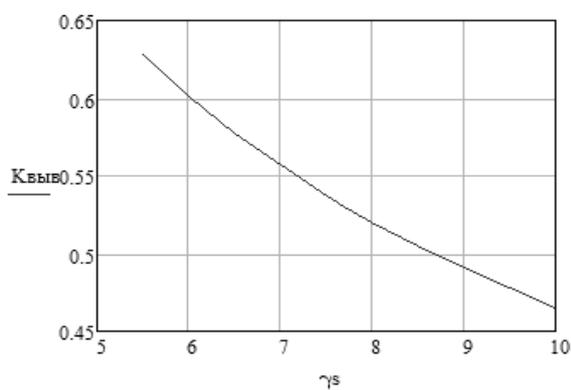
$\frac{m_{\text{НК}}}{m_{\text{ОК}}}$ – отношение мощностей пород непосредственной и основной кровель.



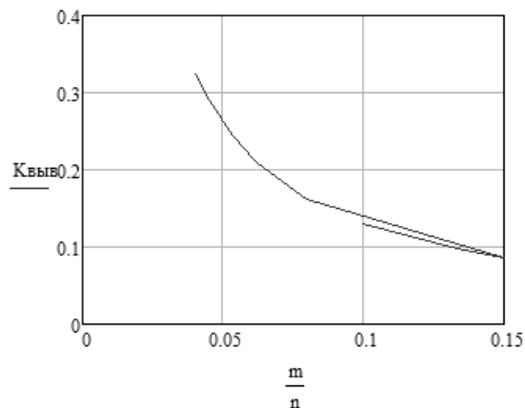
а)



б)



в)



г)

Рис. 5 – Графики зависимости критерия вывалообразования от: а) скорости подвигания очистного забоя (v); б) количества трещин (N); в) эффективной поверхностной энергии (γ_s); г) изменения литологических разностей кровли ($\frac{m_{нк}}{m_{ок}}$)

ВЫВОДЫ

Приведенные графики (рис. 5) иллюстрируют зависимость критерия вывалообразования от основных составляющих. Да, разумеется, что рост трещин в массиве приводит к снижению его устойчивости и, соответственно, к повышению вероятности вывалообразования. Тогда как изменение литологии пород кровли имеет особенность: при минимальной мощности пород непосредственной кровли ($m_{нк}/m_{ок} < 0,05$), она, в силу плохого межслоевого контакта, ведет себя как «ложна» кровля и отслаивается от кровли сразу после выемки угля. А при увеличении мощности непосредственной кровли она ведет себя более устойчиво, но к определенному моменту. Когда соотношение литологических разностей кровли ($m_{нк}/m_{ок}$) достигает 0,15 происходит обратное действие и вероятность вывалообразования снова растет.

Поэтому, учитывая указанные изменения, для условий 4-й южной лавы пласта l_1 ОП «Шахты «Стаханова» критерий вывалообразования составил 0,52. Это означает, что вывалы пород кровли происходят довольно часто, что и подтверждают проведенные натурные наблюдения (рис. 3,4).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пат. № 75593 UA, МПК E21D 15/00 (2012.01). Кушове армоване кріплення / Г.І. Соловійов, О.Ю. Білогуб, С.В. Чуяшенко, А.Л. Касьяненко; заявник і патентовласник ДонНТУ. – у 2012 05417; заявл. 03.05.2012; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 23. – 4 с.: іл.
2. Кравченко В.И. Предупреждение завалов очистных забоев //В. И. Кравченко – М.: Недра, 1970 – 200 с.
3. Грядущий Ю. Б. Геомеханические основы управления вывалоопасными кровлями в очистных забоях / Автореферат на соискание уч. степени доктора технических наук. – Днепропетровск, 1997. – 35с.
4. Хозяйкина Н.В. Закономірності зміни граничного напруженого стану у складно структурній покрівлі лав положистих вігульних пластів. Автореферат на здобуття наук. ступеня канд. техн. Наук /Н.В.Хозяйкина – Дніпропетровськ, 2004.– 18 с.
5. Рязанцев Н.А. О чем свидетельствует наличие вывалов в кровле и пучение почвы в выработках ОП «Шахта «Стаханова» /Н.А. Рязанцев, А.Н Рязанцев., Н.А Рязанцева. // 36. матеріалів регіональної наук.-практ. конф. «Проблеми гірничої технології», КІІ ДонНТУ, 30 лист.2012 р. – Донецьк: ООО «Цифровая типография», 2012. – с.42-45.
6. Белогуб О.Ю. Критерій вивалонебезпечності порід покрівлі очисних вибоїв глибоких шахт // О. Ю. Белогуб, Г.И. Соловьев, Я.О. Ляшок // 36. матеріалів V регіональної наук.-практ. конф. «Дні науки-2013», 23 травня 2013. – Красноармійськ: КІІ ДонНТУ, 2013 р. Т.1. – с. 52-55.

REFERENCES

1. Pat. № 75593 UA, МПК E21D 15/00 (2012.01). Kustivaia armirovannaia krep / G. I. Soloviev, O. I. Bilogub, S. V. Chuiashenko, A. L. Kasianenko – u 2012 05417; 03.05.2012; published 10.12.2012, bul. № 23. – 4 с.: pic.
2. Kravchenko V.I. (1970), *Preduprezhdenie zavalov lav* // V.I. Kravchenko, Nedra, Moskov, Russia.
3. Griadushii I.B. (1997), *Geomechanicheskie osnovi upravlenia vivaloopasnimy krovliami ocsisnich zaboev* // I.B. Griadushii, Dnepropetrovsk, Ukraine.
4. Hoziaikina N.V. (2004), *Zakonomirnosti zminu granichnogo stany...* // N.V. Hoziaikina, Dnepropetrovsk, Ukraine.
5. Riazantsev N.A. (2012), *O chem svidetelstvyet nalichie vivalov krovli...* // N.A Riazantsev, Krasnoarmeisk, Ukraine.
6. Bilogub O. I. (2013), *Kriterii vivalonebezpechnosti pored pokrivli...* // O. I. Bilogub, Krasnoarmeisk, Ukraine.

Об авторах

Белогуб Оксана Юрьевна, аспирант каф. РПМ, ДонНТУ, ассистент каф. ГиОТ КИИ ДонНТУ, Донецк, Украина, oxana.belogub@gmail.com

Соловьев Геннадий Иванович, кандидат технических наук, доцент каф. РПМ ДонНТУ, Донецк, Украина, gisoloviev@gmail.com

Бачурин Леонид Леонидович, кандидат технических наук, доцент каф. ГиОТ КИИ ДонНТУ, Красноармейск, Украина, lbachurin@gmail.com

Сергиенко Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент каф. ГиОТ КИИ ДонНТУ, Красноармейск, Украина

Федоренко Михаил Викторович, магистрант КИИ ДонНТУ, Красноармейск, Украина

Козырь Сергей Викторович, аспирант ИФГП НАН Украины, начальник участка ОП «Шахта «Трудовская» ГП «ДУЭТ»

About the authors

Bilogub Oksana Iuriivna, doctoral Student of DonNTU, Donetsk, Ukraine, oxana.belogub@gmail.com

Gennadii Ivanovich Soloviev, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor DonNTU, Donetsk, Ukraine, gisoloviev@gmail.com

Leonid Leonidovich Bachurin, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor KII DonNTU, Krasnoarmeisk, Ukraine, lbachurin@gmail.com

Aleksandr Ivanovich Sergienko, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor KII DonNTU, Krasnoarmeisk, Ukraine

Michail Victorovich Fedorenko, M.S (Tech.) KII DonNTU, Krasnoarmeisk, Ukraine

Sergei Victorovich Kozir, Doctoral Student of IFMP NASU, Donetsk, Ukraine

Анотація. У статті представлені результати аналізу вивалоутворення порід покрівлі у очисних вибоях на підставі узагальнення геологічних розрізів по довжині лави і вимірів куполів вивалів при різних літологічних складах порід покрівлі. Аналіз критеріїв стійкості порід покрівлі виявив складності в отриманні коректних даних для підрахунку за існуючими на даний момент критеріям. Також була виконано математичне моделювання процесу формування вивалу в очисному вибої в програмному комплексі «Solidworks». На підставі отриманих даних запропоновано критерій вивалоутворення порід покрівлі, що включає в себе останні розробки енергетичних критеріїв теорії руйнування.

Для умов ВП «Шахта «Стаханова» ДП «Красноармійськвугілля» було отримано чисельне значення критерію вивалоутворення за запропонованою авторами методикою.

Ключові слова: ефективна поверхнева енергія, вивал, стійкість, потужність

Annotation. There are results of the analysis formation of falling roof rock in coal face which are based on the geological sections along the length of the coal face and domes of falling rocks measurements at different lithology of the roof. Analysis of the sustainability criteria of the roof rocks revealed difficulties in obtaining valid data for calculation of existing criteria at the moment. Mathematical modeling of the formation of falling roof rock in the working coal face was also performed using program complex "Solidworks". The criterion of falling roof rocks, which includes the latest developments of energy theory of failure criteria was proposed based on those data.

Numerical value of the criterion of falling roof rock in coal face were got by the method authors proposed for the conditions of the DP "Mine "Stakhanova" GP "Krasnoarmeyskugol".

Keywords: effective surface energy, inrush, stability, layer thickness