

*Кизияров О.Л.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КРОВЛИ В ЛАВЕ, УПРОЧНЕННОЙ БЕСШПУРОВЫМИ СПОСОБАМИ

Наведені результати досліджень впливу висоти вивалу та структурно-міцнісних властивостей масиву на стійкість покрівлі очисного вибою, що зміцнена безшпуровими способами.

Ключові слова: *тріщинуватість, стійкість, вивалоутворення.*

Приведены результаты исследований влияния высоты вывала и структурно-прочностных свойств массива на устойчивость кровли очисного забоя, упрочненной бесшпуровыми способами.

Ключевые слова: *трещиноватость, устойчивость, вывалообразование.*

Упрочнение неустойчивой кровли в очистном забое является необходимым мероприятием, обеспечивающим стабильность работы лавы, снижение себестоимости добываемого угля и повышение безопасности ведения работ. Перспективным направлением является применение бесшпуровых способов упрочнения - набрызга скрепляющих составов на поверхность вывала и заполнение пустот вспенивающимися составами, характеризующихся технологичностью и меньшей трудоемкостью по сравнению с традиционными способами.

Получены параметры технологий аналитическим решением [1, 2], а также численным моделированием [3]; известны область применения и параметры набрызгбетонной крепи для подготовительных выработок [4], однако применительно к очистному забою, не достаточно исследована устойчивость упрочненной кровли.

Цель работы - исследование устойчивости кровли в лаве при ее упрочнении бесшпуровыми способами для обоснования области применения технологий.

Объект исследования - технологии бесшпурового упрочнения неустойчивой кровли в лаве.

Предмет исследования - состояние кровли в лаве, упрочненной бесшпуровыми способами.

Для достижения поставленной цели в работе использован комплексный метод, включая численное моделирование и метод статистической обработки результатов.

В качестве численного метода принят метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в программном комплексе Ansys. В модели приняты усредненные для шахт Донбасса горно-геологические условия: глубина разработки $H = 660$ м, вынимаемая мощность пласта $m = 1,2$ м. Направление отработки пласта - по простиранию.

Неустойчивый слой кровли представлялся блочной средой, образованной пересечением систем трещин. Размеры блоков от 0,2 м (интенсивность трещиноватости $n_{тр} = 5$ шт./м - сильнотрещиноватые) до 1 м ($n_{тр} = 1$ шт./м - малотрещиноватые породы). Мощность неустойчивой кровли варьировалась в пределах $h_{н.к} = 0,6 \dots 2,4$ м.

Исследование проводилось на основании решения контактных задач, в которых взаимодействие происходит не только по узлам, но и контактируемым поверхностям [5]. Принятый тип контакта - податливо-податливый (*flexible-to-flexible*). Между поверхностями (берегами трещин) применено условие трения Кулона

$$|\tau| \leq -\gamma \cdot \sigma, \text{ МПа}, \quad (1)$$

где γ - коэффициент трения покоя;
 σ - нормальные напряжения, МПа.

Коэффициент трения "порода - порода" для большинства горных пород колеблется в пределах 0,33...0,45 и окончательно принят в расчетах равным $\gamma = 0,37$.

В качестве критерия устойчивости в данной работе принято отсутствие перемещения блоков нарушенной кровли, т.е. выполнение условия (1).

На первом этапе смоделирован способ упрочнения набрызгом скрепляющих составов. С целью определения области применения, а также оценки состояния кровли, упрочненной данным способом, решен ряд контактных задач, результаты которых сведены в таблицу 1.

Проанализируем полученные результаты. При высоте вывала до 1 м (при плотности трещиноватости $n_{тр} = 3$ шт./м) наносимого на поверхность слоя достаточно для удержания нарушенной кровли. При большей высоте вывала происходит обрушение. При интенсивности трещиноватости $n_{тр} \leq 2$ шт./м (малотрещиноватые и средней трещиноватости) обрушение кровли не происходит, причем, как показали дальнейшие исследования при любой высоте вывала.

Как уже было сказано, при интенсивности трещиноватости $n_{тр} = 3$ шт./м обрушение происходит при высоте вывала более 1 м. Дальнейшее увеличение $n_{тр}$ приводит к обрушению кровли при любом значении высоты вывала (h_v).

Таблица 1 - Результаты решения задач моделирования набрызга состава на поверхность вывала

№ задачи	$h_{в}$, м	$n_{тр}$, шт./м	$\sigma_{сж}$, МПа	Состояние кровли
1	2	3	4	5
1	0,66	3	40	не обрушается
2	1,0	3	40	не обрушается
3	1,33	3	40	обрушается
4	1,66	3	40	обрушается
5	2,0	3	40	обрушается
6	2,33	3	40	обрушается
7	1,0	1	40	не обрушается
8	1,0	2	40	не обрушается
9	1,0	4	40	обрушается
10	1,0	5	40	обрушается
11	1,0	3	20	не обрушается
12	1,0	3	30	не обрушается
13	1,0	3	50	не обрушается
14	1,0	3	60	не обрушается

Предел прочности пород нижнего слоя кровли для упрочнения набрызгом не оказал влияние на состояние кровли в лаве.

На рисунке 1 представлена схема обрушения блоков неустойчивой кровли для условий задачи №9.

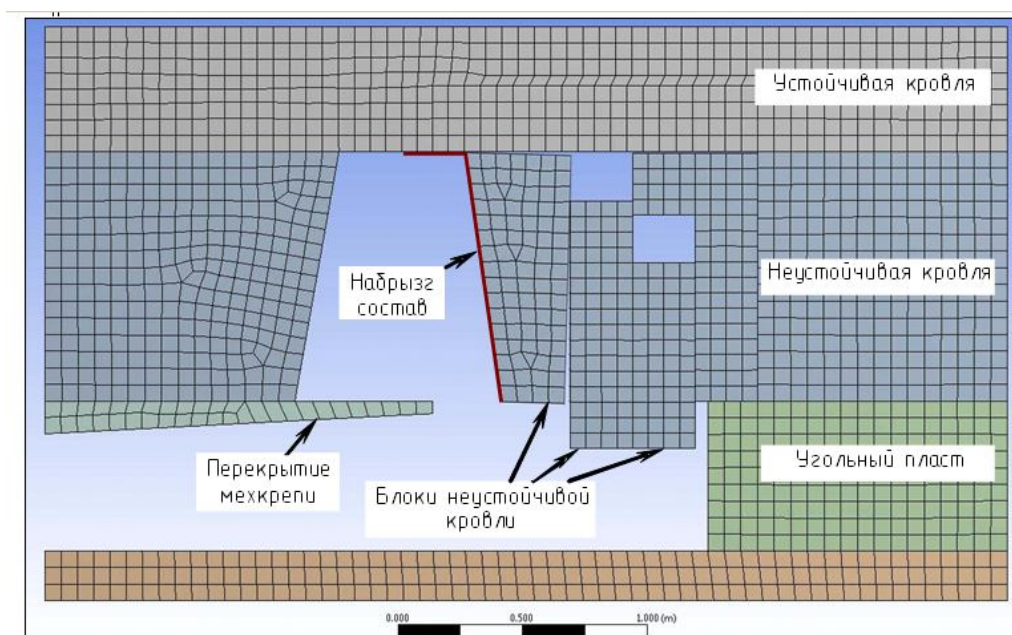


Рисунок 1 - Схема обрушения кровли, упрочненной набрызгом

Из приведенного рисунка видно, что неупрочненные блоки обрушаются, а блоки, склеенные набрызг-составом - проворачиваются в сторону вывала, но удерживаются.

С целью установления количественного влияния исследуемых факторов на состояние кровли, упрочненной набрызгом скрепляющих составов, далее рассмотрены две статистические модели:

- модель дискриминантного анализа, применяемая для исследования групповых различий по определенным признакам (факторам);

- модель бинарных откликов (*logit*-модель), применяемая в случаях, когда переменная отклика принимает лишь два значения. Эти две модели отличаются способом вычисления коэффициентов [6], и поэтому будут давать разную достоверность прогноза. Для нахождения коэффициентов статистических моделей использована программа "Statistica 10".

При выполнении дискриминантного анализа получены функции:

- для класса "обрушение кровли"

$$f_{\text{обр.}} = 9,41 \cdot h_{\text{в}} + 5,79 \cdot n_{\text{тр}} - 20,9; \quad (2)$$

- для класса "необрушение кровли"

$$f_{\text{необр.}} = 6,49 \cdot h_{\text{в}} + 3,28 \cdot n_{\text{тр}} - 8,36. \quad (3)$$

Выбор для конкретных условий класса, соответствующего обрушению либо устойчивому состоянию кровли, осуществляется по максимальному значению классификационной функции.

После вычитания функции (2) из (3), получаем итоговую функцию для определения соответствующего класса

$$f_{\text{обр.д.а.}} = 2,92 \cdot h_{\text{в}} + 2,51 \cdot n_{\text{тр}} - 12,5. \quad (4)$$

Если значение функции (4) меньше 0, то обрушение упрочненной кровли не происходит, в противном случае - обрушается.

Далее получена модель бинарного отклика (рисунок 2), позволяющая определить вероятность обрушения упрочненной кровли.

Ниже приведена модель бинарного отклика в функциональном виде

$$f_{\text{обр.б.о.}} = 4,29 \cdot h_{\text{в}} + 2,93 \cdot n_{\text{тр}} - 16,2. \quad (5)$$

Данная функция интерпретируется аналогично функции (4).

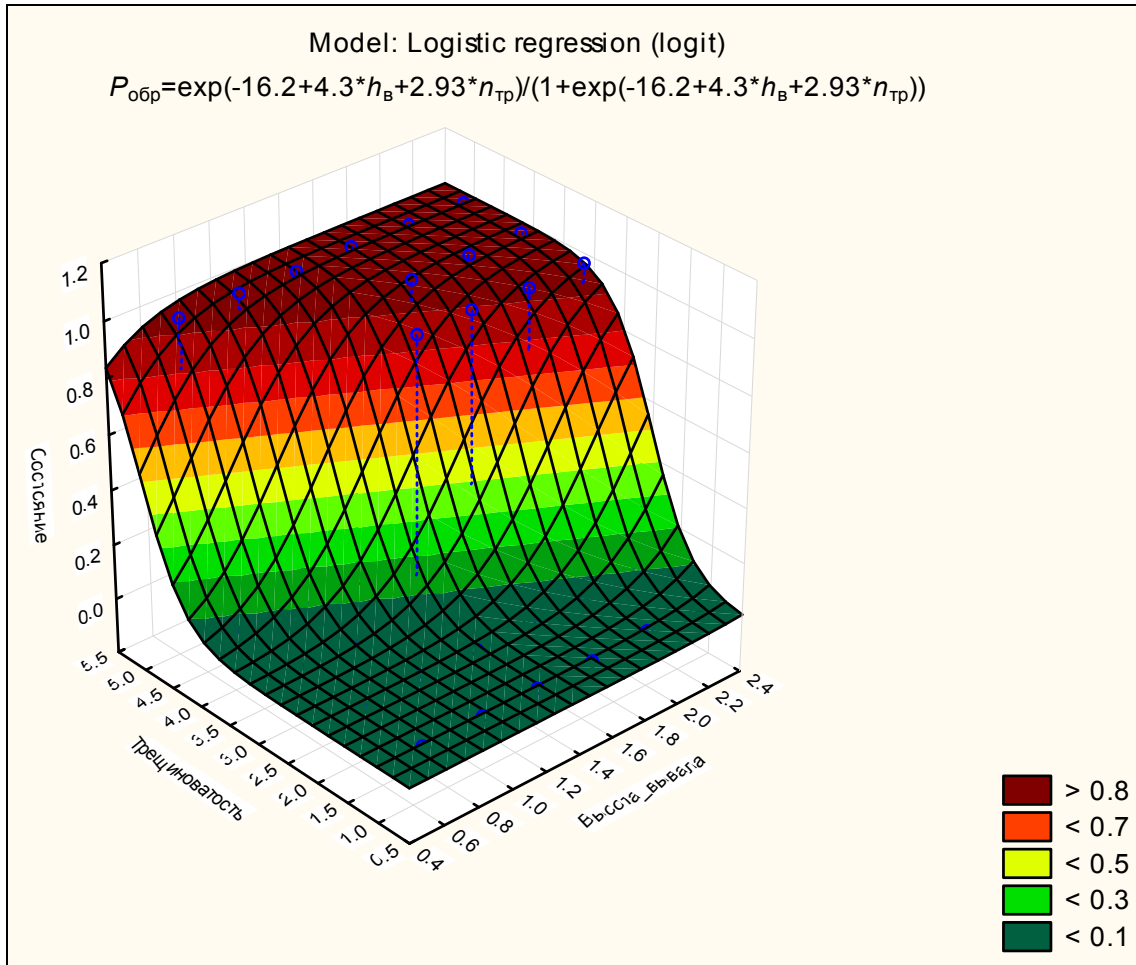


Рисунок 2 - Графическое представление модели бинарного отклика для набрызга скрепляющего состава на поверхность вывала

После расчета достоверности прогноза полученных зависимостей, установлено, что модель бинарных откликов дает лучшую сходимость с результатами численного моделирования (достоверность прогноза 90%), чем модель дискриминантного анализа (достоверность 87%).

На основании уравнения (5) получено условие, при котором целесообразно применение технологии упрочнения набрызгом составов

$$h_{\text{в}} + 0,7 \cdot n_{\text{тр}} \leq 4. \quad (6)$$

Также получена формула определения вероятности обрушения кровли

$$P_{\text{обр. наб.}} = 1 - [1 + \exp(4,29 \cdot h_{\text{в}} + 2,93 \cdot n_{\text{тр}} - 16,2)]^{-1}. \quad (7)$$

Бесшпуровой способ упрочнения путем набрызга скрепляющих составов опробован на шахтах "Луганская-1", 19-го Партсъезда и "Фа-

щевская" [2]. Высота вывала изменялась в пределах $h_b = 0,4 \dots 1,4$ м; интенсивность трещиноватости неустойчивой кровли $n_{тр} = 2 \dots 5$ тр/м. Обрушение упрочненной кровли наблюдалось на одном экспериментальном участке 1 западной лавы пл. l_1 ш. 19-го Партсъезда, с применением композиции на основе карбамидной смолы КС-СОН-0.1П, характеризующейся низким значением (до 1,0 МПа) предела прочности на растяжение. В остальных случаях, применение полиуретанового состава и карбамидной смолы МФФ-М дало положительный результат, и обрушение упрочненной кровли не происходило.

На следующем этапе моделировалось заполнение куполообразований в кровле пласта. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты решения задач моделирования заполнения куполообразований

№ задачи	$h_{н.к},$ м	$n_{тр},$ шт./м	$\sigma_{сжк},$ МПа	$E_3,$ МПа	Состояние кровли в лаве при высоте заполнителя		
					50% (задача а)	75% (задача б)	100% (задача в)
1	0,66	3	40	5	не обрушается	не обрушается	не обрушается
2	1,0	3	40	5	не обрушается	не обрушается	не обрушается
3	1,33	3	40	5	обрушается	не обрушается	не обрушается
4	1,66	3	40	5	обрушается	обрушается	не обрушается
5	2,0	3	40	5	обрушается	обрушается	не обрушается
6	2,33	3	40	5	обрушается	обрушается	не обрушается
7	1,0	1	40	5	не обрушается	не обрушается	не обрушается
8	1,0	2	40	5	не обрушается	не обрушается	не обрушается
9	1,0	4	40	5	обрушается	обрушается	обрушается
10	1,0	5	40	5	обрушается	обрушается	обрушается
11	1,0	3	20	5	обрушается	обрушается	обрушается
12	1,0	3	30	5	обрушается	обрушается	не обрушается
13	1,0	3	50	5	не обрушается	не обрушается	не обрушается
14	1,0	3	60	5	не обрушается	не обрушается	не обрушается
15	1,0	3	40	0,5	обрушается	обрушается	обрушается
16	1,0	3	40	50	не обрушается	не обрушается	не обрушается

Как видно из таблицы 2, при высоте вывала $h_b = 0,66 \dots 1,0$ м при прочих средних значениях параметров обрушение кровли не происхо-

дит при любой высоте заполнителя. При высоте вывала 1,33 м минимальный процент заполнения купола для обеспечения устойчивости нарушенной кровли составляет 75%, а при высоте вывала 1,66 м кровля сохраняет устойчивость только при 100% заполнении.

Дальнейшее увеличение высоты вывала приводит к обрушению кровли. При величине плотности трещиноватости $n_{тр} \leq 3$ обрушение нарушенной кровли не происходит, а при большем значении кровля обрушается, причем при любом проценте заполнения пустот. Также обрушение нижнего слоя кровли происходит при прочности пород $\sigma_{сж} < 30$ МПа. При $\sigma_{сж} = 30$ МПа кровля обрушается только при неполном заполнении купола, а при $\sigma_{сж} = 40$ МПа устойчивость кровли сохраняется, что обеспечено горизонтальным распором.

На рисунке 3 представлена схема обрушения кровли при заполнении куполообразования, полученная в ходе решения задачи №9.

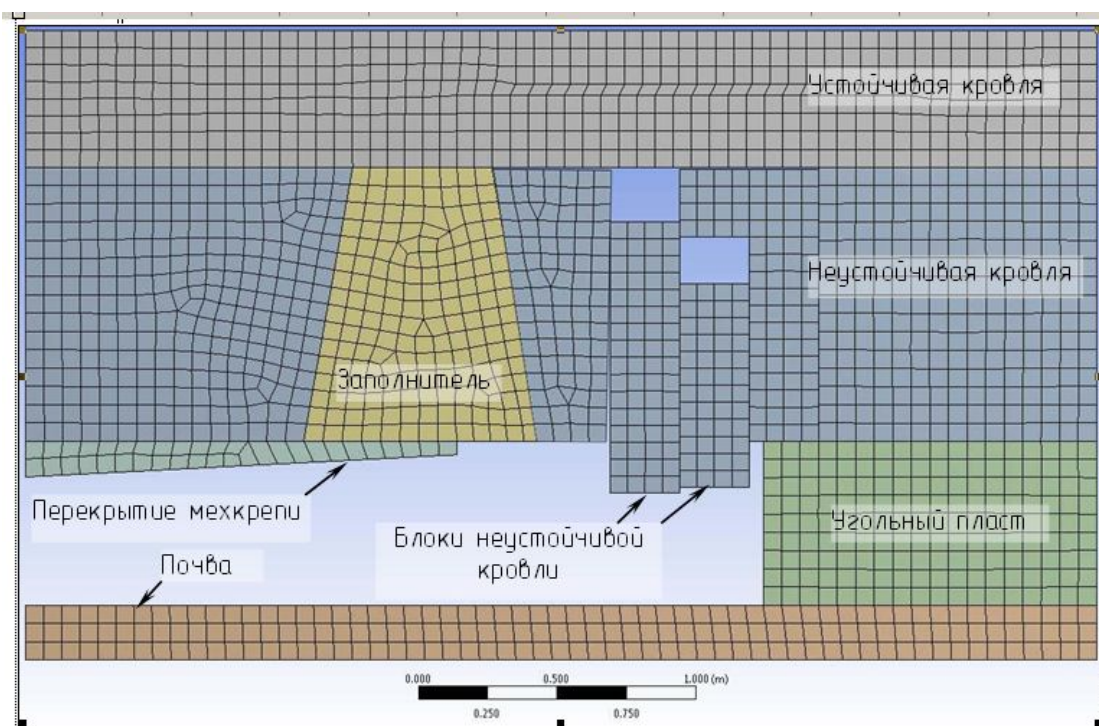


Рисунок 3 - Схема обрушения кровли при заполнении куполообразования

На рисунке заметны перемещения блоков, не контактирующих с заполняемым материалом. С блоками пород, контактирующих с заполнителем, происходит перемещение в сторону вывала, деформируя заполняющий материал.

При выполнении дискриминантного анализа получены функции:
- для класса "обрушение"

$$f_{\text{обр.}} = 6,9 \cdot h_{\text{в}} + 5 \cdot n_{\text{тр}} + 0,56 \cdot \sigma_{\text{сж}} + 15,9 \cdot h_{\text{з}} - 30; \quad (8)$$

- для класса "необрушение"

$$f_{\text{необр.}} = 4,6 \cdot h_{\text{в}} + 2,8 \cdot n_{\text{тр}} + 0,8 \cdot \sigma_{\text{сж}} + 21 \cdot h_{\text{з}} - 32; \quad (9)$$

- итоговая функция

$$f_{\text{обр.д.а}} = 2,3 \cdot h_{\text{в}} + 2,2 \cdot n_{\text{тр}} - 0,24 \cdot \sigma_{\text{сж}} - 5,1 \cdot h_{\text{з}} + 2. \quad (10)$$

Также получена модель бинарного отклика

$$\begin{aligned} f_{\text{обр.б.о}} &= 2,46 \cdot h_{\text{в}} + 19 \cdot n_{\text{тр}} - 0,302 \cdot \sigma_{\text{сж}} - 7 \cdot h_{\text{з}} - 44,3 \sim \\ &\sim h_{\text{в}} + 7,7 \cdot n_{\text{тр}} - 0,12 \cdot \sigma_{\text{сж}} - 2,9 \cdot h_{\text{з}} - 18. \end{aligned} \quad (11)$$

Сравнительная оценка достоверности прогноза обрушаемости кровли при заполнении куполообразований показала, что модель дискриминантного анализа дает 88% сходимости с результатами численного моделирования, а модель бинарных откликов - 92%.

Исходя из формулы (11) высота заполнителя составит

$$h_{\text{з}} = 0,35 h_{\text{в}} + 2,7 \cdot n_{\text{тр}} - 0,041 \cdot \sigma_{\text{сж}} - 6,2, \text{ дол. ед.} \quad (12)$$

Способ упрочнения с заполнением куполообразований может применяться при соблюдении неравенства

$$0,35 h_{\text{в}} + 2,7 \cdot n_{\text{тр}} - 0,041 \cdot \sigma_{\text{сж}} \leq 7,2. \quad (13)$$

Вероятность обрушения кровли при заполнении куполообразований

$$P_{\text{обр.}}^{\text{зап.}} = 1 - [1 + \exp(2,46 \cdot h_{\text{в}} + 19 \cdot n_{\text{тр}} - 0,302 \cdot \sigma_{\text{сж}} - 7 \cdot h_{\text{з}} - 44,3)]^{-1}. \quad (14)$$

Выводы:

1) Для упрочнения набрызгом скрепляющих составов:

- получены уравнения для прогноза обрушения упрочненной кровли в лаве, а также целесообразности применения данной технологии упрочнения;

- результаты шахтных опробований подтверждают условие (6), предложенное для прогнозирования возможности применения технологии упрочнения путем набрызга составов.

2) Для упрочнения заполнением куполообразований:

- при отсутствии заполнителя, будет наблюдаться сползание отслоившихся пород, а в случае заполнения куполообразований происходит распор и удержание отслоившихся пород, что предотвращает их дальнейшие перемещения;

- получены уравнения по определению высоты заполнителя, а также целесообразности применения данного способа упрочнения;

- в целом, при упрочнении кровли заполнением куполообразований, состояние кровли несколько лучше, чем при набрызге составов на поверхность вывала.

3) Установлено, что модель бинарных откликов для прогнозирования обеспечения устойчивости упрочненной кровли, дает больший процент сходимости с результатами численного моделирования, чем модель дискриминантного анализа.

Библиографический список

1. Клишин Н.К. Геомеханические основы системы контроля состояния и параметров упрочнения кровли в очистных забоях: дис. докт. техн. наук: спец. 05.15.02 / Клишин Николай Кузьмич. – Донецк, 1994. – 351 с.

2. Беспуровой способ упрочнения кровли в лаве: [монография] / Клишин Н.К., Марченко Г.А. – Алчевск: ДГМИ, 1999. – 96 с.

3. Кизияров О.Л. Обоснование параметров технологии беспурового упрочнения неустойчивой кровли в лаве / О.Л. Кизияров // Сб. научн. трудов ДонГТУ. - Алчевск, 2011. - Вып.34. – С. 73-80.

4. СНиП II-94-80. Подземные горные выработки / Госстрой СССР. – М. : Стройиздат, 1982. – 30 с.

5. Лукьянова А.Н. Моделирование контактной задачи с помощью программы ANSYS: [учеб.-метод. пособие] / А.Н. Лукьянова. - Самара; Самар. гос. техн. ун-т, 2010. - 52 с.

6. Халафян А.А. Статистический анализ данных: учебник, 3-е изд. / А.А. Халафян. - М.: ООО "Бином-Пресс", 2007. - 512 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Клишиным Н.К.