

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

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СКРЕПЛЯЮЩЕГО СОСТАВА ПРИ УПРОЧНЕНИИ НЕУСТОЙЧИВОЙ КРОВЛИ В ЛАВЕ НАГНЕТАНИЕМ**

*Наведені результати досліджень впливу властивостей нестійкої покрівлі, а також параметрів технології зміцнення нагнітанням зміцнюючих речовин на процес фільтрації.*

**Ключові слова:** нагнітання, зміцнюючі речовини, проникність.

*Приведены результаты исследований влияния свойств неустойчивой кровли, а также параметров технологии упрочнения нагнетанием на распространение скрепляющих составов.*

**Ключевые слова:** нагнетание, скрепляющие составы, проницаемость.

С целью сохранения темпов подвигания очистных забоев, повышения безопасности ведения работ, а также снижения себестоимости добываемого угля в условиях сильно трещиноватых ( $q > 4$  шт/м) неустойчивых кровель в лаве, наибольшее распространение получил способ упрочнения нагнетанием в кровлю скрепляющих составов. Рекомендемые нормативным документом [1] параметры нагнетания не учитывают закономерности распространения состава, что приводит к перерасходу дорогостоящего скрепляющего состава, и, как следствие, повышению себестоимости добываемого угля.

В работе [2] установлено, что проницаемость нарушенных пород изменяется в широких пределах не только в глубь массива, но и зависит от направления относительно плоскости напластования, т.е. обладает анизотропией.

При обосновании параметров технологии упрочнения нагнетанием необходимо учитывать анизотропию проницаемости, параметры расположения шпуров, что позволит уменьшить расход скрепляющего состава, улучшить состояние кровли, а так же снизить себестоимость технологии упрочнения.

Цель работы - исследование распространения скрепляющего состава при упрочнении неустойчивой кровли в лаве нагнетанием.

Объект исследования - технология упрочнения неустойчивой кровли в лаве нагнетанием скрепляющих составов.

Предмет исследования - границы распространения скрепляющего состава в массиве неустойчивой кровли при ее упрочнении нагнетанием.

Для достижения поставленной цели разработана параметрическая модель нарушенного массива, с помощью которой решены 20 задач.

Основное из принятых допущений - проницаемость угольного пласта и устойчивого слоя кровли бесконечно мала по сравнению с проницаемостью упрочняемой неустойчивой кровли.

На рисунке 1 приведена расчетная схема применительно к моделированию упрочнения неустойчивых пород нагнетанием скрепляющих составов.

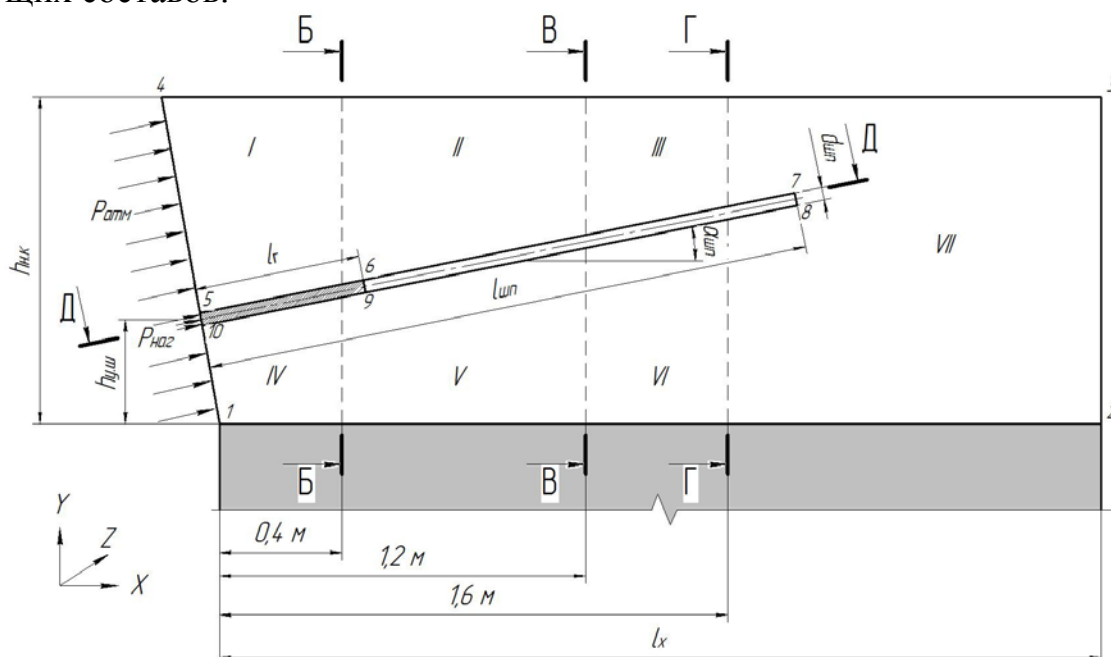


Рисунок 1 - Расчетная схема к моделированию упрочнения неустойчивых пород нагнетанием скрепляющих составов

На рисунке 1 представлено:

$h_{н.к}$  - мощность неустойчивой кровли, м;

$h_{у.ш}$  - высота расположения устья шпура от пласта, м;

$l_r$  - глубина герметизации шпура, м;

$d_{шп}$  - диаметр шпура, м;

$l_{шп}$  - длина шпура, м;

$\alpha_{шп}$  - угол расположения шпура относительно плоскости напластования, град.;

$l_x$  - длина модели вдоль оси  $X$  в глобальной системе координат (в глубь массива), м.

Длина модели  $l_x$  определена с учетом границ проницаемости нарушенного массива с незначительным запасом и составила 3 м.

На поверхности модели: 1-2, 2-3, 3-4, а так же на часть поверхности шпура, контактирующей с герметизатором 5-6-9-10 наложены ограничения скоростей движения флюида вида  $V_x = V_y = V_z = 0$ . На поверхность устья шпура 5-10 задается давление нагнетания состава  $P_{\text{наг}}$ . На поверхности модели 4-5 и 10-1 задано атмосферное давление  $P_{\text{атм}}$ .

В связи с тем, что задача является симметричной относительно вертикальной плоскости, проходящей через ось шпура, модель представляет собой полумассив. На поверхность модели, полученной сечением плоскостью симметрии, задано условие вида  $V_z = 0$  (плоскосоимметричное граничное условие).

Рассматриваемая задача является двухфазной: 1 фаза - воздух; 2 фаза - нагнетаемый состав (флюид). В связи с тем, что положение границы раздела двух фаз постоянно изменяется во времени, задача решается в нестационарной постановке со свободными границами (*Volume Of Fluid*) [3].

Для расчета выбран алгоритм *Simplen*, реализующий проекционный метод [4] решения уравнений динамики жидкости в варианте, разработанном группой Патанкара, обладающим улучшенными показателями сходимости по сравнению с другими вариантами алгоритмов семейства *Simple*.

По результатам шахтных исследований получено уравнение зависимости расстояния от забоя до максимума проницаемости  $l_{\text{max}}$

$$\begin{aligned} l_{\text{max}} &= 0,698 \cdot \sigma_p^{-1} + 0,182 \cdot m^{-1}, \text{ м;} \\ R^2 &= 0,95; \alpha_p = 2,8 \cdot 10^{-12}; F_p = 924, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $m$  - вынимаемая мощность пласта, м;

$\sigma_p$  - предел прочности нарушенных пород на растяжение, МПа.

В диапазоне исследованных факторов  $l_{\text{max}}$  изменяется в пределах 0,4 - 1 м. Далее, по мере увеличения расстояния от устья шпура в глубь массива  $l_y$ , наблюдается интенсивное снижение коэффициента проницаемости. Так, при  $l_y = 1,5 - 1,6$  м коэффициент проницаемости уменьшился более чем на порядок, а при дальнейшем увеличении  $l_y$  - на 1 - 2 порядка.

Анизотропия проницаемости исследовалась по 4 направлениям в плоскости шпура относительно его оси: верхнем, нижнем, влево и вправо. В связи с тем, что проницаемости в направлении влево и вправо отличаются незначительно, то в дальнейшем использовалось среднее ее значение - боковая проницаемость. Коэффициент анизотропии в верхнем направлении  $K_{\uparrow}$  достигает максимальной величины 2...2,4 на рас-

стоянии  $l_y = 0,4 \dots 1,2$  м. Далее, на участке  $l_y = 1,2 \dots 1,6$  м наблюдается его снижение до величины 1,25.

Боковой коэффициент анизотропии  $K_{\leftrightarrow}$  имеет более равномерное распределение, достигая значения 1,4...1,6 на участке  $l_y = 0,4 \dots 1,6$ . При длине шпура более 1,6...1,8 м коэффициент анизотропии проницаемости в обоих случаях близок к единице, т. е. проницаемость во всех направлениях одинаковая.

Исходя из проведенного анализа, упрочняемый массив разбит на 4 характерные зоны вертикальными плоскостями, параллельными линии очистного забоя: Б-Б, В-В, Г-Г на расстояниях 0,4; 1,2; 1,6 м от устья шпура соответственно. В свою очередь, каждая зона разбита на участки I - VII выше и ниже оси шпура, как показано на рисунке 1.

Для детального исследования упрочненной области также введены: вертикальная плоскость А-А и наклонная плоскость Д-Д, проходящие через ось шпура.

На основании шахтных исследований проницаемости участков нарушенной кровли в очистном забое, получены эмпирические зависимости коэффициента проницаемости от  $\sigma_p$  и  $l_y$

$$K = (4,058 \cdot \sigma_p^{-1/2} - 1,058 \cdot l_y^2)^3 \cdot 10^{-10}, \text{ м}^2, \quad (2)$$

$$R^2 = 0,83; \alpha_p = 4,3 \cdot 10^{-9}; F_p = 166,4.$$

Исходя из уравнения (2) получена зависимость расстояния от забоя до участка с минимальной проницаемостью  $l_{K_{\min}}$  со значением коэффициента проницаемости  $K = 0,01 \cdot 10^{-10}$ , м<sup>2</sup>, которая может быть использована для определения длины шпура

$$l_{K_{\min}} = 2 \cdot \sigma_p^{-1/4}, \text{ м}. \quad (3)$$

Так же получены эмпирические значения коэффициентов анизотропии участков шпура, с целью возможного применения при моделировании в случае задания коэффициента проницаемости функционально:

$$K_{a\uparrow/\downarrow} = 2,5 \cdot l_y^{-1} - 0,637 \cdot l_y^{-2}, \quad (4)$$

$$R^2 = 0,97; \alpha_p = 2,4 \cdot 10^{-6}; F_p = 137;$$

$$K_{a\leftrightarrow/\downarrow} = 1,635 \cdot l_y^{-1/2} - 0,171 \cdot l_y^{-2}, \quad (5)$$

$$R^2 = 0,99; \alpha_p = 5,7 \cdot 10^{-8}; F_p = 406.$$

После интегрирования уравнений (4 - 5) и подстановки протяженности зон, получены зональные усредненные значения коэффициентов

анизотропии, представленные в таблице 1 и используемые в дальнейшем при моделировании.

Таблица 1 - Зональные значения коэффициентов анизотропии

Коэффициент анизотропии $K_a$	Зона			
	1	2	3	4
$K_a = K_{\uparrow}/K_{\downarrow}$	1,6	2,08	1,47	1
$K_a = K_{\leftrightarrow}/K_{\downarrow}$	1,2	1,52	1,3	1

В связи с тем, что пустотность нарушенного массива  $\delta$  составляет 0,005...0,01, то с целью соблюдения масштаба времени процесса нагнетания при моделировании коэффициент проницаемости принимался в 100 раз меньший, чем полученное значение по формуле (2).

Время шага принято равным 0,01 с; количество итераций в шаге - 10; период создания промежуточных результатов - 10 с (1000 шагов); время окончания расчета принято из условия выхода скрепляющего состава на поверхность.

Первоначально задача решена для следующих условий: длина шпура 2 м; глубина герметизации 0,6 м; предел прочности неустойчивой кровли - 2 МПа. На рисунке 2 представлено распределение скрепляющего состава в характерных сечениях по истечении 160 с.

В 1 зоне распространение состава происходит в виде шарового сегмента. Доля состава на этом участке в общем объеме составила 15%. Наиболее эффективное распространение состава наблюдается в сечениях Б-Б и В-В, т.е. на участке с наибольшей проницаемостью (2 зона). На этом участке доля объема скрепляющего состава составила 68%. Глубина распространения состава в верхнем направлении составила  $l_{\uparrow} = 0,85$  м, в нижнем  $l_{\downarrow} = 0,55$  м, в боковом направлении  $l_{\leftrightarrow} = 1$  м. В третьей зоне доля скрепляющего состава составляет 11%. Форма распространения состава приближается к круглой. В 4 зоне распространение состава минимально в связи с низкой проницаемостью массива. На этом участке доля скрепляющего состава составила менее 6%, а форма распространения состава практически круглая.

На следующем этапе проведено исследование влияния длины шпура на распространение состава в неустойчивой кровле. Длина шпура принималась 2,0 - 3,0 м. На рисунке 3 представлен контур распространения состава для 2,5 и 3,0 м шпуров в сечении А-А.

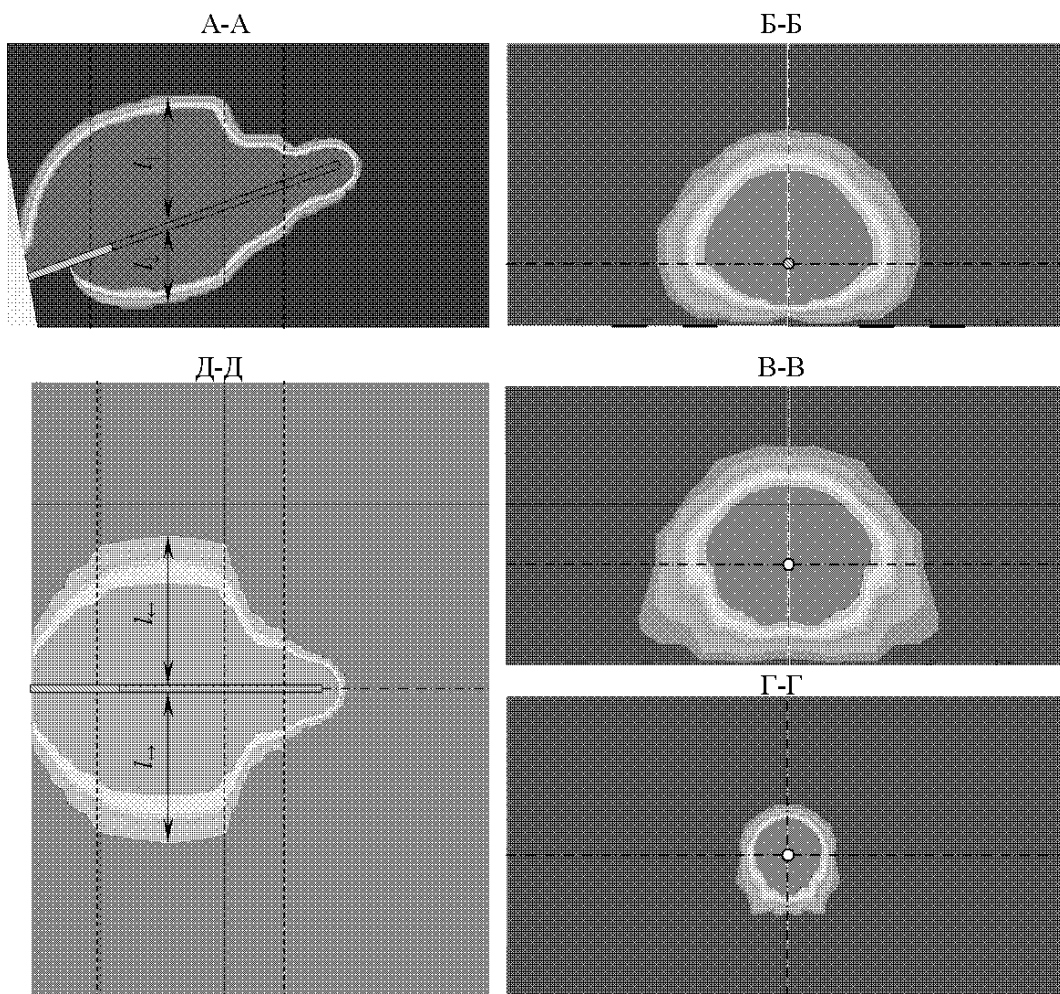


Рисунок 2 - Схема распространения скрепляющего состава в исходной модели

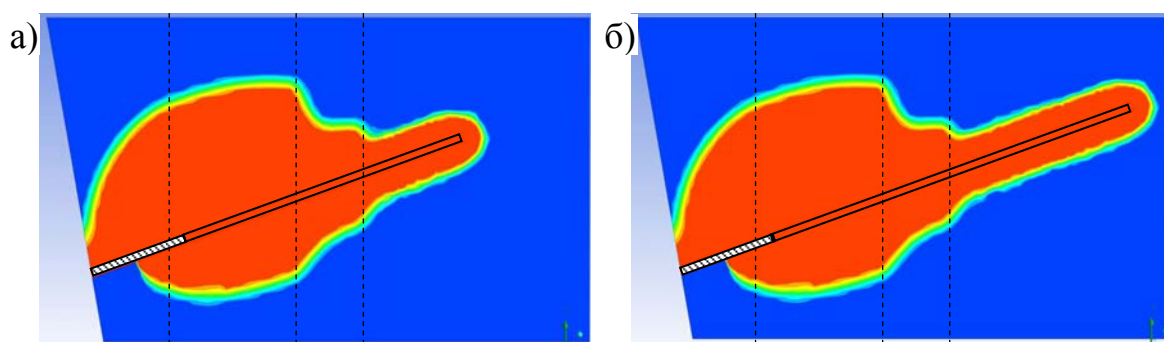


Рисунок 3 - Схемы распространения скрепляющего состава при длине шпура: а - 2,5 м; б - 3,0 м

Сравнивая сечение А-А рисунка 2, а так же рисунки 3а и 3б видно, что отличие в распространении состава существует лишь в 4 зоне. Вре-

мя нагнетания составов при длине шпура 2,5 и 3,0 м составило 170 с, т. е. практически не изменилось. Необходимый объем нагнетаемого состава в рассматриваемых задачах составил: 0,00980; 0,01052 и 0,01098 м<sup>3</sup> при длине шпура 2,0; 2,5 и 3,0 м соответственно. Таким образом, увеличение длины шпура с 2,0 до 3,0 м приводит к увеличению максимально возможного объема нагнетаемого состава лишь на 12%.

Далее исследовано влияние глубины герметизации на распространение состава. Глубина герметизации принималась 0,6 м (исходная задача), 0,9 и 1,2 м. На рисунке 4 представлено распределение скрепляющего состава в кровле пласта при глубине герметизации: 0,9 м - ба и 1,2 м - бб.

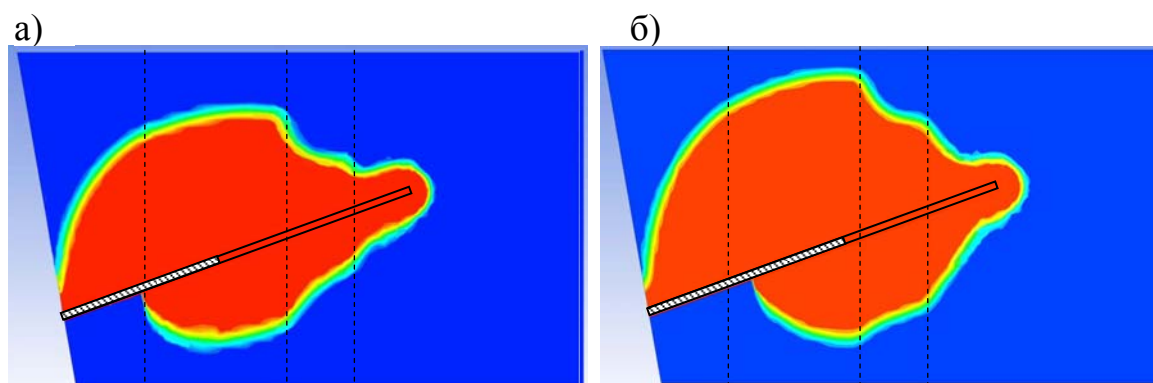


Рисунок 4 - Схемы распространения скрепляющего состава при длине герметизации шпура: а - 0,9 м; б - 1,2 м

Как видно из рисунка 4, а так же исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы. Увеличение глубины герметизации в пределах участка с наибольшей проницаемостью приводит к увеличению высоты и ширины упрочненной зоны, а так же времени нагнетания. Дополнительно исследована глубина герметизации  $l_{\Gamma} = 1,5$  м, попадающая в 3 зону - снижения проницаемости. В этом случае время нагнетания возрастает до 570 с, а размер упрочненной зоны меньше, чем при  $l_{\Gamma} = 1,2$  м. В связи с тем, что в данной работе проницаемость задана зонально, то фактически оптимальная глубина герметизации приблизительно равна расстоянию от устья шпура до участка с максимальной проницаемостью. В этом случае, исходя из формулы (1), оптимальная глубина герметизации составит

$$l_{\Gamma} = \frac{0,698 \cdot \sigma_p^{-1} + 0,182 \cdot m^{-1}}{\cos \alpha}, \text{ м.} \quad (6)$$

Увеличение давления приводит к уменьшению длительности процесса нагнетания, однако необходимо учитывать приемистость нарушенного массива и не допускать его гидроразрыв.

Решением следующей задачи проведено исследование влияния мощности неустойчивой кровли на параметры распространения скрепляющего состава. На рисунке 5 представлена схема распространения скрепляющего состава при мощности неустойчивой кровли 1,0 м.

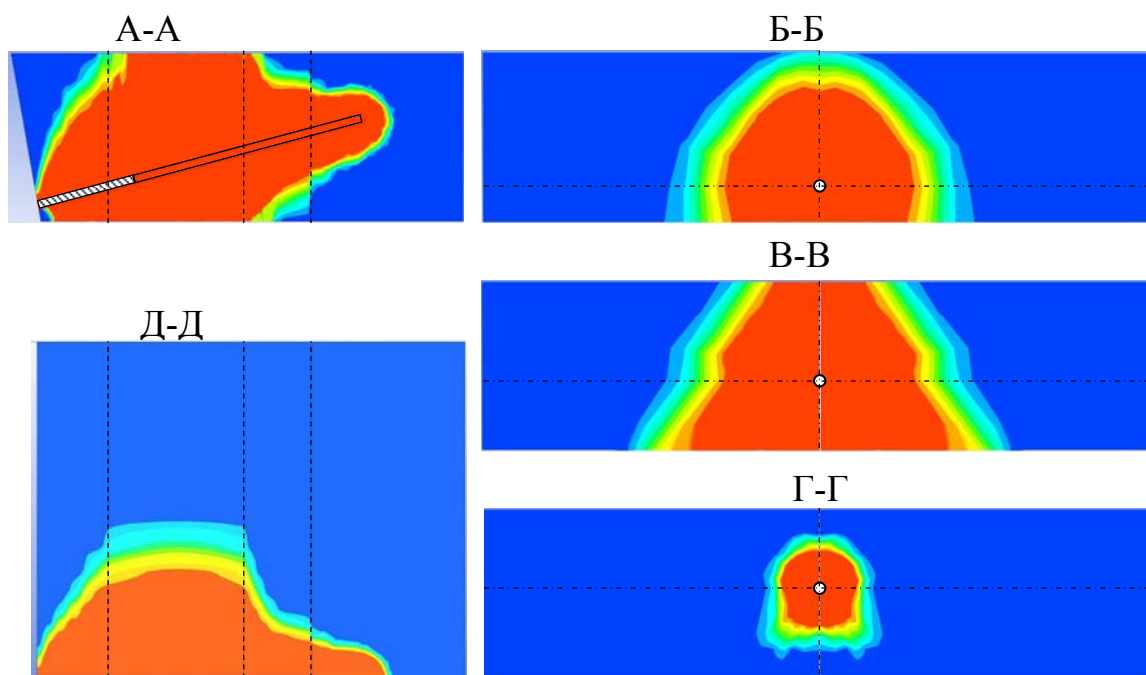


Рисунок 5 - Схема распространения скрепляющего состава при мощности неустойчивой кровли  $h_{нк} = 1,0$  м

Для условий этой задачи характерно более качественное упрочнение подшпурового пространства, чем при более мощной неустойчивой кровле, но возможно проникновение состава в угольный пласт. Таким образом, мощность неустойчивой кровли влияет на форму распространения состава в случае, когда суммарная высота распространения превышает мощность неустойчивой кровли.

Исследовано также влияние предела прочности неустойчивой кровли на растяжение на параметры распространения нагнетаемого состава. Установлено, что при увеличении предела прочности нарушенного массива с 1,0 до 4,0 МПа возросла длительность процесса нагнетания с 70 до 460 с (в 6,6 раз), уменьшились: объем нагнетаемого состава с 0,01632 до 0,00514 (в 3,1 раза), глубина распространения скрепляющего состава в 1,6...1,8 раз.



Ниже представлены полученные эмпирические зависимости параметров распространения состава от свойств неустойчивой кровли:

- объем нагнетаемого состава

$$\begin{aligned} V_{\text{наг}} &= -0,00523 + 0,02136 \cdot \sigma_p^{-1/2}, \text{ м}^3; \\ R^2 &= 0,96; \alpha_p = 0,000118; F_p = 337; \end{aligned} \quad (7)$$

- глубина распространения состава в нижнем направлении

$$\begin{aligned} l_{\downarrow} &= 1,069 \cdot \sigma_p^{-1/3}, \text{ м}; \\ R^2 &= 0,98; \alpha_p = 1,18 \cdot 10^{-5}; F_p = 717; \end{aligned} \quad (8)$$

- в вертикальном направлении

$$\begin{aligned} l_{\uparrow} &= 1,936 \cdot \sigma_p^{-1/2}, \text{ м}; \\ R^2 &= 0,98; \alpha_p = 6,73 \cdot 10^{-6}; F_p = 940; \end{aligned} \quad (9)$$

- в боковом направлении

$$\begin{aligned} l_{\leftrightarrow} &= 1,249 \cdot \sigma_p^{-1/2}, \text{ м}; \\ R^2 &= 0,99; \alpha_p = 1,06 \cdot 10^{-6}; F_p = 2376. \end{aligned} \quad (10)$$

Оптимальную высоту расположения устья шпура определим исходя из условия распространения состава до пласта с учетом глубины герметизации по формуле

$$h_{\text{у.ш}} = l_{\downarrow} - l_{\Gamma} / \sin \alpha = 1,069 \cdot \sigma_p^{-1/3} - l_{\Gamma} / \sin \alpha, \text{ м}. \quad (11)$$

При исследовании влияния угла расположения шпура к напластованию на параметры распространения состава угол изменялся от 0 до 20°. Как показали расчеты, уменьшение угла приводит к несколько лучшему заполнению скрепляющими составами нарушенного массива. Так, при угле  $\alpha = 0^\circ$  объем нагнетаемого состава увеличился на 4,2%, а глубина распространения флюида возросла на 3 - 5%. Таким образом, угол расположения шпура к напластованию оказывает незначительное влияние на параметры распространения состава и его значение необходимо принимать наименьшим по возможности.

К основным свойствам скрепляющих составов относят: плотность, время отверждения и динамическую вязкость. Так как диапазон варьирования плотности относительно средней величины составляет  $\Delta = \pm 8\%$ , то это свойство в данной работе не исследуется, а во всех расчетах принято среднее значение  $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$ . В задачах исследовано

влияние вязкости нагнетаемого состава на параметры его распространения. На основании результатов расчетов установлено, что время нагнетания пропорционально вязкости скрепляющего состава, причем эта зависимость близка к линейной. В то же время, объем нагнетаемого состава снижается с  $0,00980 \text{ м}^3$  (при  $\mu = 0,3 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ) до  $0,00924 \text{ м}^3$  (при  $\mu = 1,2 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ), т.е. на 6%. Таким образом, вязкость нагнетаемого состава влияет главным образом на время нагнетания, и практически не влияет на глубину распространения, однако следует учитывать, что жидкости с меньшей вязкостью обладают большей проникающей способностью и, следовательно, лучшим заполнением упрочняемого массива.

#### **Выводы:**

1) разработана объемная модель массива неустойчивой кровли при ее упрочнении нагнетанием скрепляющих составов с обоснованными граничными условиями;

2) исследовано влияние параметров неустойчивой кровли и параметров технологии упрочнения на геометрические параметры распространения нагнетаемых составов в нарушенном массиве;

3) получены регрессионные зависимости параметров технологии упрочнения скрепляющими составами от свойств неустойчивой кровли.

Направления дальнейших исследований: обоснование параметров технологии комбинированного упрочнения неустойчивой кровли в лаве в сочетании с нагнетанием скрепляющих составов.

#### **Библиографический список**

1. *Руководство по упрочнению неустойчивых горных пород и угля нагнетанием пенополиуретанового состава.* - М.: Ин-т горн. дела им. А.А. Скочинского, 1988. - 28 с.

2. *Клишин Н.К. Геомеханические основы системы контроля состояния и параметров упрочнения кровли в очистных забоях: дис. доктора техн. наук: 05.12.02/ Клишин Николай Кузьмич.* - Донецк, 1994. - 351 с.

3. *Шабаров В.В. Применение системы ANSYS к решению гидродинамических задач: учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Информационные системы в математике и механике» / В.В. Шабаров.* - Нижний Новгород, 2006. -108 с.

4. *Роже П. Вычислительные методы в задачах механики жидкости / Роже Пейре, Томас Д. Тейлор: [пер. с англ. и ред. Н. Е. Вольцингера и др.].* - Л. Гидрометеиздат, 1986. - 351 с.

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