

Кизияров О.Л.

(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина, Radioalex@bk.ru)

МЕТОДИКА ВЫБОРА СКРЕПЛЯЮЩЕГО СОСТАВА ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ НЕУСТОЙЧИВОЙ КРОВЛИ В ЛАВЕ НАГНЕТЕНИЕМ

Разработана методика по выбору нагнетаемого состава для упрочнения кровли очистного забоя с учетом прочностных, деформационных и физических свойств флюида.

Ключевые слова: скрепляющий состав, относительные деформации, нагнетание, время отверждения.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Рентабельность угольных предприятий во многом зависит от добычи очистных забоев. На участках с неустойчивыми кровлями, а также в районах дизъюнктивных нарушений происходит снижение нагрузки на очистной забой, а себестоимость добываемого угля возрастает в 2...4 раза. Одним из способов решения данной проблемы является упрочнение неустойчивых пород. Применение технологии упрочнения кровли в лаве обусловлено целесообразностью сохранения объемов добычи угля, снижения производственного травматизма, улучшения качества и уменьшения себестоимости добываемого угля. В условиях сильнотрещиноватых пород наиболее эффективно применения технологии упрочнения нагнетанием в кровлю под давлением скрепляющих составов на полимерной основе. Для нагнетания скрепляющих составов широко применяются насосы отечественного производства типа НАГУС 212, а также зарубежных производителей: шестеренчатые насосы SK90, поршневые насосы DP-35, DP-40 (Minova), способные создать рабочее давление до 16...25 МПа и темп подачи полимера до 30 л/мин. В настоящее время разработан большой ассортимент составов для инъектирования, которые характеризуются рядом свойств: временем отверждения, вязкостью, адгезионными свойствами и др. [1], представленными в таблице 1. Тип скрепляющего состава для конкрет-

ных условий оказывает влияние не только на качество упрочнения кровли, но и стоимость технологии, т.е. выбор скрепляющего состава является актуальной задачей.

Постановка задачи. Задачей данной работы является разработка методики выбора состава для нагнетания в кровлю очистного забоя с комплексным учетом прочностных, деформационных и физических свойств флюида.

Изложение материала и его результаты. Одним из основных свойств, определяющих возможность применения скрепляющего состава, является величина его адгезии с породами $\sigma_{с.адг}$. Условие применимости скрепляющего состава имеет вид

$$\sigma_{с.адг} \geq \sigma_{к.р}, \text{ МПа}, \quad (1)$$

где $\sigma_{к.р}$ - предел прочности кровли на растяжение, МПа.

С другой стороны, для предотвращения разрушения отвержденного состава его деформационные характеристики должны соответствовать деформациям упрочняемой среды, т.е.

$$[\varepsilon_{с.}] \geq |\varepsilon_{к.макс}|, \quad (2)$$

где $[\varepsilon_{с.}]$ – допустимая величина предельных относительных деформаций скрепляющего состава;

$|\varepsilon_{к.макс}|$ – максимальное значение относительных деформаций упрочняемой кровли.

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Таблица 1 - Свойства скрепляющих составов для инъектирования

Наименование состава, разработчик	Основа состава	Прочность, МПа		Вязкость компонентов, $\mu\text{с}$, мПа·с		Время отверждения $t_{\text{с.отв}}$, мин	Отношение $\frac{t_{\text{с.отв}}}{\mu\text{с}}$, Па^{-1}
		адгезионная, $\sigma_{\text{с.адг}}$	на сжатие, $\sigma_{\text{с.сж}}$	А	В		
ПИЦ + П-7, Укрспецполимеркрепь, Украина	Пенополиуретан	0,7...0,9	1...3	350...450	950...1400	60...120	4,57
А-338, НПО "Полимерсинтез", Россия		2,0...3,0	-	350...400	900...1100	20...30	1,71
Bevedol S-Bevedan, Bevedol WF-Bevedan, Bevedol WFA-Bevedan ("Carbotach" Германия)		-	-	670 550 470	500 500 500	≈ 2 ≈ 3 ≈ 1	0,214 0,343 0,124
Екорур W, Екорур HW, Екорур S, Екорур HS		2,6...4,0	80	200	400	50...120 30...40 70...240 500...1200	10,0 6,0 14,0 100,0
Wipur, "Willich", Германия		-	-	150...250	510...610	15	2,37
ППУ-328, ППУ-329 (Россия)		2,0...3,0	1,5	250	450	90...120 10...15	15,4 1,71
Minorur W, Minorur HW		Минерально-уретановая	1,5...3,2	60	400...500	200...400	50...120 30...40
Wilkit, "Willich", Германия	Органоминеральная	-	60	800...1100	180...300	10...15	1,08
ГСД-9, ТС-10, Россия	Фенольно-формальдегидная	0,4...0,6	12...14	-	-	30...50	-
Вильфлекс-1, "Willich", Германия		-	0,6...1,2	-	-	20...30	-
КФ-Ж + ПИЦ, ИГД им. А.А. Скочинского, Россия	Карбамидо-формальдегидная	1...1,2	25	350...700	350...450	40...60	5,19
Wisifoam IN-4, Wisifoam IN-10		1,0...1,2	30...35 45...60	400...1500	100...200	30...50	3,27
"СКАТ", УкрНИМИ, Украина		2,4...3,2	25...31	180...300	50...120	20...40	7,39

Результаты исследований относительных деформаций поверхности кровли изложены в работе [2]. Авторами установлено, что на протяженных участках лав относительные деформации кровли перпендикулярно забою носят растягивающий характер, а параллельно забою – сжимающий. Кроме того, величина деформаций перпендикулярно забою на порядок выше, чем параллельно. Таким образом, наибольший интерес представляют относительные деформации перпендикулярно забою. После обработки экспериментальных данных автором получено уравнение для определения максимальных значений относительной деформации поверхности кровли ε_{\perp}

$$\varepsilon_{\perp} = (0,0023 \cdot H - 0,61 \cdot m + 17,6 / \sigma_{к.сж}) \cdot 10^{-3}; \quad (3)$$

$$R^2 = 0,84; F_p = 85,3, \alpha_p = 0,00044,$$

где H – глубина разработки, м;

m – вынимаемая мощность пласта, м;

$\sigma_{к.сж}$ – предел прочности кровли на сжатие, МПа;

R^2 – коэффициент детерминации;

F_p – значение критерия Фишера;

α_p – уровень значимости критерия Фишера.

Используя закон Гука, а также приведенную зависимость (3), неравенство (2) может быть представлено в виде

$$[\varepsilon_c] = \frac{[\sigma_{с.р}]}{E_c} \geq |\varepsilon_{к.макс}| = \quad (4)$$

$$= (0,0023 \cdot H - 0,61 \cdot m + 17,6 / \sigma_{к.сж}) \cdot 10^{-3},$$

где $[\sigma_{с.р}]$ – предел прочности отвержденного состава на растяжение, МПа;

E_c – модуль упругости отвержденного скрепляющего состава, МПа.

При отсутствии сведений о модуле упругости состава E_c его значение ориентиро-

вочно может быть найдено по формуле [3]

$$E_c = 267 \cdot \sigma_{с.сж}, \text{ МПа}, \quad (5)$$

где $\sigma_{с.сж}$ – предел прочности отвержденного состава на сжатие, МПа.

Для успешного инъецирования скрепляющего состава его длительность отверждения $t_{с.отв}$ должна превышать продолжительность нагнетания $t_{наг}$. С другой стороны, длительность отверждения состава не должна превышать длительности технологического цикла по выемке угля в лаве за вычетом суммарного времени на подготовительно-заключительные операции (поднос оборудования, бурение шпуров, соединение запорно-смесительных элементов, герметизация шпура) и собственно на нагнетание, т.е.

$$t_{наг} < t_{с.отв} \leq t_{ц} - t_{н.з} - t_{наг}, \quad (6)$$

где $t_{наг}$ – длительность нагнетания в кровлю скрепляющего состава, мин;

$t_{ц}$ – длительность технологического цикла по выемке угля в лаве, мин;

$t_{н.з}$ – продолжительность подготовительно-заключительных операций для выполнения работ по нагнетанию, мин; исходя из опыта выполнения работ по упрочнению ведущими организациями $t_{н.з} = 20 \dots 30$ мин.

Для определения времени нагнетания $t_{наг}$ на основании данных [4] получено регрессионное уравнение

$$t_{наг} = 54,2 \cdot \sigma_{к.р}^{1,5} + 487 \cdot \mu + 678 / P_n - 302, \text{ сек}; \quad (7)$$

$$R^2 = 0,94; F_p = 832, \alpha_p = 2,55 \cdot 10^{-5},$$

где $\sigma_{к.р}$ – предел прочности кровли на растяжение, МПа;

P_n – давление нагнетания, МПа.

В работе [4] не осуществлено одновременное варьирование всеми исследуемыми

факторами, а диапазон варьирования индивидуальных факторов не полный, что снижает достоверность полученной зависимости (7). Кроме того, данная зависимость не позволяет оценить влияние взаимодействий факторов, в связи с чем был проведен полнофакторный эксперимент с центральным композиционным планом первого порядка, с варьированием факторов на двух уровнях. В таблице 2 приведены диапазоны варьирования факторов, а также соответствующие кодированные значения.

Согласно плану эксперимента, с применением численных методов решены 8 задач, результаты которых сведены в таблицу 3.

После обработки результатов эксперимента получена зависимость в кодированном виде

$$t_{\text{наг}} = 886 + 561 \cdot X_1 + 701 \cdot X_2 + 766 \cdot X_3 + 436 \cdot X_1 \cdot X_2 + 481 \cdot X_1 \cdot X_3 + 606 \cdot X_2 \cdot X_3 + 371 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3, \text{ сек.} \quad (8)$$

После преобразования коэффициентов к натурным величинам уравнение (8) приняло вид

$$t_{\text{наг}} = 5,1 - 1,5 \cdot X_1 - 12,9 \cdot X_2 - 32,7 \cdot X_3 + 10,9 \cdot X_1 \cdot X_2 + 28 \cdot X_1 \cdot X_3 + 183 \cdot X_2 \cdot X_3 + 559 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3, \text{ сек.} \quad (9)$$

Как видно из уравнения (9), наиболее значимый коэффициент наблюдается при взаимодействии всех трех исследуемых факторов $X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$. Подставив данное взаимодействие в качестве факторного признака в регрессионную модель, получим следующую зависимость

$$t_{\text{наг}} = 623 \cdot \sigma_p^{1,5} \cdot \mu_c / P_n, \text{ сек;} \quad (10)$$

$$R^2 = 0,98; F_p = 3814, \alpha_p = 1,21 \cdot 10^{-7}.$$

Полученные статистические показатели для зависимости (10) значительно выше, чем для (7), что свидетельствует о верном составлении модели.

Таблица 2 – Уровни и интервалы варьирования факторов

Фактор	Единицы измерения	Диапазон варьирования		
		-1	0	+1
$\sigma_p^{1,5} (X_1)$	МПа ^{1,5}	1	3,1	5,2
$\mu_c (X_2)$	Па·с	0,15	0,83	1,5
$P_n^{-1} (X_3)$	МПа ⁻¹	0,063	0,53	1

Таблица 3 – План-матрица эксперимента и результаты расчетов

№ задачи	X_1	X_2	X_3	$X_1 \cdot X_2$	$X_1 \cdot X_3$	$X_2 \cdot X_3$	$X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$	$t_{\text{наг}}, \text{ сек}$
1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	10
2	1	-1	-1	-1	-1	1	1	40
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1	70
4	1	1	-1	1	-1	-1	-1	360
5	-1	-1	1	1	-1	-1	1	110
6	1	-1	1	-1	1	-1	-1	580
7	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1110
8	1	1	1	1	1	1	1	3810

Учитывая, что μ_c , и $t_{c.омб}$ зависят от конкретного типа состава, подставив в неравенство (6) зависимость (10) и разделив левую и правую часть на μ_c получим условие

$$623 \cdot \sigma_p^{1,5} / P_{н.мин} < t_{c.омб} / \mu_c, \quad (11)$$

откуда

$$P_{н.мин} > 623 \cdot \sigma_p^{1,5} \cdot \mu_c / t_{c.омб}, \text{ МПа}, \quad (12)$$

где $P_{н.мин}$ - минимально допустимое давление нагнетания состава в нарушенный массив, МПа.

Отношение $t_{c.омб} / \mu_c$, приведенное в таблице 1, может быть использовано при выборе скрепляющего состава по фактору наименьшего давления нагнетания.

Максимальное давление нагнетания $P_{н.мах}$ ограничено технической производительностью насоса $P_{м.п}$, а также величиной гидроразрыва массива $P_{з.р.}$, т.е.

$$P_{н.мах} = \min(0,8 \cdot P_{з.р.}; P_{м.п}), \text{ МПа}. \quad (13)$$

Предельное давление инъекции, исключаяющей разрыв пород, определяется по формуле [5]

$$P_{з.р.} = \frac{\mu}{1-\mu} \cdot \gamma H + \sigma_{к.р} \approx \approx 0,011 \cdot H + \sigma_{к.р}, \text{ МПа}, \quad (14)$$

где μ – средняя величина коэффициента Пуассона массива пород; $\mu \approx 0,3$;

γ – объемный вес пород; $\gamma \approx 0,025 \text{ МН/м}^3$.

Условие для определения давления нагнетания с учетом вышеперечисленных требований имеет вид

$$P_{н.} = \min[0,8 \cdot (0,011 \cdot H + \sigma_{к.р}); P_{м.п}] \geq P_{н.мин}, \text{ МПа}, \quad (15)$$

где 0,8 - коэффициент запаса, исклю-

чающий гидроразрыв массива.

Полученное значение $P_{н.}$ подставляется в формулу (10) и рассчитывается время нагнетания $t_{наг}$.

Таким образом, при выборе скрепляющего состава рекомендуется следующая последовательность:

1) предварительно выбираются составы, удовлетворяющие условиям (1) и (4); в случае значительного водопритока в лаву, отбираются составы, рекомендуемые к применению в обводненных условиях (Bevedol WF-Bevedan, Bevedol WFA-Bevedan и др.);

2) по формуле (15) определяется давление нагнетания $P_{н.}$;

3) исключаются из дальнейшего рассмотрения составы, не удовлетворяющие условию (11);

4) по формуле (10) рассчитывается время нагнетания $t_{наг}$;

5) исключаются составы, не удовлетворяющие условию (6).

В случае возможности применения нескольких вариантов, окончательный выбор осуществляется с учетом минимальной стоимости скрепляющего состава.

Выводы и направление дальнейших исследований.

Разработана методика по выбору скрепляющего состава для нагнетания в кровлю очистного забоя с комплексным учетом прочностных, деформационных и физических свойств флюида.

Получены эмпирические зависимости по определению параметров технологии упрочнения с учетом прочностных свойств массива и флюида - время и давление нагнетания скрепляющих составов.

Результаты исследований могут быть использованы проектными и научно-исследовательскими институтами при разработке дополнений к типовым паспортам выемки угля, крепления и управления кровлей очистных забоев.

Библиографический список

1. Канін В.О. Охрана гірничих виробок газобетонним кріпленням / В.О.Канін, А.В. Анциферов. - Донецьк: ТОВ "АЛАН", 2004. - 396 с.
2. Деформации кровли в лавах / Н.К. Клишин, К.З. Склепович, С.И. Касьян [и др.] // Уголь Украины. – 2004. – №1. – С. 16 – 18.
3. Ржевский В.В. Основы физики горных пород: [учебник для студентов горных специальностей вузов] / В.В. Ржевский, Г.Я. Новик [2 изд. доп. и перераб]. – М.: Недра, 1973. – 286 с.
4. Кизияров О.Л. Исследование распространения скрепляющего состава при упрочнении неустойчивой кровли в лаге нагнетанием / О.Л. Кизияров // Сб. научн. трудов ДонГТУ. - Вып.36. - Алчевск: ДонГТУ, 2012. – С. 106–115.
5. Сборник задач по технологии и технике нефтедобычи: [учебное пособие для вузов] / И.Т. Мищенко, В.А. Сахаров, В.Г. Грон [и др.]. – М.: Недра, 1984. – 272 с.

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

Статья поступила в редакцию 27.06.13.

Кізіяров О.Л. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

МЕТОДИКА ВИБОРУ ЗМІЦНЮЮЧОЇ РЕЧОВИНИ ДЛЯ ЗМІЦНЕННЯ НЕСТІЙКОЇ ПОКРІВЛІ В ЛАВІ НАГНІТАННЯМ

Розроблено методику щодо вибору нагнітальної речовини для зміцнення покрівлі очисного вибою з урахуванням міцнісних, деформаційних та фізичних властивостей флюїду.

Ключові слова: *зміцнювальна речовина, відносні деформації, нагнітання, час затвердіння.*

Kiziyarov O.L. (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)

SELECTION PROCEDURE FOR STRENGTHENING OF THE STAPLE UNSTABLE ROOF IN LONGWALL FACES DISCHARGE

The method of choice for the discharge of sewage treatment hardening of the roof coal face in view of the strength, deformation and physical properties of the fluid is developed.

Key words: *cementing composition, relative deformations, whipping, the curing time.*