

д.т.н. Должиков П.Н.,  
к.т.н. Семирягин С.В.,  
Фурдей П.Г.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ШЛАКОГЛИНИСТЫХ ТАМПОНАЖНО-ЗАКЛАДОЧНЫХ СУСПЕНЗИЙ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ПУСТОТ

На основании аналитических и экспериментальных исследований по кинетике твердения шлакоглинистых суспензий разработана методика расчета рецептуры и структурно-механических параметров этих суспензий для условий ликвидации подземных пустот, приведена общая технологическая схема.

**Ключевые слова:** шлаки, суспензия, кинетика твердения, методика, технологическая схема, рецептура.

### Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Бурное развитие добычи полезных ископаемых подземным способом привело к образованию многомиллионных техногенных пустот. В результате активизации деформационного процесса в породном массиве в последнее время поверхность земли затопливается и проваливается. Поэтому остро стоит вопрос ликвидации пустот ресурсосберегающими смесями. Здесь приоритетное значение имеют шлаковые отходы, поскольку решается двоякая задача – заполнение пустот и утилизация отходов.

На сегодняшний день известны многие технологии закладки и тампонажа пустот [1, 2]. Применение закладочных суспензий на основе шлаков отличается высокой экономичностью благодаря вяжущим свойствам молотых шлаков, хорошими технологическими характеристиками и решением экологической проблемы по охране окружающей среды. Однако шлаковые суспензии относятся к нетрадиционному базовому сырью. Поэтому на базе основных закономерностей структурообразования шлакоглинистых растворов необходимо разработать принципиальные положения по расчету рецептуры и свойств закладочных суспензий.

В основу теории структурирования тампонажно-закладочных суспензий положены физико-механические закономер-

ности твердения дисперсных глинистых систем [3]. Известно, что пластическая прочность дисперсных систем определяется выражением:

$$P_m = P_{mH} \left( 1 + \frac{\rho_T - \rho_B}{\gamma - \rho_B} \cdot \frac{V_{II}}{V} \right)^K, \quad (1)$$

где  $P_{mH}$  – начальная прочность суспензии;

$\rho_B$  – плотность воды;

$\rho_T$  – плотность твердой фазы суспензии;

$\gamma$  – плотность суспензии;

$V$  – общий объем суспензии;

$V_{II}$  – объем воды поглощенный добавкой.

Следовательно, начальная прочность суспензии существенно влияет на скорость структурирования твердеющих систем, а показатель  $K$  определяется только кристаллохимическим строением твердой фазы суспензии. Поэтому пригодность шлакового сырья для тампонажно-закладочных работ определяется его способностью в дисперсном виде образовывать водные суспензии с заданной прочностью [2, 3, 4].

**Цель работы** – обоснование методики проектирования шлакоглинистых тампонажно-закладочных суспензий.

**Изложение материала и его результаты.** Будем исходить из основного положения физико-химии твердеющих тампонажных смесей: наиболее технологически эффективным является химическое и адсорбционное связывание воды. Это означает, что кинетика набора прочности определяется интенсивностью поглощения воды вяжущим компонентом и адсорбционной добавкой. Поскольку рассматриваемые шлакоглинистые системы не содержат цемента, то целесообразно влиять на процесс связывания воды высокодисперсным глинистым адсорбентом. При этом важно заметить, что адсорбирующая способность веществ, очевидно, зависит от степени помола. Следовательно схема целенаправленного выбора рецептуры шлакоглинистых суспензий следующая: в суспензию заданной консистенции необходимо ввести молотый шлак или золу уноса для получения конечной прочности, а кинетику структурирования в начальный период гидратации зададим введением водопоглощающих добавок.

Поскольку показатель  $K$  является величиной специфической, то для практических целей можно заменить его глинистой характеристикой – числом пластичности  $M_p$ . Известна эмпирическая зависимость:

$$K = \frac{30,3}{\sqrt{M_p}}, \quad (2)$$

где  $M_p$  – число пластичности в процентах, которое определяет степень пригодности шлаков.

С другой стороны, при заданной начальной прочности мерой степени пригодности служит плотность исходной суспензии, которая определяет ее технологичность (прокачиваемость, растекание и др.).

Исходя из преобладающего химического состава шлаков, они относятся к карбонатной группе веществ ( $CaO + MgO = 50,61\%$ ), а их число пластичности не превышает 7,1, то расчетная

плотность шлакоглинистых суспензий должна составлять  $1500 \text{ кг/м}^3$  [4]. Тогда при выборе рецептуры шлакоглинистых суспензий следует использовать систему уравнений:

$$\begin{cases} P = P \left( 1 + \frac{\rho - \rho}{\gamma - \rho} \frac{V_{II}}{V} \right)^K, \\ \frac{V_{II}}{V} = \frac{V_T}{V} + \frac{V_G}{V}, \\ K = \frac{30,3}{\sqrt{M_p}}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\frac{V_T}{V}$  – доля воды, поглощаемая тонкомолотым шлаком;

$\frac{V_G}{V}$  – доля воды, поглощаемая глинистой добавкой.

Для обоснования эффективных шлакоглинистых рецептур твердеющих закладочных смесей были проведены лабораторные исследования реологических и структурно-механических свойств шлаковых смесей. Планирование экспериментальных исследований выполнялось по методике полного факторного эксперимента и в соответствии с принципиальными положениями разработанного методического подхода.

Исследования выполнялись на основе доменных гранулированных и отвальных шлаков Алчевского металлургического комбината.

Доменные шлаки металлургического производства представляют собой кусковой материал, поэтому шлак просеивался с отбором фракций менее 2,5 см. Плотность шлака составляет  $2,6 \div 2,8 \text{ г/см}^3$ , насыпная плотность –  $1,3 \div 1,5 \text{ г/см}^3$ . Для использования в качестве вяжущего шлак измельчался в шаровой мельнице до удельной поверхности  $4000 \text{ см}^2/\text{г}$ .

Химический состав доменного шлака АМК приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав доменного шлака, %

Проба	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	FeO	TiO <sub>2</sub>	Si	Mn	S	Ti	ппп
Доменный шлак	39,41	45,44	7,17	5,14	0,17	0,34	0,42	0,52	0,17	1,051	0,021	1,15

Таблица 2 – Составы и свойства закладочных смесей

№ п.п.	Параметры смесей	Значения		
		1 состав	2 состав	3 состав
1	Количество шлаков, кг/м <sup>3</sup>	800	840	820
2	Объем воды, кг/м <sup>3</sup>	625	625	625
3	Количество бентонита, кг/м <sup>3</sup>	10	10	20
4	Плотность базовой суспензии, кг/м <sup>3</sup>	1435	1435	1445
5	Плотность смеси, кг/м <sup>3</sup>	1460	1457	1490
6	Растекаемость, см	10	9	11
7	Динамическое напряжение сдвига, Па	26	28	22
8	Структурная вязкость, Па·с×10 <sup>-3</sup>	62	61	54
9	Пластическая прочность на 10 суток, кПа	41,05	310,67	419,21
10	Усадка, %	2	2	2

По гидравлическим свойствам шлак относится к твердому сорту с коэффициентом качества 1,2, а модуль основности составляет 1,25.

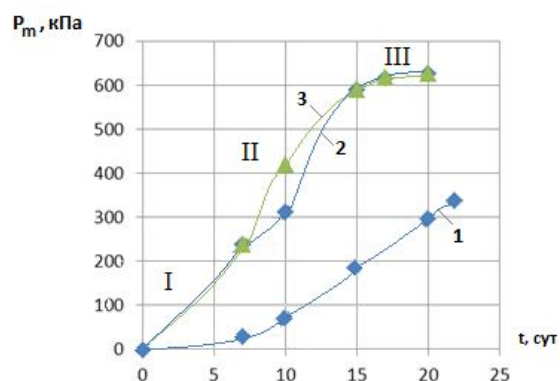
Разработка закладочных смесей на базе шлаковых отходов производилась по методикам Комплексного метода тампонажа [3]. Основными параметрами смесей являются плотность базовой суспензии, реологические свойства, начальная и конечная пластическая прочность [4]. Важной характеристикой шлаковых суспензий является их седиментационная устойчивость, что обеспечивается добавками бентонитового глинопорошка.

Рецептуры исследуемых золошлаковых тампонажно-закладочных смесей и их свойства приведены в таблице 2.

Исследования кинетики твердения закладочных смесей проводили по увеличению пластической прочности во времени. Для шлакоглинистых смесей зависимости пластической прочности от времени и состава приведены на рис. 1. Очевидно, что они подчиняются общей закономерности твердения вязкопластичных жидкостей [3].

На первой стадии (4-7 суток) идет растворение минералов, значительный рост удельной поверхности глинистой фазы; на второй стадии (7-15 суток) интенсивная гидратация с образованием коагуляционно-кристаллической структуры на основе

гидросиликатов кальция, идет резкий набор прочности; на третьей стадии идет медленная гидратация за счет диффузии связанной воды.



1 – цемент 40 кг/м<sup>3</sup>; 2 – глины 10 кг/ м<sup>3</sup>; 3 – глины 20 кг/м<sup>3</sup>

Рисунок 1 – Зависимость пластической прочности закладочных смесей от времени

На графиках видно, что увеличение количества глины приводит к изменению кинетики процесса за счет активизации адсорбции воды, но не конечной прочности системы.

Анализ полученных зависимостей показал, что они удовлетворительно описываются степенными уравнениями. Например, для кривой 2 рис. 1 уравнение имеет вид:

$$P_m = -0,18t^3 + 4,86t^2 + 3,80t + 3, \quad R^2 = 0,81$$

Полученные экспериментальные результаты хорошо сопоставимы с расчетными и подтверждают положения методики проектирования параметров шлакоглинистых тампонажно-закладочных суспензий. Это означает, что для структурирования шлакоглинистых суспензий достаточ-

но введение 20 кг/м<sup>3</sup> бентонитового порошка, при этом происходит эффективное связывание воды в объеме 28-35%, а прочность превышает 500 кПа.

В соответствии с результатами исследований и горно-техническими требованиями, по ликвидации выработок разработаны методика проектирования параметров суспензий и технологическая схема их подачи в выработанное пространство (рис. 2, 3).

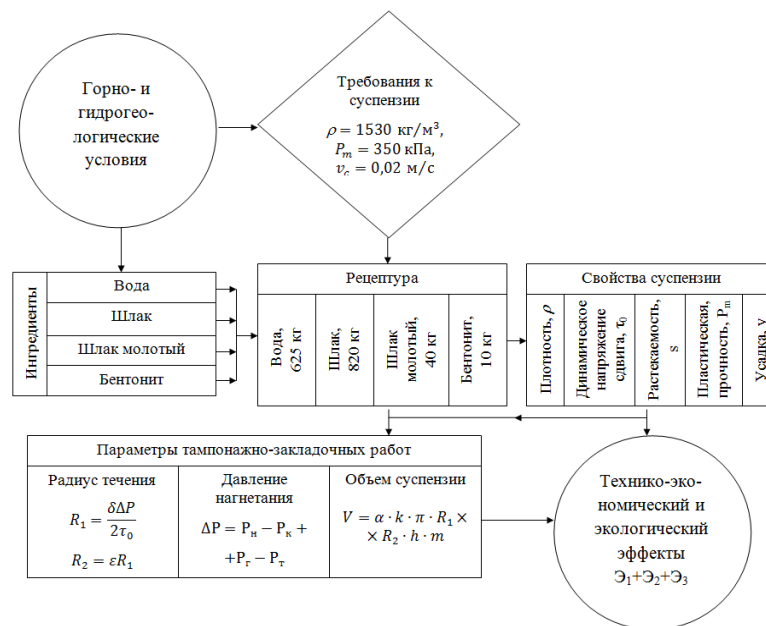
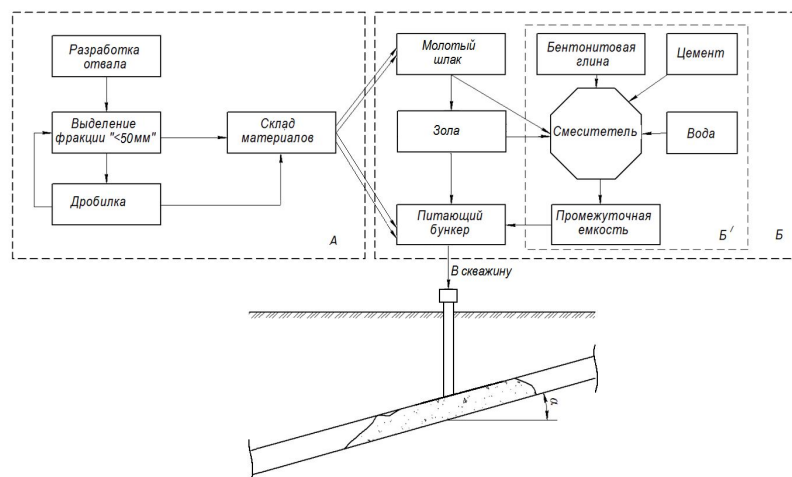


Рисунок 2 – Блок-схема методики проектирования рецептуры золошлаковых закладочных суспензий



А – блок подготовки закладочного материала; Б, Б' – блок приготовления и нагнетания суспензии в выработку

Рисунок 3 – Обобщенная технологическая схема приготовления и нагнетания шлакоглинистых смесей в горную выработку

Основными технологическими операциями являются: механическое дробление и просеивание шлаковых отходов; приготовление шлаковой суспензии и введение бентонита; транспортирование и укладка закладочного материала; контроль качества работ. Расчеты транспортирования золошлаковых смесей в самотечном режиме по трубопроводу диаметром 200 мм на расстояние до 2 км показали, что производительность закладочного комплекса составляет 300 м<sup>3</sup>/ч.

### Библиографический список

1. Кипко Э.Я. Использование отходов для заполнения выработанного пространства закрываемых шахт / Э.Я. Кипко, Ю.Н. Спичак, П.Н. Должиков, С.В. Пожидаев, Р.З. Уманский // Уголь Украины. – 1998. – №6. – С. 13-14.
2. Комплексный метод тампонажа при строительстве шахт: учеб. пособ. / [Э.Я. Кипко, П.Н. Должиков, Н.А. Дудля, А.Э. Кипко и др. – 2-е изд., перераб. и доп.]. – Днепропетровск: Национальный горный ун-т, 2004. – 367 с.
3. Кипко Е.Я. Проектування глиноцементних тампонажних розчинів в гірничій справі: монографія / Е.Я. Кипко, М.А. Дудля, М.М. Тельніх, О.В. Попов, Е.Г. Цаплін. – Дніпродзержинськ: Видавничий дім «Андрій», 2008. – 176 с.
4. Должиков П.Н. Ресурсосберегающие технологии ликвидации подземных пустот закладочными смесями на основе отходов производства / П.Н. Должиков, П.Г. Фурдей, Е.О. Ивлиева // Сборник научн. трудов ДонГТУ. - Вып. 37. – Алчевск: ИПЦ Ладос, 2012. – С. 217-224.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Антощенко Н.И.

Статья поступила в редакцию 27.06.13.

д.т.н. Должиков П.М., к.т.н. Семірягін С.В., асп. Фурдей П.Г. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)  
**ПРОЕКТУВАННЯ ШЛАКОГЛИНИСТИХ ТАМПОНАЖНО-ЗАКЛАДНИХ СУСПЕНЗІЙ  
 ДЛЯ ЛІКВІДАЦІЇ ПІДЗЕМНИХ ПОРОЖНИН**

На підставі аналітичних та експериментальних досліджень з кінетики тверднення шлакоглинистих суспензій розроблена методика розрахунку рецептури і структурно-механічних параметрів цих суспензій для умов ліквідації підземних порожнин, наведена загальна технологічна схема.

**Ключові слова:** шлаки, суспензія, кінетика твердіння, методика, технологічна схема, рецептура.

Dolzhikov P.N., Semiryagin S.V., Furdey P.G. (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)  
**DESIGN SLAG-CLAY STOWING SUSPENSIONS FOR LIQUIDATION UNDERGROUND  
 VOIDS**

On the basis of analytical and experimental studies on the kinetics of hardening slag clay suspensions design procedure of composition and the structural mechanical parameters of these suspensions for the conditions of the elimination of underground cavities, shows the general flowsheet.

**Key words:** slags, suspension, kinetics hardening, methods, flowsheet, composition.