

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

ФУРДЄЙ Павло Глібович

УДК 622.273.217.2:622.257.12

ОБҐРУНТУВАННЯ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ РЕЦЕПТУР
ТАМПОНАЖНО-ЗАКЛАДНИХ СУСПЕНЗІЙ НА ОСНОВІ ШЛАКОВИХ
ВІДХОДІВ ДЛЯ ЛІКВІДАЦІЇ ТЕХНОГЕННИХ ПУСТОТ

Спеціальність: 05.15.04 – «Шахтне та підземне будівництво»

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ - 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі будівельних конструкцій Донбаського державного технічного університету Міністерства освіти і науки України (м. Алчевськ).

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Должиков Петро Миколайович,
завідувач кафедри будівельних конструкцій Донбаського державного технічного університету Міністерства освіти і науки України (м. Алчевськ).

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Петренко Володимир Дмитрович,
завідувач кафедри тунелів, основ та фундаментів Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна Міністерства транспорту та зв'язку України;

кандидат технічних наук, доцент
Вигодін Михайло Олександрович,
доцент кафедри будівництва і геомеханіки Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України (м. Дніпропетровськ).

Захист відбудеться «28» лютого 2014 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.04 при Державному вищому навчальному закладі «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України (49005, м. Дніпропетровськ, пр. К. Маркса, 19).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України (м. Дніпропетровськ).

Автореферат розісланий «27» січня 2014 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О.В. Солодянкін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У промисловості України провідними галузями є вугільна і металургійна. В даний час в технологічному процесі видобутку корисних копалин і металургії 10÷90% вихідної сировини перетворюється у відходи. У вугільній промисловості накопичено близько 4 млрд. тонн породних і близько 80 млн. тонн відходів вуглезбагачення, а вихід шлаків чорної металургії щорічно складає 10-11 млн. тонн, золошлаків ТЕС – близько 15 млн. тонн. У зв'язку з цим виникла серйозна екологічна проблема з переробки та утилізації накопичених промислових відходів і в першу чергу шлакових.

З іншого боку, у процесі підземної розробки вугільних родовищ сформовано вироблений простір, який викликає деформування порід і поверхні, особливо ці процеси активізуються при затопленні виробок закритих шахт. Для шахт Донбасу коефіцієнт залишкової порожнистості після обвалення покрівлі лави становить 0,22-0,4. Так, для середньої шахти, що відпрацьовує пласти потужністю 0,8-1,2 м, об'єм виробленого простору становить близько 20 млн. м³. За останні десятиліття науково та практично доведено, що найбільш ефективною технологією ліквідації старих виробок шахт є комплексний метод тампонажу. При цьому широко використовуються глиноцементні розчини з наповнювачами, але шлакові відходи раніше не застосовувалися. Тому досить перспективним напрямком використання шлакових відходів є приготування на їх основі тампонажно-закладних матеріалів. Це обумовлено тим, що, наприклад, доменні шлаки включають широкий спектр гідравлічно активних мінералів і можуть бути використані замість цементу в якості в'язучого. У зв'язку з цим розробка ресурсозберігаючих рецептур тампонажно-закладних суспензій на базі шлакових відходів для ліквідації техногенних пустот є актуальною науково-технічною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами й темами. Дослідження за темою дисертації виконані відповідно до програми науково-дослідних робіт Донбаського державного технічного університету, яка пов'язана з держбюджетною темою РП-204 «Створення комплексу енергозберігаючих технологій переробки промислових відходів для використання в металургії і суміжних галузях виробництва» (№ держреєстрації 0113U000011) та госпдоговірною темою №2947 «Розробити ресурсозберігаючу рецептуру тампонажно-закладної суміші на базі шлакових відходів Алчевського металургійного комбінату» (№ держреєстрації 0112U005901), а також пов'язані з Регіональною програмою переробки і утилізації промислових відходів та териконів у Луганській області.

Мета роботи полягає у обґрунтуванні ресурсозберігаючих рецептур тампонажно-закладних суспензій на основі шлакових відходів для їх застосування при ліквідації техногенних пустот.

У дисертаційній роботі поставлені та вирішені наступні **задачі**:

– виконати дослідження властивостей шлакових відходів та вплив їх дисперсності на міцність суспензій;

- обґрунтувати параметри безцементних шлакоглинистих сумішей і встановити закономірність їх структурування;
- розробити рецептури твердіючих закладних сумішей на основі золошлаків вологого видалення і встановити параметри їх гідротранспорту;
- розробити методику проектування шлакових тампонажно-закладних суспензій і оцінити їх довговічність при ліквідації підземних пустот.

Ідея роботи полягає у врахуванні реологічних та структурно-механічних закономірностей поведінки дисперсних суспензій на базі шлакових відходів з добавкою глинистого адсорбенту.

Об'єкт дослідження – реологічні та структурно-механічні процеси у гетерогенних тампонажно-закладних сумішах на основі шлакових відходів.

Предмет дослідження – параметри тампонажно-закладних сумішей на базі шлакових відходів та кінетика їх твердіння.

Методи досліджень полягають у теоретичній та експериментальній роботі, що включає комплекс взаємопов'язаних досліджень властивостей шлакових відходів, аналіз існуючих та розробку нових тампонажно-закладних сумішей на основі доменних шлаків і золи вологого видалення, розробка методики проектування шлакоглинистих суспензій і оцінка їх довговічності, обґрунтування технологічних параметрів і схем заповнення виробленого простору, обробка результатів досліджень і оцінка їх техніко-економічної та екологічної ефективності.

Наукові положення, що виносяться на захист.

1. Водні суспензії на основі меленого відвального шлаку з питомою поверхнею $4000 \text{ см}^2/\text{г}$, що містять у якості активного адсорбенту 10% бентонітової глини, володіють в'язкопластичними властивостями та мають степеневу закономірність твердіння за рахунок інтенсивної гідратації з утворенням коагуляційно-кристалізаційної структури і досягають міцності 580 кПа, що дозволяє удосконалити технологію ліквідації підземних пустот.

2. Дотичні напруження тертя і в'язкість золошлакових суспензій з добавкою бентоніту нелінійно змінюються при збільшенні концентрації твердого та швидкості зсуву, що доводить їх в'язкопластичні властивості, а кінетика структурування має три стадії і степеневу залежність розвитку, що дозволяє використовувати суспензії для заповнення підземних пустот у безнапірному і напірному режимах.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше встановлено, що глиниста добавка до шлакової суспензії адсорбційно зв'язує воду, та впливає лише на кінетику твердіння суміші, що дозволяє цілеспрямовано визначати її рецептуру.

2. Доведено, що висококонцентровані шлакоглинисті суміші за реологічними властивостями є в'язкопластичними суспензіями і деформуються за законом тіла Бінгама-Шведова.

3. Вперше встановлено, що для шлакоглинистих суспензій на базі доменного шлаку з коефіцієнтом якості 1,2, питомою поверхнею частинок $4000 \text{ см}^2/\text{г}$ та 10% добавкою бентонітової глини кінетика структуроутворення має степеневу залежність та розвивається у три стадії за 15-28 діб.

4. Вперше встановлена нелінійна залежність набору пластичної міцності закладної суміші на базі золошлаків вологого видалення щільністю 1480 кг/м^3 з добавкою глини та цементу, що дозволяє отримати міцність суміші 2 МПа з нульовою усадкою.

Наукове значення роботи полягає в установленні реологічних властивостей та закономірностей структуроутворення у висококонцентрованих шлакоглинистих суспензіях, що використовуються під час ліквідації підземних пустот.

Практичні результати полягають у наступному:

- розроблені безцементні тампонажно-закладні суміші на основі суспензій доменних шлаків;
- обґрунтовано ресурсозберігаючу рецептуру закладних сумішей з вмістом золошлаку 820 кг/м^3 ;
- вдосконалено методику проектування параметрів шлакоглинистих тампонажно-закладних суспензій.

Обґрунтованість і вірогідність наукових результатів, висновків і рекомендацій підтверджується використанням сертифікованих високоточних лабораторних приладів, застосуванням перевірених стандартних методик досліджень та аналітичних оцінок, репрезентативним об'ємом фактичних даних про властивості шлакових суспензій, задовільною похибкою результатів досліджень (менше 16%), дослідно-промисловими роботами.

Реалізація результатів досліджень.

Результати досліджень у вигляді рекомендацій прийняті до впровадження ТОВ «ТІССА» та ТОВ «Геотехніка», дослідно-промислові роботи по використанню шлакоглинистих суспензій проведені під час ліквідації головного ствола шахти «Комісарівська», виготовлення інгредієнтів тампонажно-закладних сумішей прийнято на Кіровському заводі будівельних матеріалів (ТОВ «ВКФ «Будбізнес»).

Особистий внесок автора полягає у формулюванні ідеї, мети, завдань досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій, в розробці програми та участі у лабораторних дослідженнях, аналізі експериментальних даних та встановленні основних закономірностей структурування та ефективних рецептур шлакових сумішей, розробці методики проектування, технологічних схем та участі в дослідно-промислових роботах.

Апробація роботи. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були схвалені на: VI Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Перспективи освоєння підземного пространства» (м. Дніпропетровськ, 2012 р.), міжнародній конференції «Екологія та безпека життєдіяльності 2012» (м. Скадовськ, 2012 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Технологія будівництва шахт і підземних споруд» (м. Донецьк, 2012 р.), VII Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективи розвитку будівельних технологій» (м. Дніпропетровськ, 2013 р.), міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми гірництва та екології гірничого виробництва» (м. Антрацит, 2013 р.), III Міжнародній науково-практичній конференції «Надзвичайні ситуа-

ції: безпека та захист» (м. Черкаси, 2013 р.), науково-технічних семінарах кафедри будівельних конструкцій ДонДТУ (м. Алчевськ, 2012-2013 рр.).

Публікації. Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи опубліковані у 12 наукових працях, в їх числі 1 монографія, 4 роботи опубліковано у фахових виданнях, 1 у іноземному виданні та 6 у збірниках міжнародних конференцій.

Структура й обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 111 найменувань на 11 сторінках, містить 80 рисунків, 42 таблиці, 3 додатки, викладена на 131 сторінці машинописного тексту. Загальний обсяг дисертації 178 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета і задачі досліджень, наукові положення, встановлено наукове і практичне значення результатів дослідження, наведена інформація стосовно апробації та публікації наукових результатів досліджень.

У першому розділі наведений аналіз проблеми шлаконакопичення та рецептур тампонажно-закладних сумішей. Показано, що шлаки чорної металургії та зошлаки ТЕС, що накопичені у відвалах, складають екологічну загрозу і потребують переробки і утилізації. Це може бути зроблено під час ліквідації техногенних пустот. Насамперед, старі гірничі виробки, що мають багатомільйонні порожнечі, необхідно заповнювати шлаковими відходами, адже відомо, що вони мають гідравлічну активність та можуть твердіти. Отже актуальність роботи полягає в розробці безцементних тампонажно-закладних суспензій на основі шлакових відходів.

Доцільно дослідження провести на базі принципів положень і наукового обґрунтування комплексного методу тампонажу гірських порід глиноцементними розчинами (ДВАТ «Спецтампонажгеологія»). Вагомий внесок в розробку та впровадження комплексного методу тампонажу зробили такі вчені: Е.Я. Кіпко, Ю.А. Полозов, Ю.М. Спічак, О.Е. Кіпко, О.Ю. Лушнікова, П.М. Должиков, І.В. Попов, О.В. Попов, Г.С. Левчинський, Е.Г. Цаплін, Ю.І. Свірський, Г.М. Смородін та інші. Також слід враховувати науковий внесок у розробку спеціальних способів спорудження та ліквідації виробок таких вчених: М.Г. Трупака, О.П. Максимова, М.А. Саламатова, Е.Г. Дуда, М.М. Шупліка, В.І. Бондаренка, І.О. Садовенка, С.Ф. Власова, В.Д. Петренка, В.Д. Рябічева, М.О. Вигодіна, Б.М. Усаченка, О.М. Кузьменка, А.А. Шубіна і багатьох інших. Проте не дивлячись на значні досягнення, питання заповнення підземних пустот безцементними сумішами на базі шлакових відходів залишається актуальним.

У другому розділі викладені результати досліджень властивостей та обґрунтування безцементної рецептури тампонажно-закладних суспензій на основі доменних шлаків Алчевського металургійного комбінату (АМК).

Для проведення експериментальних досліджень доменні шлаки просівали, просушували і піддавали помолу в кульовому млині. Хімічний склад доменних шлаків наведений у табл. 1, де показано, що вони містять більше

50% окису кальцію і магнію, тобто гідравлічний модуль дорівнює 1,0, коефіцієнт якості – 1,4, модуль основності – 1,25. Отже, шлаки є гідравлічно активними.

Таблиця 1

Хімічний склад доменного шлаку АМК

Найменування	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	FeO	TiO ₂	Si	Mn	S	Ti	Осн.
Кількість, % за масою	39,41	45,44	7,17	5,14	0,17	0,34	0,42	0,52	0,17	0,051	0,021	1,15

В'яжучі властивості доменного шлаку істотно залежать від питомої поверхні його частинок, тобто від тонкості помелу. Тому експериментально була визначена оптимальна тонкість помелу шлаку при мінімальній витраті електроенергії на його подрібнення і досягнення активності шлаку не менше 100%. Дослідження виконані з різними концентраціями шлаку в складі в'яжучого, для яких контролювалися показники міцності. Доведено, що дисперсність доменного шлаку позитивно впливає тільки на кінцеву міцність суміші, при цьому кінетика твердіння не змінюється. Оптимальною питомою поверхнею шлаку є $4000 \pm 100 \text{ см}^2/\text{г}$, при цьому коефіцієнт активності на 28 добу досягає 101%.

На зразках доменного гранульованого шлаку виконувалася розробка твердіючих закладних сумішей. Для цього була проведена серія експериментів з варіаціями заповнювача, в'яжучого, затворювача. Планування досліджень виконувалися за методикою повного факторного експерименту. Всього було проведено 118 випробувань шлакових зразків.

У процесі твердіння досліджувалася кінетика структурування шлакових сумішей і визначалися їх

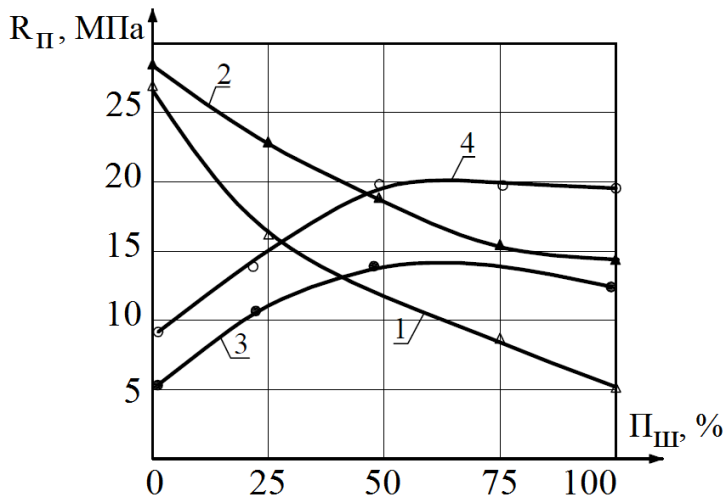


Рис. 1. Залежність міцності на стиск зразків від вмісту шлаку:

1, 2 – затворювач вода, відношення З/В – 0,6; 0,4;
3, 4 – затворювач Na₂CO₃, відношення З/В – 0,6; 0,4

міцності на згин і стиск у віці 28 діб. Після статистичної обробки виконувалася аналіз результатів досліджень методом порівняння для різних складів сумішей. Встановлено, що використання меленого гранульованого шлаку в якості в'яжучого у водних шлакопіщаних сумішах дозволяє отримати мінімальну міцність на стиск 6 МПа при відношенні затворювач/в'яжуче (З/В) 0,6, а при З/В = 0,4 міцність

зразків зростає в 2,8 рази. Застосування просіяного гранульованого шлаку як заповнювача збільшує міцність зразків до 12 МПа.

Експериментально доведено, що шлаколузна рецептура закладних сумішей при використанні свіжоприготованого розчину соди (Na_2CO_3) дозволяє отримати міцність зразків до 11 МПа, а введення 5% добавки глини сприяє підвищенню міцності зразків сумішей в 1,6 рази. На рис. 1 представлена загальна залежність міцності на стиск зразків від вмісту шлаку у в'язучому при різних затворювачах. Ці залежності адекватно описуються експоненціальною і степеневою функціями.

Результати досліджень кінетики структурування шлакових суспензій на базі гранульованого шлаку показали, що вона підпорядковується загальній степеневої залежності, а основну міцність суміші набирають за перші 10-15 діб.

Відвальний доменний шлак з водою був базовою суспензією для приготування безцементних тампонажно-закладних сумішей з добавкою бентонітової глини.

Для різних зразків шлакоглинистої суспензії виконувалися дослідження реологічних характеристик на ротаційному віскозиметрі. Отримані залежності представлені на рис. 2.

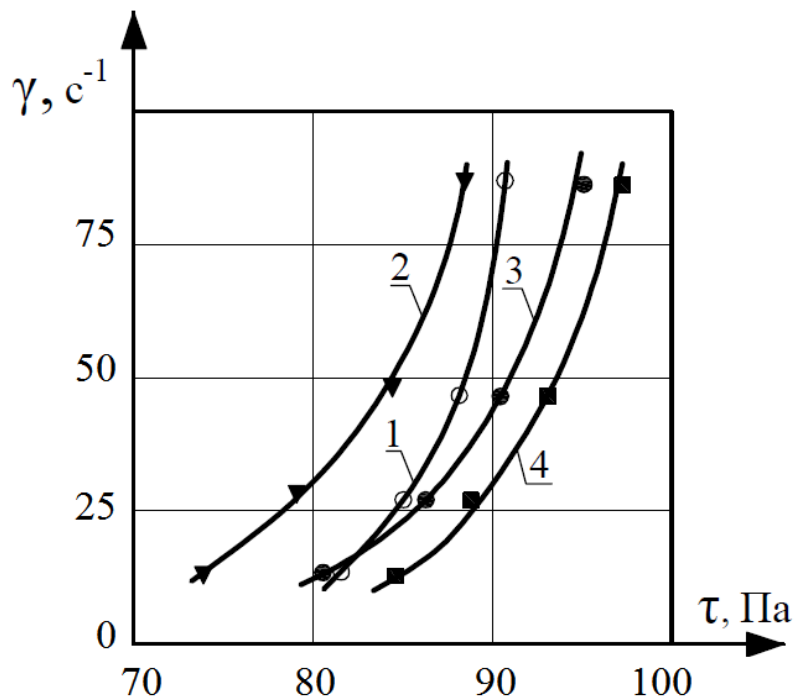


Рис. 2. Реологічні характеристики шлакоглинистих суспензій:
 1 – глини 10 кг/м³; цемента 40 кг/м³; 2 – глини 10 кг/м³; цемента - 0;
 шлака 800 кг/м³; 3 – глини 10 кг/м³; цемента - 0; шлака 840 кг/м³;
 4 – глини 20 кг/м³; цемента - 0

Виконаний кореляційно-регресійний аналіз показує, що суміші мають в'язкопластичні властивості (динамічне напруження зсуву суспензій 75-85 Па) і підкоряються деформаційній поведінці тіла Бінгама-Шведова.

$$\gamma = a_0 \cdot \tau + a_1. \quad (1)$$

Таблиця 2

**Коефіцієнти регресії і величини показника
достовірності апроксимації**

№ кривої	Коефіцієнти регресії		R^2
	a_0	a_1	
1	6,8	-546,5	0,75
2	6,4	-491,0	0,77
3	7,1	-587,2	0,79
4	5,6	-475,8	0,81

На основі відвальних доменних шлаків для безцементних суспензій встановлена кінетика їх структуривання по набору пластичної міцності (рис. 3), яка адекватно описується поліноміальною функцією.

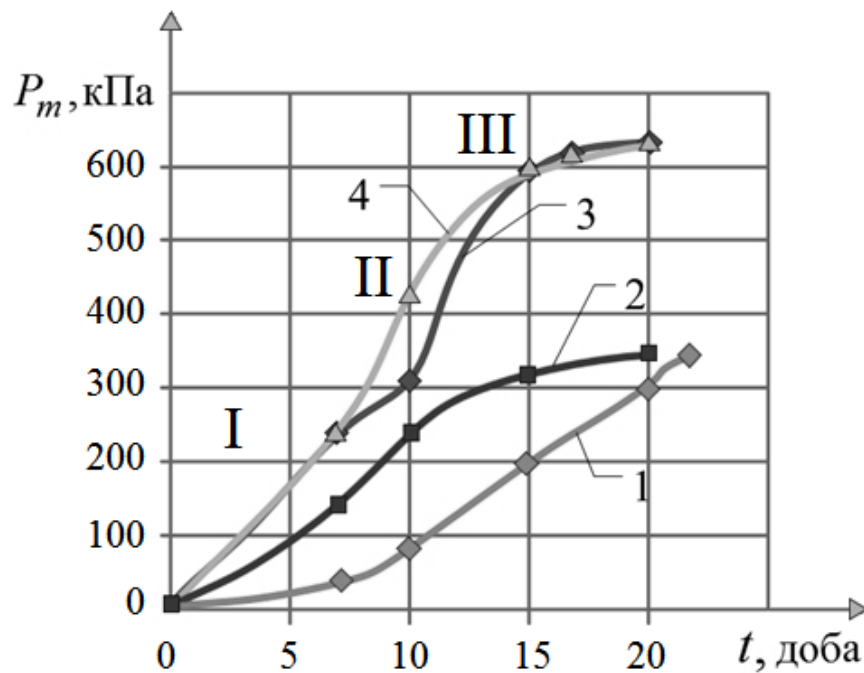


Рис. 3. Закономірність структуривання шлакоглинистих суспензій:
1 – цементу 40 кг/м³; 2 – без цементу; 3 – глини 10 кг/м³; 4 – глини 20 кг/м³

Наприклад, для кривих 2 і 3:

$$P_m = -0,2t^3 + 4,33t^2 - 0,25t + 4,67; \quad R^2 = 0,85 \quad (2)$$

$$P_m = -0,18t^3 + 4,9t^2 + 3,85t + 2,99; \quad R^2 = 0,81 \quad (3)$$

Доведено, що введення бентонітової глини в шлакову суспензію впливає лише на кінетику твердіння, що пов'язано з адсорбційною активністю глини, при цьому суспензія на 15 добу досягає міцності 580 кПа. Закономірність кінетики процесу структурування шлакоглинистих суспензій має три стадії: I – розчинення мінералів, зростання питомої поверхні глинистої фази, II – інтенсивна гідратація з утворенням коагуляційно-кристалізаційної структури на основі гідросилікатів кальцію; III – повільна гідратація за рахунок дифузії зв'язаної води. Ця закономірність підпорядковується загальній фізико-хімічній моделі структурування в'язкопластичних глинистих систем.

Таким чином, в результаті проведених досліджень розроблені і рекомендовані до застосування міцні закладні суміші на основі гранульованого шлаку і безцементні рецептури тампонажно-закладних суспензій на базі відвального шлаку з добавкою глини (табл. 3, 4).

Таблиця 3

Рецептури закладних сумішей на основі гранульованого шлаку

Склад	Кількість, кг/м ³	
	Перший склад	Другий склад
1. Просіяний гранульований шлак	650	650
2. Мелений гранульований шлак	162	280
3. Цемент	50	–
4. Глина бентонітова	–	15
5. Вода	130	–
6. Розчин соди (Na ₂ CO ₃)	–	160

Таблиця 4

Склад та властивості рецептур закладних суспензій на основі відвального шлаку

№ п.п.	Параметри суспензій	Варіанти рецептур			
		1	2	3	4
1	2	3	4	5	6
1	Кількість відвального шлаку, кг/м ³	800	800	840	820
2	Кількість глини, кг/м ³	10	10	10	20
3	Кількість води, кг/м ³	625	625	625	625
4	Щільність базової суспензії, кг/м ³	1435	1435	1435	1445
5	Кількість цементу, кг/м ³	40	–	–	–
6	Щільність розчину, кг/м ³	1490	1452	1457	1460
7	Розплив, см	11	8	9	11
8	Динамічне напруження зсуву, Па	82	75	80	84

Продовження табл. 4

1	2	3	4	5	6
9	Пластична міцність, кПа				
	на 7 добу	26,7	119,8	237,3	237,3
	на 10 добу	41,0	237,3	310,6	419,2
	на 15 добу	148	310,7	588,8	588,8
10	Усадка, %	1,0	2,0	2,0	1,0
11	Кут природного укусу, град.	11	15	15	12

У третьому розділі викладені результати дослідження властивостей золи виносу і шлаків вологого видалення на зразках з Луганської ТЕС та на їх основі розроблені закладні суспензії. За хімічним складом золи ТЕС сухого і вологого видалення близькі і можуть утворювати відносно стабільні суспензії. Однак ці суспензії потребують введення стабілізуючих добавок. Дослідження виконувалися у три етапи: на зразках золи виносу, золошлаків вологого видалення і шлакоглинистих сумішей. За характеристиками закладних сумішей на базі золи виносу і золошлаків вологого видалення встановлено, що при вмісті цементу в суспензії золошлаків вологого видалення менш 50 кг/м³ суміші розмиваються, а найбільш активним стабілізатором є бентоніт в кількості 60 кг/м³.

За реологічними характеристикам золошлакових суспензій для різних рецептур отримано, що базові шлакові суспензії мають порівняно слабку структуру – τ_0 дорівнює 3; 5 та 24 Па при в'язкості 10-15 мПа·с.

При введенні в суміш бентоніту 60 кг/м³ та цементу до 60 кг/м³ суспензії стабілізуються, динамічне напруження зсуву зростає до 70 Па, а пластична міцність досягає 2 МПа при нульовій усадці. Встановлено, що напруження зсуву нелінійно змінюється залежно від концентрації суміші, а кінетика структурування має три стадії і степеневу закономірності розвитку, що дозволяє рекомендувати розроблені шлакобентонітові суміші для заповнення підземних пустот (табл. 5).

Таблиця 5

Характеристика закладних сумішей на базі золошлаків вологого видалення з добавкою бентоніту

Пит. вага сусп., кг/м ³	Кіл. бентоніту, кг/м ³	Кіл. цементу, кг/м ³	Кіл. сух. золи, кг/м ³	τ_0 , Па	η , мПа·с	Пластична міцність, кПа через					
						1 хв.	240 хв.	1 доб.	3 доб.	10 діб	30 діб
1460	50	60	–	59	15	0,15	15,4	222	549	992	1270
1460	60	60	60	62	16	0,15	23,2	299	534	965	1401
1460	50	60	120	65	18,7	0,22	19,1	310	852	1539	2277
1480	60	60	60	70	25	0,22	24,1	312	587	1010	1630
1500	60	120	–	76	79	0,28	22,6	279	2459	4443	6176
1530	60	60	–	64	80	0,25	16,8	185	886	1601	2050

За даними табл. 5 пластична міцність суспензій змінюється згідно залежності:

$$P_m = a_0 \cdot t^{a_1}. \quad (4)$$

Таблиця 6

Коефіцієнти регресії і величини показника достовірності апроксимації

№ зразка	Коефіцієнти регресії		R^2
	a_0	a_1	
1	432,8	0,3	0,8
2	350,0	0,4	0,77
3	592,7	0,4	0,69
4	320,5	0,5	0,71
5	2264	0,3	0,81
6	640,6	0,4	0,7

Результати дослідження реологічних властивостей золошлакових суспензій з добавкою бентоніту наведені на рис. 4.

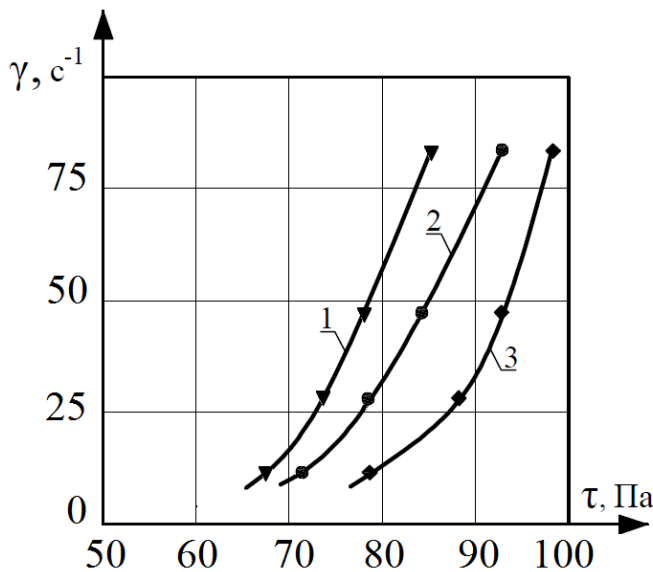


Рис. 4. Реологічні властивості золошлакових суспензій з добавкою бентоніту: 1 – питома вага суспензії 1460 кг/м^3 ; 2 – 1480 кг/м^3 ; 3 – 1500 кг/м^3

питомі втрати по довжині трубопроводу становлять $0,25 \text{ МПа/км}$.

У четвертому розділі, виходячи з принципів положень фізико-хімії структурування глинистих гетерогенних систем, обґрунтована методика проектування параметрів рецептур шлакоглинистих тампонажно-закладних суспен-

Дослідження параметрів гідротранспортування золошлаків (режим руху, величина критичної швидкості, втрати тиску) виконані на гідравлічному стенді при діаметрах трубопроводу 153 і 256 мм. Експериментально доведено, що гідротранспортування суспензій золошлаків може здійснюватися при масовій концентрації від 10 до 60%, при цьому критична швидкість складає 1,2 – 1,4 м/с, питомі втрати напору не перевищують 0,02 см, а розрахункові

зій. Враховуючи вихідні властивості шлаків, початкову міцність суспензії, можливо розрахувати щільність шлакоглинистої суспензії, обсяг адсорбованої води при заданій кількості глини, а також визначити кінцеву пластичну міцність суміші. При цьому встановлені граничні показники динамічного напруження зсуву та структурної в'язкості суспензії. Методика проектування дозволяє обґрунтовано вибрати необхідні параметри суспензії для розрахунку технологічних характеристик ліквідації техногенних пустот шлаковими сумішами (табл. 7).

Таблиця 7

**Методика проектування рецептур шлакоглинистих
тампонажно-закладних суспензій**

Найменування етапу проектування	Розрахункові значення і формули
1	2
1. Вихідні властивості шлаків	$\rho_{ш} = 2,7 \text{ г/см}^3; K_k \geq 1,2$ $C_k \geq 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ моль/г}; M_p = 3 \div 6$
2. Показник глинистості	$K = \frac{30,3}{\sqrt{M_p}}$,
3. Початкова міцність суспензії	$P_{mH} = 10 \text{ Па}$
4. Необхідна пластична міцність тампонажно-закладного матеріалу	$P_m > 350 \text{ кПа}$
5. Щільність суспензії, кг/м^3	$\gamma = \rho_{ш} - (\rho_{ш} - \rho_{в}) \left(1 - \left(\frac{P_m}{P_{mH}} \right)^{\frac{1}{k}} \right)$
6. Швидкість седиментації	$v_c \geq 0,02 \text{ м/с}$
7. Об'єми поглиненої води шлаком і глиною	$\frac{v_n}{V} = \frac{v_{ш}}{V} + \frac{v_z}{V}$ $\frac{v_{ш}}{V} = 0,042t^{0,57} + 0,33$ $\frac{v_z}{V} = 0,081t^{0,35} + 0,15$
8. Кількість глини, кг	$m = \frac{\gamma - \gamma_z}{(1 - \gamma / \rho)} V_{ш}$
9. Пластична міцність тампонажно-закладної суміші, кПа	$P_m = P_{mH} \left(1 + \frac{\rho - \rho_{в}}{\gamma - \rho_{в}} \frac{v_n}{V} \right)^k$

1	2
10. Динамічне напруження зсуву	$\tau_0 \geq 60$ Па
11. Структурна в'язкість	$\mu \geq 27 \cdot 10^{-3}$ Па·с
12. Допустима пластична міцність	$P_{m \text{ доп}} > 150$ кПа

Технологічний комплекс робіт з ліквідації підземних пустот шлаковими сумішами включає в себе підготовчий період, буріння свердловин і заповнення підземного простору, а технологічна схема складається з поверхневого комплексу і трубно-свердловинної системи. Шлакоглинистими сумішами можуть бути заповнені провали над виробками, аварійні виробки, що виходять на поверхню, старі гірничі виробки, вироблений простір.

Складові шлакових суспензій можуть бути приготовлені за допомогою гідромоніторів або на цементному заводі, а на ділянці виконання робіт безпосередньо здійснюється їх нагнітання у виробку в безнапірному або напірному режимі.

Дослідно-промислові роботи з випробування рецептури і технологічної схеми приготування і нагнітання шлакоглинистих суспензій були проведені при ліквідації головного ствола шахти «Комісарівська» (рис. 5). Витрати матеріалів на ліквідацію ствола наведено у табл. 8. Проектна утилізація відвального шлаку – 415 тонн, економія цементу – 50 тонн.

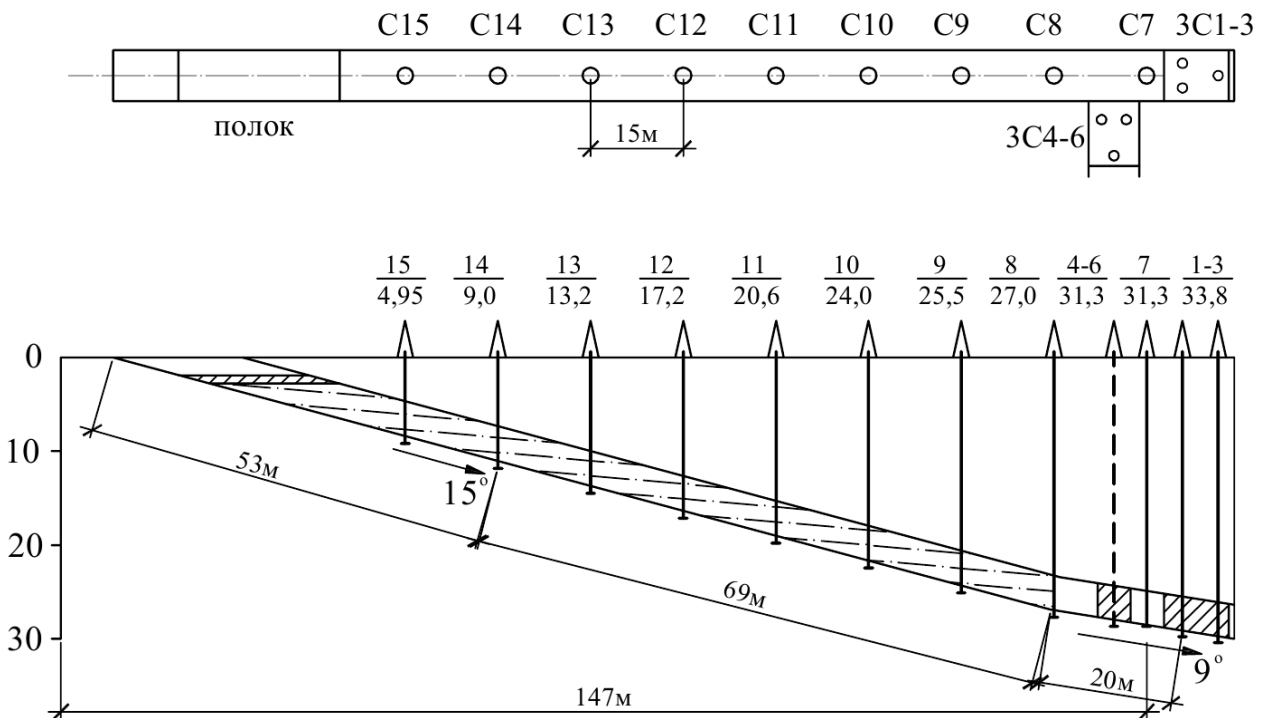


Рис. 5. Схема ліквідації головного ствола шахти «Комісарівська» методом тампонажу

**Проектні об'єми ліквідації головного ствола шахти
«Комісарівська» шлакоглинистою суспензією**

Кількість свердловин, шт.	Об'єм закачки, м ³	Витрати матеріалів				
		Цемент, т	Шлак, т	Глина, м ³	Вода, м ³	Відсів, т
Закладка 6	52	4,6	–	10,7	37,4	26
Тампонаж 9	494	–	415	49,4	308,7	–
Всього 15	546	4,6	415	60,1	346,1	26

На підставі двох методик розрахунку параметрів корозійного процесу та експериментальної закономірності розвитку фронту корозії при гідратації шлакових сумішей в сульфатному середовищі оцінений термін служби шлакоглинистого тампонажно-закладного масиву, який складає більше 136 років.

Ефективність результатів досліджень складається з техніко-економічної, екологічної та соціальної складової. Розрахунками підтверджено високу техніко-економічну ефективність результатів досліджень, показано, що тільки за рахунок економії цементу очікувана питома ефективність застосування шлакоглинистих суспензій становить 274 грн/м³.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, в якому на підставі нових встановлених закономірностей реологічних і структурно-механічних процесів у дисперсних суспензіях на базі шлакових відходів вирішена актуальна науково-технічна задача з обґрунтування ресурсозберігаючих рецептур тампонажно-закладних сумішей на основі суспензій доменних шлаків і золошлаків вологого видалення, що має важливе значення для ліквідації підземних пустот та утилізації відходів промисловості.

Основні висновки, результати та рекомендації полягають у наступному:

1. Дисперсність доменного шлаку позитивно впливає тільки на кінцеву міцність суміші, при цьому кінетика її твердіння не змінюється, оптимальна питома поверхня шлаку становить $4000 \pm 100 \text{ см}^2/\text{г}$, що відповідає показнику активності у віці 28 діб 101%.

2. Розроблені закладні суспензії на основі гранульованого шлаку, які досягають міцності 6 МПа. Застосування просіяного гранульованого шлаку як заповнювача у водній суспензії меленого шлаку, при відношенні затворювач-в'язуче 0,6, дозволяє отримати міцність до 16 МПа, а шлаколужна рецептура закладної суміші на базі розчину соди і 5% глинистої добавки досягає міцності до 34 МПа.

3. На основі водних суспензій меленого відвального шлаку розроблені безцементні тампонажно-закладні суміші, що містять 840 кг/м³ шлаку, до 10% бентонітової глини і досягають пластичної міцності 580 кПа. Доведено, що ви-

сококонцентровані шлакоглинисті суміші за реологічними властивостями є в'язкопластичними суспензіями ($\tau_0 = 75 - 85$ Па).

4. Кінетика структурування шлакоглинистих суспензій має степеневу закономірність і розвивається в три стадії за 15 – 28 діб, що відповідає закону твердіння дисперсних систем.

5. Для суспензій на основі золошлаків вологого видалення щільністю 1480 кг/м^3 найбільш активним стабілізатором є бентоніт в кількості 60 кг/м^3 , а при добавці цементу 60 кг/м^3 суспензія набуває пластичної міцності 2 МПа при нульовій усадці.

6. Золошлакові суспензії при концентрації до 60% з добавкою глини мають в'язкопластичні властивості, а кінетика їх структурування підпорядковується степеневій закономірності. Доведено, що гідротранспортування суспензій золошлаків може здійснюватися при швидкості 1,2 – 1,4 м/с, при цьому питомі втрати напору не перевищують 0,25 МПа/км.

7. Розроблено методику проектування рецептури шлакоглинистих тампонажно-закладних суспензій, яка дозволяє розрахувати всі параметри і властивості сумішей для ліквідації підземних пустот.

8. Для чотирьох технологічних схем ліквідації підземних пустот розроблений поверхневий комплекс приготування і нагнітання шлакоглинистих суспензій, дослідно-промисловими роботами доведено ефективність його роботи та застосування безцементних закладних сумішей. Очікуваний економічний ефект тільки за рахунок економії цементу складе 274 грн/м^3 .

Основні положення і результати дисертації опубліковані в наступних роботах:

1. Фурдей П.Г. Инъекционная стабилизация оползневых грунтов: монография / [Должиков П.Н., Фурдей П.Г., Кирияк К.К., Рыжикова О.А.]. – Донецк: Світ книги, 2012. – 212 с.

2. Фурдей П.Г. Ресурсосберегающие технологии ликвидации подземных пустот закладочными смесями на основе отходов производства: Зб. наук праць ДонДТУ / Должиков П.Н., Фурдей П.Г., Ивлиева Е.О.– Алчевськ: ІПЦ «Лад», 2012. – Вип. 37. – С.217-224.

3. Фурдей П.Г. Исследование влияния дисперсности гранулированного доменного шлака на прочность цемента: Зб. наук праць ДонДТУ / Должиков П.Н., Семирягин С.В., Фурдей П.Г. – Алчевськ: ІПЦ «Лад», 2013. – Вип. 39. – С. 165-169.

4. Фурдей П.Г. Исследования гидравлических сопротивлений при движении в трубах золошлаковых тампонажно-закладочных суспензий: Зб. наук праць [Ін-т Геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України] / П.Н. Должиков, П.Г. Фурдей // Геотехнічна механіка. – Дніпропетровськ, 2013. – Вип. 38. – С.211–215.

5. Фурдей П.Г. Проектирование шлакоглинистых тампонажно-закладочных суспензий для ликвидации подземных пустот: Сб. науч. тр.

ДонГТУ / Должиков П.Н., Семирягин С.В., Фурдей П.Г. – Алчевск, 2013. – №40. – С.33-37.

6. Furdey P. The recourse-saving compositions of backfilling mixtures based on slag waste products / Dolzhikov P., Syemiryagin S., Furdey P. // Technical and Geoinformational Systems in Mining: School of Underground Mining 2013. – AK Leiden, The Netherlands: CRC Press / Balkema, 2013. – P. 121-124.

7. Фурдей П.Г. О расчете долговечности тампонажно-закладочной завесы: м-лы VI междунар. начн.-практ. конфер. молодых ученых, аспирантов и студентов / П.Г. Фурдей, Е.О. Ивлиева // Перспективы освоения подземного пространства. – Днепропетровск: НГУ, 2012. – С. 84-86.

8. Фурдей П.Г. Разработка рецептуры тампонажно-закладочных материалов на основе отходов металлургического производства: Сб. научн. трудов / Е.О. Ивлиева, П.Г. Фурдей // Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений. – Донецк: Норд-Пресс, 2012. – Вып. 18 – С. 240-242.

9. Фурдей П.Г. Разработка ресурсосберегающих тампонажно-закладочных смесей на основе породных и шлаковых отходов: м-лы междунар. конфер. / Должиков П.Н., Фурдей П.Г., Ивлиева Е.О. // Экология и безопасность жизнедеятельности – 2012 (Скадовск). – Алчевск : ВУО МАНЭБ, ДГМИ, 2012. – С. 49-56.

10. Фурдей П.Г. Формирование искусственного основания фундаментов на подработанных территориях: м-лы VII междунар. начн.-практ. конфер. молодых ученых, аспирантов и студентов / Е.О. Ивлиева, П.Г. Фурдей // Перспективы развития строительных технологий. – Днепропетровск: НГУ, 2013. – С. 34-37.

11. Фурдей П.Г. Оптимизация рецептуры шлакоглинистых тампонажно-закладочных суспензий: м-лы VIII междунар. науч.-практ. конф. / Должиков П.Н., Фурдей П.Г., Ивлиева Е.О. // Проблемы горного дела и экологии горного производства (Антрацит). – Донецк: Світ книги, 2013. – С. 153-156.

12. Фурдей П.Г. О необходимости инженерной защиты территорий закрытых шахт от чрезвычайных ситуаций методами тампонажа: матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції / Должиков П.Н., Фурдей П.Г., Кипко А.Э. // Надзвичайні ситуації: безпека та захист. – Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2013. – С. 112-115.

Особистий внесок здобувача в роботах, написаних у співавторстві: [1] – аналіз реологічних процесів у глинистих в'язкопластичних системах; [2] – ідея та обґрунтування рецептури шлакоглинистих суспензій; [3] – обґрунтування ефективності помелу та активності шлаку; [4] – розрахунок питомих гідравлічних втрат; [5] – розробка технологічної схеми; [6] – дослідження реологічних властивостей тампонажно-закладних суспензій; [7] – дослідження фронту корозії на шлакових зразках; [8, 9, 10] – планування та обробка результатів експериментальних досліджень; [11, 12] – дослідження кінетики твердіння шлакоглинистих суспензій.

АНОТАЦІЯ

Фурдей П.Г. Обґрунтування ресурсозберігаючих рецептур тампонажно-закладних суспензій на основі шлакових відходів для ліквідації техногенних пустот. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.04 – «Шахтне та підземне будівництво». – Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет». Дніпропетровськ, 2014.

У дисертації на основі вперше встановлених закономірностей реологічних і структурномеханічних процесів у дисперсних суспензіях на базі шлакових відходів вирішена актуальна науково-технічна задача по обґрунтуванню ресурсозберігаючих рецептур тампонажно-закладних сумішей на основі доменних шлаків і золошлаків вологого видалення.

На основі експериментальних досліджень доведено, що шлакоглинисті суміші за реологічними властивостями є в'язкопластичними суспензіями, глиниста добавка до шлакової суспензії адсорбційно зв'язує воду та впливає лише на кінетику твердіння суміші. Встановлена степенева закономірність кінетики структуроутворення для шлакоглинистих суспензій на базі доменного шлаку з питомою поверхнею частинок $4000 \text{ см}^2/\text{г}$ та 10% добавкою бентонітової глини. Вперше розроблені безцементні тампонажні суспензії.

Експериментально виявлена нелінійна залежність набору пластичної міцності закладної суспензії на базі золошлаків вологого видалення щільністю $1480 \text{ кг}/\text{м}^3$ з добавкою глини та цементу, що дозволило отримати міцність суміші 2 МПа з нульовою усадкою.

Вдосконалено методику проектування параметрів шлакоглинистих тампонажно-закладних сумішей. Проведено дослідно-промислові роботи по ліквідації похилого ствола шлакоглинистими суспензіями, доведена економічна ефективність їх використання.

Ключові слова: шлакові відходи, техногенні пустоти, тампонажно-закладні суспензії, реологічні властивості, кінетика структуроутворення, рецептури, методика проектування.

АННОТАЦИЯ

Фурдей П.Г. Обоснование ресурсосберегающих рецептур тампонажно-закладочных суспензий на основе шлаковых отходов для ликвидации техногенных пустот. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.04 – «Шахтное и подземное строительство». – Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет». Днепропетровск, 2014.

В диссертации на основе впервые установленных закономерностей реологических и структурномеханических процессов в дисперсных суспензиях на базе шлаковых отходов решена актуальная научно-техническая задача по обоснова-

нию ресурсосберегающих рецептур тампонажно-закладочных смесей на основе доменных шлаков и золошлаков влажного удаления.

На основе экспериментальных исследований доказано, что оптимальная дисперсность доменного шлака $4000 \text{ см}^2/\text{г}$ положительно воздействует только на конечную прочность смеси, применение гранулированного шлака в качестве заполнителя в водной суспензии молотого шлака позволяет получить прочность закладочной смеси до 16 МПа. Шлакоглинистые смеси по реологическим свойствам являются вязкопластичными суспензиями, глинистая добавка к шлаковой суспензии адсорбционно связывает воду и влияет только на кинетику твердения смеси. Установлена степенная закономерность кинетики структурообразования для шлакоглинистых суспензий на базе доменного шлака с 10% добавкой бентонитовой глины, что соответствует закону твердения дисперсных систем. Впервые разработаны бесцементные тампонажные суспензии на основе отвальных шлаков пригодные для ликвидации подземных пустот.

Экспериментально установлена нелинейная зависимость набора пластической прочности закладочной смеси на базе золошлаков влажного удаления плотностью $1480 \text{ кг}/\text{м}^3$ с добавкой глины и цемента до $60 \text{ кг}/\text{м}^3$, что позволило получить прочность смеси 2 МПа с нулевой усадкой. Высококонцентрированные суспензии (до 60%) обладают вязкопластичными свойствами и могут прокачиваться по трубам при удельных потерях напора $0,25 \text{ МПа}/\text{км}$.

Усовершенствована методика проектирования параметров шлакоглинистых тампонажно-закладочных смесей. Проведены опытно-промышленные работы по ликвидации наклонного ствола шлакоглинистыми суспензиями, доказана экономическая эффективность их использования.

Ключевые слова: шлаковые отходы, техногенные пустоты, тампонажно-закладочные суспензии, реологические свойства, кинетика структурообразования, рецептуры, методика проектирования.

ANNOTATION

Furdey P.G. The substantiation of resource-saving recipes for tamping-backfill slurries based on slag wastes to eliminate the technogenic voids. – Manuscript.

The thesis for a scientific degree of candidate of technical sciences in specialty 05.15.04 – "Mining and underground construction". – State Higher Educational Institution "National Mining University". Dnipropetrovsk, 2014.

On the basis of the first established regularities of rheological and structural mechanical processes in dispersed suspensions based on slag wastes it had been solved the urgent scientific and technical problem for the explanation of resource-saving recipes of tamping-backfill mixtures based on blast-furnace slags and ash-slags by damp removal in the thesis.

On the basis of experimental researches it had been proved that the slag-clay mixtures by the rheological properties are ductile-plastic suspensions, clay supplement to slag suspension adsorptional binds a water and affects on a kinetics of solidification mixture only. It had been established a power regularity the kinetics of structuring for

slag-clay suspensions based on blast-furnace slag with a specific surface area of particles of $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ and 10% additive of bentonite clay. For the first time it had been developed the cement-free and tamping suspensions.

It had been experimentally revealed nonlinear dependence of set of plastic strength back-fill mixture based on ash-slag damp removal by the density of 1480 kg/m^3 with the addition of clay and cement, which allowed to obtain a mixture of 2 MPa strength of a zero shrinkage.

It had been improved methods of design the parameters for slag-clay tamping-backfill mixtures. An experimental-industrial works to eliminate of slope trunk by slag-clay suspensions were done, it was proved an economic efficiency of their use.

Key words: slag wastes, technogenic voids, tamping-backfill slurries, rheological properties, kinetics of structuring, recipes, methods of design.