

На правах рукописи



Волков Евгений Павлович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЗАКЛАДКИ ВЫРАБОТАННОГО
ПРОСТРАНСТВА ТВЕРДЕЮЩИМИ СМЕСЯМИ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ**

Специальность 25.00.22 – «Геотехнология
(подземная, открытая и строительная)»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск, 2021

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель:

Анушенков Александр Николаевич
доктор технических наук, профессор,

Официальные оппоненты:

Никольский Александр Михайлович
доктор технических наук,
ФГБУН «Институт горного дела им.
Н.А. Чинакала Сибирского отделения
Российской академии наук»,
лаборатория подземной разработки
угольных месторождений,
заведующий лабораторией

Мажитов Артур Маратович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО МГТУ им. Г.И. Носова,
кафедра горных машин и транспортно-
технологических комплексов,
заведующий кафедрой

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Забайкальский
государственный университет»,
г. Чита

Защита диссертации состоится «09» июня 2021 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.23 при ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660025, г. Красноярск, пр-т им. газеты «Красноярский рабочий», 95, ауд. 219.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и на сайте университета: www.sfu-kras.ru.

Автореферат разослан «__» апреля 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Бондина Светлана Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Актуальным направлением совершенствования технологии подземных горных работ является широкое внедрение систем разработки с закладкой выработанного пространства. Применение закладки – одного из радикальных средств рационального использования недр – обеспечивает безопасную разработку рудных залежей с минимальными потерями и разубоживанием, с сохранением земной поверхности, окружающей среды и утилизацией отходов производства. Практика показывает, что применение систем с закладкой выработанного пространства экономически оправдана при разработках не только месторождений ценных руд цветных металлов, но и ряда угольных и железорудных месторождений.

В большинстве случаев для формирования закладочного массива используются специально добываемый заполнитель и цемент, отличающиеся высокой стоимостью, что снижает конкурентную способность систем разработки с закладкой. Одним из наиболее перспективных путей снижения затрат на закладку, является использование хвостов обогащения. Расширение возможности применения хвостов обогащения сдерживается их тонкодисперсным состоянием, достигаемым при современном технологическом цикле рудоподготовки в процессе обогащения. При этом на ряде горнодобывающих предприятий производят складирование и хранение в хвостохранилищах, что приводит к увеличению затрат на отчуждение земель и отрицательно сказывается на экологической ситуации добывающего района. Таким образом, разработка технологии закладки выработанного пространства с использованием хвостов обогащения является актуальной научной и технологической задачей.

Целью диссертационного исследования является разработка технологии закладки выработанного пространства твердеющими смесями с использованием хвостов обогащения Талнахской обогатительной фабрики (ТОФ–2).

Объект исследования– технология приготовления закладочных твердеющих смесей.

Предмет исследования – способ воздействия на материалы твердеющих смесей с использованием хвостов обогащения гидроударно-кавитационным полем.

Идея работы заключается в применении импульсного гидроударно-кавитационного воздействия активации исходных материалов твердеющих смесей с использованием хвостов обогащения.

Задачи исследования:

1. Установить закономерности повышения прочности искусственного массива и реологических свойств литых твердеющих смесей (ЛТС) с использованием хвостов обогащения и выбрать рациональный способ воздействия на материалы исследуемых смесей, обеспечивающий необходимую прочность и реологические свойства, требуемые технологией возведения искусственного массива при закладке выработанного пространства.

2. Разработать установку для активации и гомогенизации компонентов литых твердеющих смесей на основе выбранного способа воздействия и определить механизм набора прочности литых твердеющих смесей при существующих и разработанной технологиях приготовления.

3. Разработать и рекомендовать технологию закладочных работ с использованием хвостов обогащения.

Методы исследования. В работе применён комплексный подход, включающий: обобщение и анализ научно-технических публикаций по вопросам ведения закладочных работ с использованием хвостов обогащения, лабораторные и опытно-промышленные исследования, обработку результатов исследований с применением аппарата математической статистики и использованием вычислительных и графических пакетов современных программных приложений ЭВМ, проведение количественного комплексного рентгеноспектрального и рентгенофазового вещественного анализа с использованием рентгеновского дифрактометра XRD 7000.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Содержание в хвостах обогащения мелкодисперсных фракций в составе рецептур закладки обеспечивает проявление их вяжущих свойств и повышение набора прочности твердеющих смесей при их обработке в поле гидроударно-кавитационных импульсов с частотой 5000-6000 имп/с.

2. Формируемая прочность и реологические свойства литых твердеющих смесей с использованием хвостов обогащения определяется количественным присутствием дисперсных частиц хвостов обогащения в компонентах смеси, интенсивностью их совместной обработки гидроударно-кавитационными импульсами в среде вяжущего, ведущей к гомогенизации и ускоренному прохождению твердофазных химических реакций, образующих разветвленную кристаллическую решётку в процессе твердения.

3. Качество искусственного массива, возводимого в выработанном пространстве твердеющими составами с использованием хвостов обогащения, обеспечивается прочностными и реологическими свойствами закладочных смесей, формируемыми в поле гидроударно-кавитационных импульсов в процессе производства.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются проведением большого объема лабораторных и опытно-промышленными испытаниями с использованием современного исследовательского инструментария, сходимостью результатов лабораторных данных с опытно-промышленными, положительными результатами внедрения технологических решений в производство, полученной при этом эффективностью.

Научная новизна:

1. Установлены закономерности повышения прочности искусственного массива и реологических свойств литых твердеющих смесей с использованием хвостов обогащения;

2. Определен механизм набора прочности литых твердеющих смесей с использованием хвостов обогащения при существующих и разработанной технологиях приготовления;

3. Научно установлено, что гидроударно-кавитационная активация материалов смеси ведет к повышению набора прочности закладочного массива за счет гомогенизации и активации мелкодисперсной части смеси составов.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задачи исследования; обосновании способа воздействия на материалы твердеющих смесей с использованием хвостов обогащения; разработке устройства, обеспечивающего воздействие гидро-кавитационных импульсов на материалы твердеющих смесей с использованием хвостов обогащения при их производстве; постановке и проведении лабораторных и опытно-промышленных исследований по подбору и составу закладочных смесей с использованием хвостов обогащения при различных технологиях их приготовления; разработке методики определения экономико-технологической эффективности исследуемых составов закладочных смесей с использованием хвостов обогащения; апробировании разработанных устройств и технологии.

Практическая ценность работы:

– разработан гидроударно-кавитационный смеситель, обеспечивающий возможность смешивания исходных тонкодисперсных компонентов в твердеющих смесях в поле гидроударно-кавитационных импульсов, и позволяющий повысить эффективность работы вяжущего в составах смесей за счет наиболее полной гидратации вяжущего при его гомогенном распределении в среде мелкодисперсного заполнителя ЛТС;

– разработан способ приготовления твердеющей смеси с использованием гидроударно-кавитационного устройства обеспечивающий повышение скорости твердения и увеличение прочности закладочного массива за счет повышения степени гидратации и активации компонентов закладочных смесей;

– разработаны технология производства закладочных смесей и рецептуры составов с использованием хвостов обогащения, обеспечивающие необходимые прочности и реологические свойства, требуемые технологией возведения искусственного массива.

Реализация работы. Разработанные в диссертации технологические решения и рекомендации приняты к применению на руднике «Комсомольский» ЗФ ПАО ГМК «Норильский никель». Результаты выполненной работы используются в учебном процессе кафедры «Подземная разработка месторождений» ИГДГиГ СФУ (лабораторные и практические занятия, раздел курса лекций по ведению закладочных работ на подземных рудниках) при подготовке студентов направления «Горное дело», по специализации «Подземная разработка рудных месторождений» в дисциплинах «Процессы подземной разработки рудных месторождений» и «Поверхностный и стационарные комплексы».

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на всероссийских научно-технических конференциях студентов,

аспирантов и молодых ученых «Молодёжь и наука», Красноярск, 2012-2014; международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и наука: проспект Свободный», Красноярск, 2015; международном конгрессе-выставке «Цветные металлы», Красноярск, 2013-2014; всероссийской конференции к 70-летию ИГД СО РАН «Проблемы развития горных наук и горнодобывающей промышленности» (Новосибирск, 6-10 октября 2014 г.), II Всероссийской научной конференции с международным участием Малышевские чтения (Старый Оскол, 2015); международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспективы развития», Красноярск, 2016-2019.

По теме диссертационной работы опубликовано 20 научных работ, в том числе 7 в журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, получены 2 патента РФ на изобретение.

Объем и структура работы. Диссертационная работа изложена на 140 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, 6 приложений и списка используемой литературы из 117 наименований; содержит 43 рисунка, 26 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена анализу современного состоянию решаемой проблемы, дана обобщенная характеристика производства литых твердеющих смесей на горных предприятиях, применяемых систем разработки с закладкой выработанного пространства и литых твердеющих смесей с использованием хвостов обогащения.

Значительный вклад в создание, развитие теории и практики отработки месторождений системами с закладкой выработанного пространства, а также в совершенствование способов формирования закладочных массивов внесли ученые: М. И. Агошков, Х.И. Аглюков, У.А. Алдамбергенов, А.Н. Анушенков, В.В. Аршавский, О. А. Байконуров, Р.В. Балах, М.Ж. Битимбаев, Д. М. Бронников, И. Е. Ерофеев, Н. Ф. Замесов, В. Р. Именитов, В. Н. Калмыков, Д. Р. Каплунов, Л. А. Крупник, Е. В. Кузьмин, А.Н. Монтянова, В.С. Музгина, Г.А. Прокушев, А. Л. Требуков, К. Н. Трубецкой, М. Н. Цыгалов, Ю.Н. Шапошник и др.

Практика и обзор существующей литературы показали, что применение закладки выработанного пространства в определенных горно-геологических условиях является не только технически целесообразным, но и экономически оправданным при разработке месторождений.

При этом особую важность приобретают системы с закладкой при разработке месторождений ценных руд на больших глубинах и зонах тектонических нарушений, где борьба с постоянно возрастающим горным давлением и возникающими горными ударами невозможна без использования в системах разработки прочных искусственных массивов. Однако высокая стоимость твердеющих смесей, технологии их приготовления и способы доставки в выработанное пространство являются основными факторами, сдерживающими широкое их применение.

В настоящее время достигнуты значительные успехи в развитии техники и совершенствовании технологии ведения закладочных работ.

Однако применение многими горными предприятиями высокомарочных цементов и дорогостоящих инертных заполнителей значительно повышает стоимость закладки, при этом только частично используются технологии повышения активности вяжущего. Переход на низкомарочные вяжущие (цемент и молотые гранулированные шлаки), изыскание новых экономически выгодных технологий производства закладочных смесей, а так же использование вяжущих и заполнителей, в качестве которых можно применять хвосты обогатительных фабрик, несомненно, будет способствовать распространению систем с закладкой в практике горных работ и является актуальной задачей, решение которой позволит значительно расширить сырьевую базу многих горных предприятий, повысить эффективность их работы и решить вопросы охраны окружающей среды.

Практически все действующие сегодня в горной промышленности закладочные комплексы работают в непрерывном режиме приготовления твердеющих смесей. Опыт применения таких технологий на ЗК рудников показал, что не достигается повышения активности исходных материалов, прочностные и реологические характеристики. Значительная масса используемого цемента не участвует в реакции гидратации.

Основным направлением снижения себестоимости закладочных работ является использование отвальных продуктов различных производств в качестве вяжущих и заполнителей. Механические свойства конкретного состава твердых ингредиентов ЛТС могут существенно меняться от режима их активации и водосодержания, определяющих прочность и транспортабельность твердеющих смесей.

Опыт работы закладочных комплексов рудников России и стран СНГ показывает, что широкое распространение в производстве твердеющих смесей получила мельничная технология.

Известно, что основным преимуществом шаровых мельниц, используемых в этой технологии, является простота конструкции и обслуживания, а также большая производительность. Однако они металло и энергоемкие, и отличаются функциональными ограничениями в эффективной тонине помола и тонкодисперсного перемешивания измельчаемого материала. Как показывают исследования, приготовление качественных закладочных смесей с использованием хвостов обогащения в шаровых мельницах не позволяют применять их полную фракцию.

В настоящее время объем отходов обогащения, накапливающихся в процессе эксплуатации рудных месторождений, достиг сотни миллионов кубических метров. Это сопровождается изъятием из сфер сельскохозяйственного, лесного и других фондов значительных площадей ценных земель для размещения хвостохранилищ (рис. 1, табл. 1). Хвостохранилище наносит существенный вред окружающей среде. В первую

очередь, это связано с загрязнением поверхностных и грунтовых вод, а также воздушной среды и почвы.

Таблица 1 – Земли, отчуждаемые под хвостохранилища некоторых горно-обогатительных комбинатов

Объект	Площадь хранилищ, га	Объём накопленных отходов, млн м ³	Складирование отходов, млн т/год
АО «Алмалыкский ГМК» (Узбекистан), МОФ №1	800	400	27
АО «Алмалыкский ГМК» (Узбекистан), сектор МОФ	1550		
АО «Алмалыкский ГМК» (Узбекистан), сектор СОФ	431		
АО «Александринская горнорудная компания» (Челябинская обл.)	55	5,06	2
АО «Апатит», АНОФ-2 (г. Кировск Мураманская обл.)	780	720	160
АО «Апатит», АНОФ-3 (г. Кировск Мураманская обл.)	1800		110
ТОО «Корпорация «Казахмыс» ПО «Балхашцветмет» (Казахстан)	1760	200	24
Металлургический завод по производству чугуна «ПАНГ ПЕТ» (Союз Мьянмы Бирма)	18	1	0,6
АО «Бокситогорский глинозем» (Ленинградская обл.)	80	16,2	0,3
АО «Altyntau Kokshetau» «Васильевский ГОК», Хвостохранилище флотации, (Казахстан)	620	144	236
АО «Altyntau Kokshetau» «Васильевский ГОК», Хвостохранилище сорбции, (Казахстан)	216	6,5	
АО «АГД ДАЙМОНДС», ГОК на базе месторождения алмазов им. В.П.Гриба (Архангельская обл.)	305	25	4,5
АО «ГМК «Дальполиметалл», центральная обогатительная фабрика (Приморский край)	51,8	13,3	8,7
АО «Altyntau Kokshetau» Обогатительная фабрика «Алтай» (Казахстан)	250	80	2,7
АО «Маднеули», ОФ (Грузия)	48	27,7	1,7
АО «Северо-западная фосфорная компания» (Мурманская обл.)	280	48	6
АО «Учалинский горно-обогатительный комбинат» (Башкортостан)	105	35	5,2

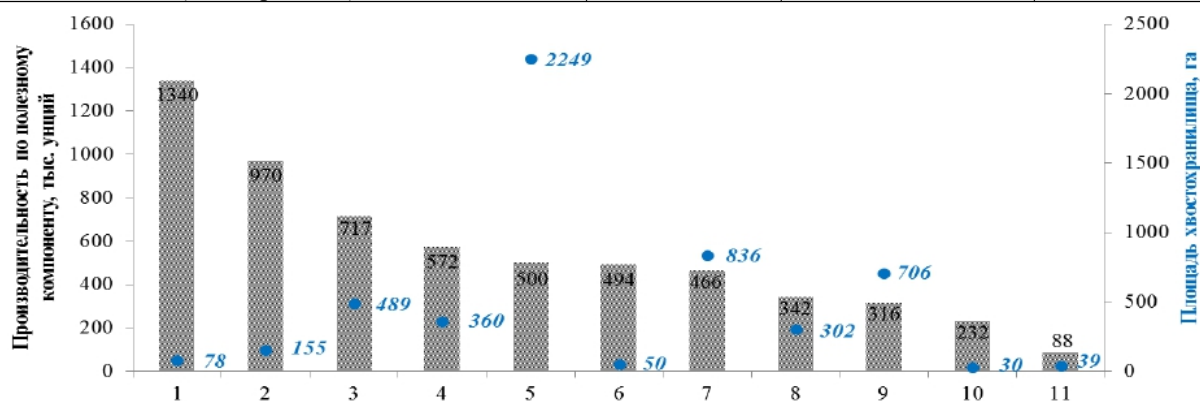


Рисунок 1 – Площади хвостохранилищ при производительности горно-обогатительных предприятий со сроком эксплуатации: 1 – 14 лет (Cortez Gold Mine); 2 – 23 года (Yanacocha Mine); 3 – 23 года (Takwa Mine); 4 – 4 года (Pueblo Viejo Gold Mine); 5 – 29 лет (Paracatu Mine); 6 – 16 лет (Geita Gold Mine); 7 – 37 лет (АО «Васильевский ГОК»); 8 – 16 лет (Morila Gold Mine); 9 – 27 лет (Kalgoorlie Mine); 10 – 21 год (Cripple Creek & Victor Gold Mine); 11 – 10 лет (Боголюбовское месторождение)

Таким образом, обоснована актуальность разработки технологии закладки выработанного пространства твердеющими смесями с использованием хвостов обогащения.

Во второй главе с целью изучения различных технологий приготовления закладочных смесей с использованием хвостов обогащения в качестве мелкодисперсного заполнителя, на первом этапе работы были проведены экспериментальные исследования составов твердеющих закладочных смесей ХЦ (хвосты обогащения и цемент) и АХЦ (ангидрит, хвосты обогащения и цемент) по двум способам: приготовления твердеющих смесей в лабораторных условиях с использованием лопастного смесителя (рис.2) и шаровой мельницы (рис.3).

В качестве вяжущего материала для приготовления закладочных смесей используется портландцемент М300. Ангидрит используется в качестве слабовяжущего материала, позволяющего уменьшить расход цемента и улучшить при этом реологические свойства составов смесей. Химический состав ангидрита показан в табл. 2.

Таблица 2 - Химический состав ангидрита

Содержание окислов, %						
H ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
1,08	6,32	1,78	1,35	35,42	2,97	45,25

Истинная плотность - 2,84 т/м³. Компонентный состав: карбонаты Ca и Mg – 12%, ангидрит + гипс – 78%, глинистые - 9,5%.

Вещественный состав и истинная плотность породных хвостов, получаемых в настоящее время на ТОФ, а также качественно - количественные показатели в отвальном продукте, выделенном из смеси медистых и вкрапленных руд, представлены в табл. 3.

Таблица 3 - Истинная плотность, вещественный и химический составы породных хвостов ТОФ

Показатели	Значения показателей для породных хвостов, выделенных из:		
	шихты богатых руд		медистых и вкрапленных руд
	общие	песковая часть	
1. Выход от руды, %	25,0	20,0	85,0
2. Содержание, %			
Никель	0,35	0,25	0,10
Медь	0,08	0,07	0,12
Сера	7,17	6,10	2,95
Железо	26,90	26,87	4,99
Кобальт	0,021	0,018	0,006
оксиды: кремния	28,29	29,15	32,61
Кальция	8,67	8,94	22,15
Магния	5,51	5,75	10,37
Алюминия	7,73	7,87	7,41
3. Массовая доля, г/т			
Халькопирит	следы	следы	0,64
Пентландит	0,80	0,70	0,42
Пирротин	12,49	8,0	0,84

Магнетит	13,14	17,4	0,51
Порода	73,57	73,9	97,59
Платина	0,26	0,20	0,32
Палладий	0,87	0,76	0,98
Родий	0,11	0,095	0,032
Рутений	0,044	0,036	0,0106
сумма платиноидов	1,284	1,091	1,3426
Золото	0,034	0,031	0,101
4. Среднее значение истинной плотности, т/м ³	3,36	3,38	2,89

Экспериментальные исследования проводились в условиях лаборатории кафедры ПРМ ИГДГиГ СФУ на имеющемся оборудовании и инструментарии.

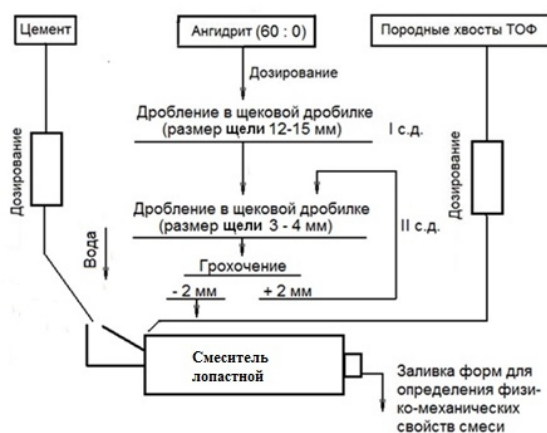


Рисунок 2 - Схема приготовления твердеющей смеси ХЦ и АХЦ в лабораторных условиях с использованием лопастного смесителя

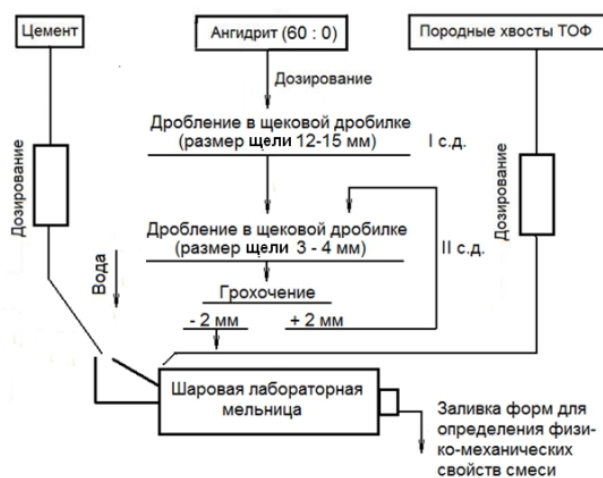


Рисунок 3 - Схема приготовления твердеющей смеси ХЦ и АХЦ в лабораторных условиях с использованием шаровой мельницы

Примечание: для исследования смеси ХЦ из схемы исключается использование и подготовка ангидрита

Время смешивания во всех экспериментах составило 10 мин. Для всех исследуемых составов определены реологические свойства и прочность образцов в контрольные сроки твердения (табл. 4, 5), составлены графики, отображающие кинетику набора прочности (рис. 4 - 7).

Таблица 4 – Составы с использованием хвостов и цемента, с применением лопастного смесителя и шаровой мельницы(ХЦ)

Схема приготовления	Расход материалов, кг/м ³			$\gamma_{\text{тв. смеси}}$ т/м ³	Контрольная характеристика прочности, МПа, сутки			
	Хвосты ТОФ	Цемент	Вода, л		3	7	28	90
в лопастном смесителе	1246	170	500	1,92	-	0,3	0,8	1,25
	1183	240	500	1,92	0,3	0,55	1,5	2,1
	1112	320	500	1,93	0,45	0,85	2,0	3,05
	1039	400	500	1,94	0,75	1,35	3,1	4,0
в шаровой мельнице	1246	170	500	1,92	-	0,35	0,95	1,5
	1183	240	500	1,92	0,3	0,55	1,25	2,0
	1111	320	500	1,93	0,6	1,2	2,25	3,3
	1039	400	500	1,94	1,5	2,25	3,3	4,7

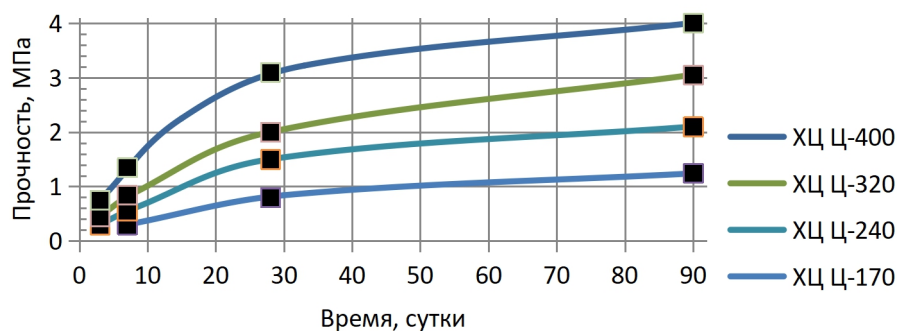


Рисунок 4 - Кинетика твердения составов ХЦ с использованием лопастного смесителя

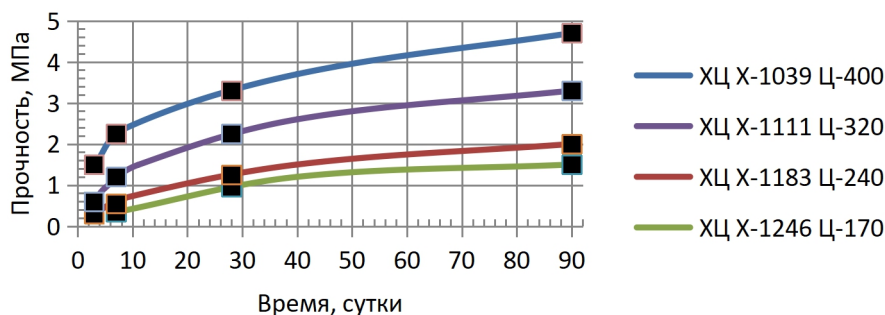


Рисунок 5 - Кинетика твердения составов ХЦ с использованием шаровой мельницы

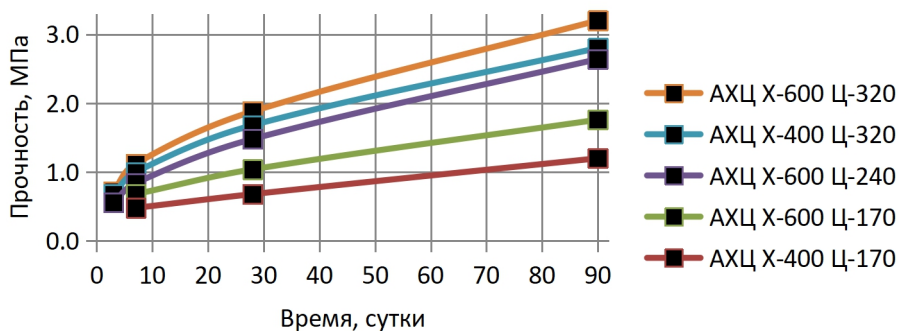


Рисунок 6 - Кинетика твердения составов АХЦ с использованием лопастного смесителя

Таблица 5 – Составы с использованием ангидрита, хвостов и цемента, с применением лопастного смесителя и шаровой мельницы (АХЦ)

Схема приготовления	Расход материалов, кг/м ³				$\gamma_{\text{тв. смеси}}$ т/м ³	Контрольная характеристика прочности, МПа, сутки			
	Ангидрит	Хвосты ТОФ	Цемент	Вода, л		3	7	28	90
в лопастном смесителе	400	853	170	500	1,92		0,5	0,7	1,2
	600	657	170	500	1,93		0,7	1,0	1,8
	600	594	240	500	1,93	0,6	0,8	1,5	2,6
	400	718	320	500	1,94	0,7	1,0	1,7	2,8
	600	521	320	500	1,94	0,7	1,1	1,9	3,2
в шаровой мельнице	400	853	170	500	1,92	-	0,6	0,85	1,5
	600	657	170	500	1,93	-	0,85	1,3	2,2
	600	594	240	500	1,93	0,7	1,05	1,85	3,3
	400	718	320	500	1,94	0,85	1,25	2,1	3,5
	600	521	320	500	1,94	0,9	1,4	2,35	4,0

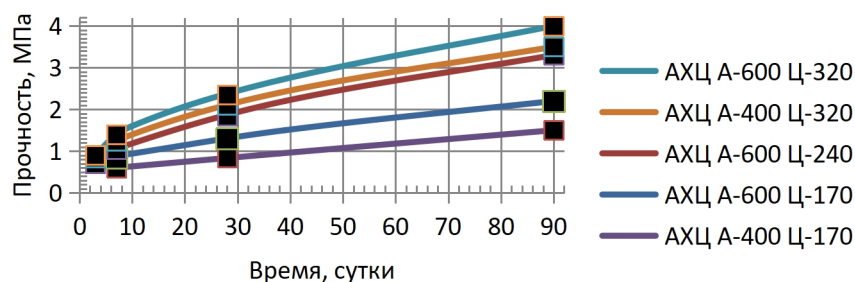


Рисунок 7 - Кинетика твердения составов АХЦ с использованием шаровой мельницы

Анализ результатов исследований показал существенную зависимость прочности составов закладки с использованием хвостов обогащения и их реологических свойств от технологии измельчения и перемешивания компонентов смеси, позволил установить рациональный способ приготовления закладки в шаровых мельницах.

Основные закономерности при производстве ЛТС в шаровой мельнице совместного приготовления многокомпонентных твердеющих смесей, когда мельница является активным смесителем, заключаются в том, что во время измельчения и перемешивания смеси в водной среде формируется определенное соотношение активной гомогенной части компонентов закладки, которое влияет на ее прочность и реологические свойства. Это позволяет заключить, что количественное и гранулометрическое соотношение компонентов в смеси закладки оказывает большое влияние на ее прочность и реологические свойства.

Совместный анализ процессов кристаллизации по срокам набора прочности при различных расходах компонентов смеси с применением рассматриваемых технологий приготовления ЛТС показал, что в зависимости от соотношения компонентов в составе смеси, подаваемой в смеситель и шаровую мельницу, происходит перераспределение главенствующих фаз структурных образований гидратированных смесей.

Технологии производства ЛТС с использованием лопастного смесителя и шаровой мельницы позволяют обеспечить гидратирование компонентов смесей и прохождение процессов кристаллизации. Однако при этом низкая интенсивность совместного перемешивания компонентов смеси, совмещенная с обновлением их гидратирующих поверхностей, не обеспечивает качественную гомогенизацию материалов ЛТС с дисперсной частью хвостов обогащения, что ведет к повышению расхода дорогостоящего вяжущего и снижению набираемой прочности составами закладки.

Для обеспечения гомогенности и активности компонентов исследуемых составов ЛТС необходимо создать условия интенсивной обработки материалов, обеспечивающие эффективную гомогенизацию и активацию материалов ЛТС с использованием хвостов обогащения, проявление вяжущих свойств мелкодисперсных фракций хвостов обогащения и повышение вскрытия зёрен цемента в технологии их приготовления

В третьей главе представлены результаты теоретического изучения механизма гомогенизирующего и активирующего воздействия на компоненты

закладочных смесей при их производстве. На основании анализа изученного материала был определен механизм частотной гидроударно-кавитационной обработки смеси, обоснован способ воздействия, обеспечивающий обработку материалов смеси в поле гидроударно-кавитационных импульсов, создан гидроударно-кавитационный смеситель (ГКС) (патент РФ № 2550609, от 10.05.2015).

В смесителе создается комплексное механическое воздействие на частицы компонентов смеси. Образуется концентрированная пульсирующая кавитационная область между профилированными отверстиями и отражателями. Пульсации кавитационной области создают переменные поля скоростей и давлений, что способствует дополнительному гидродинамическому воздействию на смесь, сопровождающемуся ее активацией. Соударение частиц смеси с вибрирующими отражателями вызывает их разрушение, измельчение, интенсивное перемешивание и повышение однородности состава смеси.

Схема приготовления твердеющих смесей для лабораторных исследований по разработанной технологии с использованием ГКС представлена на рисунке 8.



Рисунок 8 - Схема приготовления твердеющей смеси ХЦ и АХЦ в лабораторных условиях с использованием ГКС

Примечание: для исследования смеси ХЦ из схемы исключается использование и подготовка ангидрита

По разработанной технологии приготовления закладки исследовались смеси, представленные в таблице 6, составлены графики, отображающие кинетику набора прочности (рис. 9 и 10).

Таблица 6 – Составы с использованием ангидрита, хвостов и цемента с применением ГКС

Расход материалов, кг/м ³				Контрольная характеристика прочности, МПа, сутки		
Ангидрит	Хвосты ТОФ	Цемент	Вода, л	7	28	90
-	1246	170	500	0,5	1,2	2,0
-	1183	240	500	0,7	1,6	2,6
-	1112	320	500	1,6	2,9	4,3
-	1039	400	500	2,9	4,3	6,1
400	853	170	500	0,9	1,6	2,4
600	657	170	500	1,2	2,0	2,9
600	594	240	500	1,4	2,5	3,8
400	718	320	500	1,7	3,0	4,4
600	521	320	500	1,9	3,3	4,7

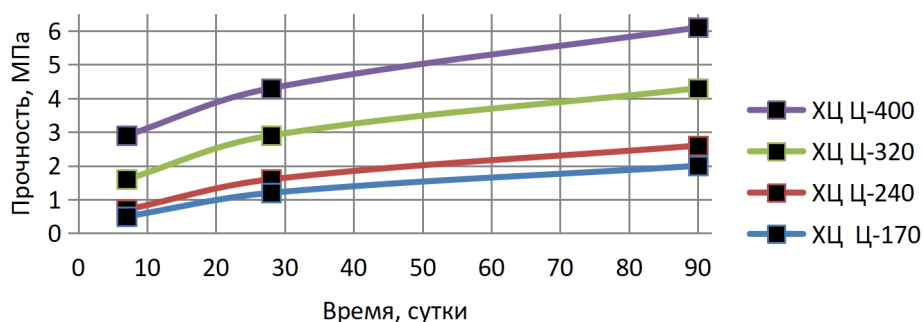


Рисунок 9- Кинетика твердения составов ХЦ с применением ГКС

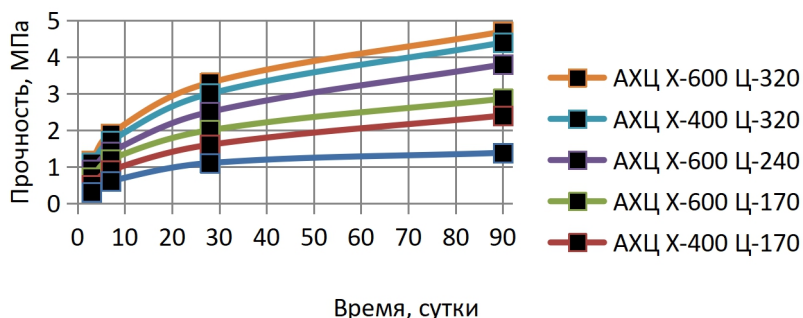


Рисунок 10 - Кинетика твердения составов АХЦ с применением ГКС

Полученные результаты показали, что приготовление литых твердеющих смесей на основе гидроударно-кавитационной активации материалов смеси позволяет обеспечить качественную активацию.

Совместный анализ процессов кристаллизации по срокам набора прочности при различных расходах компонентов смеси с применением разработанной технологии приготовления ЛТС показал, что в зависимости от соотношения компонентов в составе смеси, подаваемой в ГКС, происходит перераспределение главенствующих фаз структурных образований гидратированных смесей.

Установлено, что составы АХЦ, твердеющие за счет кристаллизации в них ангидрита и новообразований, в процессе взаимодействия хвостов обогащения с цементом и ангидритом после гидроударно-кавитационной обработки, набирают максимум прочности (распределение фаз структурных образований представлено в табл. 7, рентгеновские дифрактограммы образцов на рис. 11, 12).

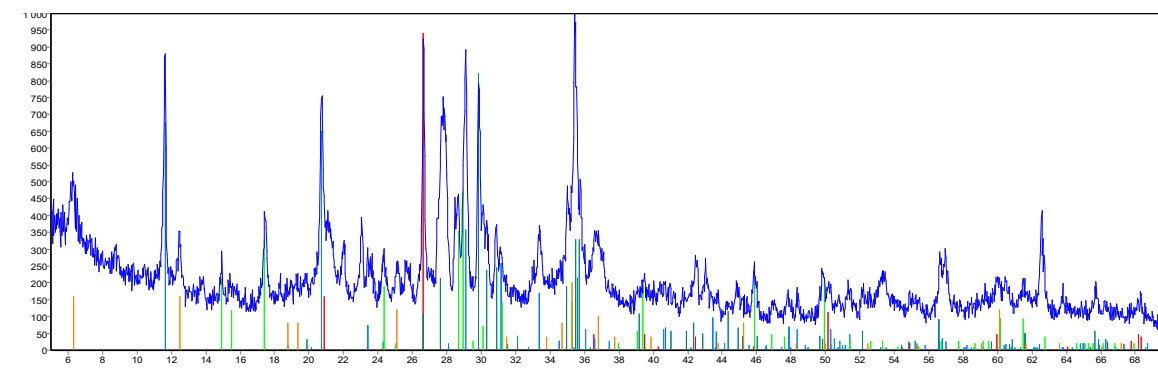


Рисунок 11 - Рентгеновские дифрактограммы образцов ХЦ

Таблица 7 – Распределение фаз структурных образований ЗС (с применением ГКС)

Время твердения, сутки	Способ приготовления	
	В шаровой мельнице	ГКС
7	$2\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (полугидрат) $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (гипс) $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ $(\text{гидромоносульфоалюминат кальция})$	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (гипс) $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ $(\text{гидромоносульфоалюминат кальция})$ $3 \text{CaAl}_2\text{O}_4 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ (эtringит)
28	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (гипс) $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ $(\text{гидромоносульфоалюминат кальция})$ $3 \text{CaAl}_2\text{O}_4 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ (эtringит)	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (гипс) $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ $(\text{гидромоносульфоалюминат кальция})$ $4\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (гидроферрит кальция) $\text{Ca}_5(\text{Si}_6\text{O}_{18}\text{H}_2) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (тоберморит) $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; $\text{Ca}_6(\text{AlSiO}_4)_{12} \cdot 30\text{H}_2\text{O}$; $\text{CaAl}_2(\text{SiO}_3)_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$; $\text{Ca}_6(\text{AlSiO}_4)_{12} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (гидросиликаты и гидроалюмосиликаты (типа гидрогранатов))
90	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (гипс) $3 \text{CaAl}_2\text{O}_4 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ (эtringит) $4\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (гидроферрит кальция) $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ $(\text{гидромоносульфоалюминат кальция})$	Разрастание фаз после 28-ми суток

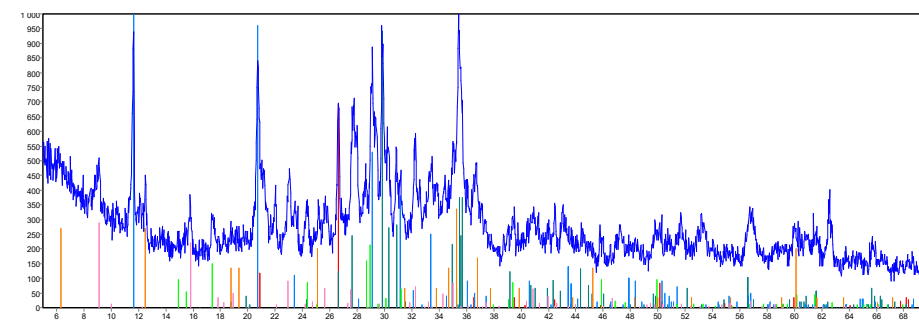


Рисунок 12 - Рентгеновские дифрактограммы образцов АХЦ

С учетом полученных результатов установлено, что содержание в хвостах обогащения мелкодисперсных фракций класса -0,015 мм в составе рецептур закладки обеспечивает проявление их вяжущих свойств и повышение набора

прочности твердеющих смесей при их обработке в поле гидроударно-кавитационных импульсов с частотой 5000-6000 имп/с.

Разработанная технология приготовления закладки включает в себя следующие стадии: Цемент через дозатор, а вода по трубопроводу через расходомер поступали на предварительное смешивание в шаровую мельницу; ангидрит после дробления и измельчения, подавался в шаровую мельницу; хвосты обогащения через дозатор подавались в шаровую мельницу для предварительного перемешивания с измельченным ангидритом и цементом. Из шаровой мельницы предварительно перемешанный раствор твердеющей смеси поступал в ГКС, где происходила гомогенизация и активация раствора. Из ГКС твердеющая закладочная смесь по трубопроводу поступала в специальные формы.

Результаты лабораторных исследований свидетельствуют о том, что разработанная технология производства ЛТС с использованием ГКС позволяет обеспечить высокую интенсивность совместного перемешивания мелкодисперсных компонентов смеси, обновление их гидратирующих поверхностей, ведущие к ускорению прохождения твердофазных химических реакций и как следствие снижение расхода вяжущего.

На основании ранее проведенных исследований было определено, что образцы закладочных смесей, приготовленные по мельничному способу производства, имеют прочность в среднем на 20% выше образцов, приготовленных по технологии с применением лопастного смесителя. В тоже время, образцы закладочных смесей, приготовленные по технологии с применением гидроударно-кавитационного устройства, имеют прочность в среднем на 30% выше образцов, приготовленных по мельничному способу.

Следовательно, способ приготовления твердеющей смеси с применением гидроударно-кавитационного смесителя обеспечивает повышение скорости твердения и увеличение прочности закладочного массива за счет повышения степени гидратации и активации компонентов закладочных смесей с использованием хвостов обогащения.

Таким образом, формируемая прочность и реологические свойства литых твердеющих смесей с использованием хвостов обогащения определяется количественным присутствием дисперсных частиц хвостов обогащения в компонентах смеси, интенсивностью их совместной обработки гидроударно-кавитационными импульсами в среде вяжущего, ведущей к обновлению гидратирующих поверхностей, гомогенизации и ускоренному прохождению твердофазных химических реакций, образующих разветвленную кристаллическую решетку в процессе твердения.

Для подтверждения результатов лабораторных исследований, проведены опытно-промышленные испытания (ОПИ) разработанной технологий в натурных условиях на закладочном комплексе рудника «Комсомольский» ЗФ ПАО ГМК «Норильский никель».

Подготовка и подача материала осуществлялись по существующим технологическим цепочкам приготовления смеси на ПЗК рудника

«Комсомольский». Весовое соотношение компонентов смесей устанавливалось и поддерживалось во время работы питателями и дозаторами, имеющимися в технологических линиях ПЗК. Контроль прочности образцов приготовленной смеси, её текучести, тонкости измельчения, температуры и влажности проводилось согласно технологической инструкции по производству закладочных работ на ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» в лаборатории ПЗК.

Сырье поступает на холодный склад, далее бульдозерами через колосниковые решетки подается в бункеры. Дозирование материалов из бункеров осуществляется питателями. Далее по транспортеру материалы поступают на молотковую дробилку и после дробления по транспортерам подаются в мельницу. На комплексе установлено две мельницы (одна мельница работает, вторая используется как резервная).

Цемент на комплекс поступает автомобильным транспортом. Из автомобильных цистерн цемент с помощью сжатого воздуха поступает в два цементных силоса, далее через барабанный дозатор в репульпатор, где смешивается с водой, затем цементное молоко по желобам поступает в мельницы. Из шаровой мельницы предварительно перемешанный раствор твердеющей смеси поступал в ГКС

В ГКС происходит доизмельчение и окончательное смешивание всех компонентов закладочной смеси. Из ГКС готовая закладочная смесь транспортируется в горные выработки.

В результате исследований (табл. 8) было определено, что образцы закладочных смесей, приготовленные по технологии с применением гидроударно-кавитационного смесителя, имеют прочность выше образцов, приготовленных по мельничному способу.

Таблица 8 – Результаты опытно-промышленных испытаний составов АХЦ (по данным ЦГБ)

	Расход материалов, кг/м ³				Контрольная характеристика прочности, МПа, сутки		
	Ангидрит	Хвосты ТОФ	Цемент	Вода, л	7	28	90
Шаровая мельница	400	853	170	500	0,8	1,3	2,0
	600	657	170	500	1,1	1,7	2,8
	400	718	320	500	1,6	2,7	4,5
	600	521	320	500	1,8	3,0	5,1
ГКС	400	853	170	500	1,7	2,3	3,5
	600	657	170	500	1,8	2,5	3,7
	400	718	320	500	2,1	3,2	5,5
	600	521	320	500	2,7	4,8	6,6

Следовательно, способ приготовления твердеющей смеси с использованием гидроударно-кавитационного смесителя обеспечивает увеличение прочности закладочного массива за счет гомогенизации и активации компонентов закладочных смесей с использованием хвостов обогащения.

Таким образом, качество искусственного массива, возводимого в выработанном пространстве твердеющими составами с использованием хвостов обогащения, обеспечивается реологическими свойствами закладочных смесей, формируемыми в поле гидроударно-кавитационных импульсов в процессе производства.

На основании проведенных исследований для производства закладочных работ рекомендованы составы смесей ХЦ и АХЦ и технология приготовления закладки (рис. 13).

Ангидрит разгружается на открытых складах, и далее бульдозерами через неподвижный грохот и приемные бункера подается на ленточные конвейеры. В разгрузочных частях бункеров, непосредственно над конвейерами, установлены питатели и шибера, регулирующие расходы подаваемого материала. Ангидрит проходит стадию дробления и измельчения. Цемент из цементовозов разгружается в силоса с помощью сжатого воздуха и далее подается в шаровую мельницу. Хвосты обогащения после стадии циклонирования подаются в шаровую мельницу для предварительного перемешивания с измельченным ангидритом и цементом. Из шаровой мельницы предварительно перемешанная закладочная смесь подается в ГКС, где происходит гомогенизация и активация материалов смеси. Готовая к транспортированию и возведению закладочная смесь из ГКС подается в приемную воронку и далее по закладочным скважинам в выработанное пространство.

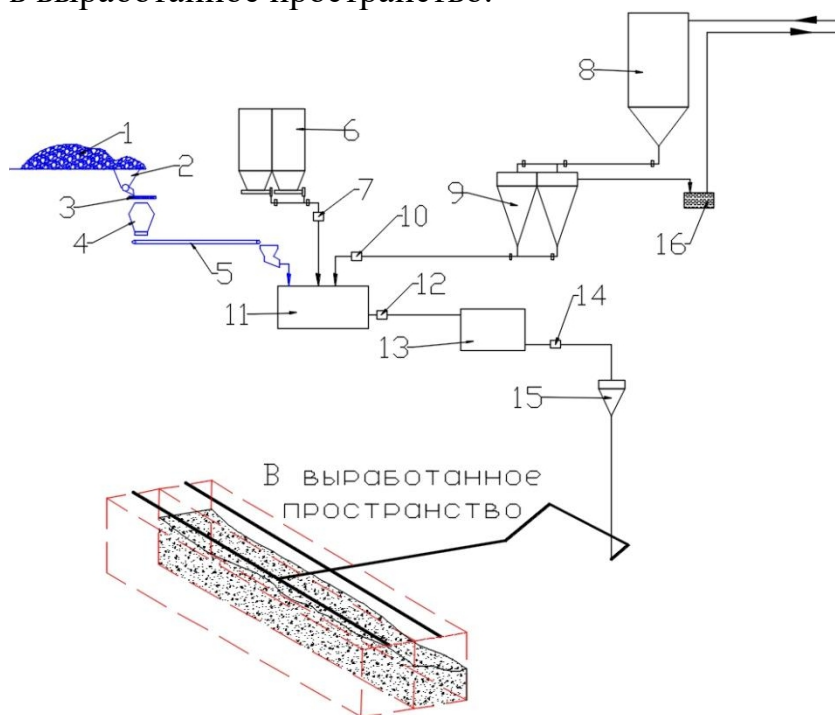


Рисунок 13 – Разработанная технология приготовления закладки с использованием гидроударно-кавитационной активации материалов смеси: 1 – склад ангидрита; 2 – приемный бункер; 3 – грохот; 4 – дробилка; 5 – конвейер; 6 – силосы цемента; 7 – дозатор цемента; 8 – бак хвостов обогащения; 9 – гидроциклоны; 10 – дозатор хвостов обогащения; 11 – шаровая мельница; 12 – расходомер; 13 – ГКС; 14 – контроль качества; 15 – приемная воронка; 16 – водосборник

В четвертой главе выполнена оценка экономической эффективности разработанной технологии, произведен расчет капитальных затрат на строительство предприятия, произведено планирование организации труда и расчет заработной платы, себестоимости руды и основных технико-экономических показателей для рудника «Комсомольский» ЗФ ПАО ГМК «Норильский никель».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся научно-квалификационной работой, изложены научно обоснованные технические и технологические решения актуальной научно-практической задачи по разработке технологии закладки выработанного пространства твердеющими смесями с использованием хвостов обогащения, имеющие важное значение для развития горнодобывающей отрасли России. Основные научные и практические результаты проведенных исследований заключаются в следующем:

1. Определены закономерности повышения прочностных и реологических свойств ЛТС с использованием хвостов обогащения ТОФ-2 при различных способах обработки в технологиях их приготовления.
2. Обосновано применение гидроударно-кавитационного воздействия на материалы закладочной смеси с использованием хвостов обогащения.
3. Разработана установка, обеспечивающая воздействие гидроударно-кавитационных импульсов на материалы твердеющих смесей с использованием хвостов обогащения.
4. Разработана технология закладки выработанного пространства хвостами обогащения с применением гидроударно-кавитационного смесителя.
5. Проведены лабораторные исследования предлагаемых устройства и технологии производства литых твердеющих смесей для закладки выработанного пространства.
6. Изучены механизмы набора прочности литых твердеющих смесей в исследуемых технологиях.
7. Установлено, что разработанная технология закладки выработанного пространства обеспечивает интенсивность совместного перемешивания материалов твердеющей смеси, гомогенизацию, обновление их гидратирующих поверхностей, ведущее к расширенному прохождению твердофазных химических реакций и как следствие к повышению прочности формируемого закладочного массива.
8. Проведена апробация разработанной технологии закладки выработанного пространства хвостами обогащения ТОФ-2 и рекомендованы рецептуры составов для закладки на руднике «Комсомольский».
9. Выполнена экономическая оценка применения закладочных смесей различных составов и марок на примере рудника «Комсомольский» ЗФ ПАО ГМК «Норильский никель».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ
Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, и
приравненные к ним публикации:

1. Разработка рецептур и механизма активации закладочных смесей для подземной разработки полезных ископаемых с использованием хвостов обогащения / **Е. П. Волков**, С.А. Вохмин, А.Н. Анушенков, А.И. Голованов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и Технологии / Сиб. фед. Ун-т ; Красноярск, 2014. – Т. 7, № 3. – С. 295–303.

2. **Волков Е.П.**, Вохмин С.А., Голованов А.И. Методические положения по выбору рациональных составов закладочных смесей на основе их экономико-технологического сравнения // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1; URL: <http://www.science-education.ru/121-19584> (дата обращения: 07.06.2015)

3. Закладочные смеси на основе отходов обогащения руд в системах подземной разработки месторождений Норильского промышленного района / **Е.П. Волков**, А.Н. Анушенков, П.С. Гузанов, А.Э. Лытнева // Горный журнал. – Москва. – 2015, - №6. – С. 85-87. (Scopus).

4. **Волков Е.П.**, Стовманенко А.Ю., Анушенков А.Н. Совершенствование технологии и оборудования для утилизации твердых промышленных отходов, путем добавления их в состав литых твердеющих закладочных смесей // Известия Уральского государственного горного университета. 2017. №4(48). С. 84-89.

5. **Волков Е.П.**, Анушенков А.Н. Developing the technology of mine stowing with processing tailings based hardening blends // Известия высших учебных заведений. Горный журнал 2019. №7. С. 5-13.

6. Конструирование способов отработки наклонных залежей камерной системой разработки с закладкой / Р.Р. Алексеев, Д.С. Бритвин, **Е.П. Волков**, Б.А. Ахпашев, А.Н. Анушенков // Вестник КузГТУ. - 2019. - №6. - С. 37-43.

7. Повышение эффективности трубопроводного транспорта литых закладочных смесей в условиях подземной разработки месторождений полезных ископаемых / А.Ю. Стовманенко, **Е.П. Волков**, А.Н. Анушенков // Горное оборудование и электромеханика. - 2019. - №6. - С. 33-41.

Патенты:

8. Патент № 2550609 РФ Смесительно-активирующее устройство для жидких сред / **Волков Е.П.**, Стовманенко А.Ю., Анушенков А.Н. Опубл. 10.05.2015 Бюл. №13.

9. Патент №2607329 РФ Способ приготовления литых твердеющих закладочных смесей на основе мелкодисперсного заполнителя / Анушенков А.Н., **Волков Е.П.**, Стовманенко А.Ю.

Другие издания:

10. **Волков Е.П.**, Лабораторные исследования по подбору составов закладочных смесей с использованием породной части хвостов обогащения [Электронный ресурс] / Е.П. Волков, П.А. Тодинов, А.И. Голованов // М75

Молодежь и наука: сборник материалов IX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 385-летию со дня основания г. Красноярска - Красноярск. - 2013. - Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s037/s037-010.pdf>

11. **Волков Е.П.**, Результаты исследования расплыва по Суттарду смесей составов АХЦ (А-600 Ц-320) и ХЦ (Ц-320) [Электронный ресурс] / Е.П. Волков, А.Н. Анушенков, А.И. Голованов // М75 Молодежь и наука: сборник материалов IX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 385-летию со дня основания г. Красноярска – Красноярск/ - 2013. - Режим доступа:<http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s037/s037-011.pdf>

12. **Волков Е.П.**, Анушенков А.Н., Голованов А.И. Исследования по подбору и составу закладочных смесей марок ХЦ, АХЦ с применением хвостов обогащения ТОФ // Сборник научных статей V Международного Конгресса и Выставки «Цветные металлы - 2013», Красноярск, 2013.

13. **Волков Е.П.**, Голованов А.И. Лабораторные исследования по подбору и составу закладочных смесей марки ХЦ с использованием породной части хвостов обогащения // Цветные металлы -2014: Сб.тезисов докладов. – Красноярск: Версо, 2014 г. – с.76-77.

14. **Волков Е.П.**, Анушенков А.Н. Разработка рецептур твердеющих смесей на основе породных хвостов обогащения для закладки подземных выработок Норильского горно-металлургического комбината // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук: Научн. журнал. – Новосибирск: ИГД им. Н.А. Чинакала СО РАН, 2014 г. – с.207-211.

15. **Волков Е.П.** Исследования рецептур и механизма активации закладочных смесей для подземной разработки полезных ископаемых // Сборник научных статей II Всероссийской научной конференции с международным участием Малышевские чтения, Старый Оскол, 2015.

16. **Волков Е.П.**, Разработка технологии закладки горных выработок [Электронный ресурс] / Е.П. Волков, А.Н. Анушенков // М75 Молодежь и наука: сборник материалов IX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 385-летию со дня основания г. Красноярска – Красноярск/ - 2015. - Режим доступа:<http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s037/s037-011.pdf>

17. **Волков Е.П.**, Технология приготовления литой твердеющей закладки из отходов производства [Электронный ресурс] / Е.П. Волков, Д.П. Ляхов // М75 Молодежь и наука: сборник материалов IX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 385-летию со дня основания г. Красноярска – Красноярск/ - 2015. - Режим доступа:<http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s037/s037-011.pdf>