

Научная статья

УДК 622.822.33

DOI: 10.26730/1999-4125-2023-3-100-112

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИК ПО ОБОСНОВАНИЮ РАЦИОНАЛЬНЫХ СОСТАВОВ ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКИ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК

Кантемиров Валерий Данилович, Титов Роман Сергеевич,
Яковлев Андрей Михайлович

Институт горного дела УрО РАН

*для корреспонденции: ukr@igduran.ru

Аннотация.

Актуальность. Использование твердеющей закладки при подземной разработке полезных ископаемых является необходимым условием повышения эффективности горных работ, улучшения условий и безопасности труда, сохранения земной поверхности. Особенно актуальным является апробация методик по обоснованию рецептур твердеющей закладки выработанного пространства с использованием отходов горного производства подземных рудников, разрабатывающих сложноструктурные месторождения в тяжелых горно-геологических условиях.

Цель работы. Данная работа посвящена апробации методик по разработке рецептур твердеющих закладочных смесей на основе вскрышных пород и отходов обогащения на примере условий подземной отработки Ярегского нефтетитанового месторождения в Республике Коми.

Методология. Требования к закладочным смесям формируются во многом условиями и принятыми технологиями подземной разработки, способами транспортирования и укладки закладочного материала твердеющей смеси в выработанное пространство рудников. Свойства твердеющих закладочных смесей характеризуются физико-механическими, гранулометрическими и реологическими параметрами. Основными характеристиками закладочного массива являются прочность и динамика набора прочности. Расчетная нормативная прочность закладочного массива для условий Ярегского месторождения в зависимости от заданной глубины разработки и параметров принятой системы разработки установлена в диапазоне от 3,51 до 9,65 МПа. Состав закладочной смеси на основе цементного вяжущего рассчитывается по методике, принятой для расчета бетонной смеси: определяется цементно-водное (Ц/В) или водоцементное (В/Ц) отношение, расход воды, расход цемента, после чего определяется расход крупного и мелкого заполнителей на 1 м³ смеси. В статье представлены методика и результаты расчета и испытаний компонентного состава закладочной смеси.

Результаты. Обоснованы составы (рецепты) твердеющей закладочной смеси на основе хвостов обогащения и отвальных пород Ярегского нефтетитанового месторождения. По результатам лабораторно-аналитических исследований для реализации предложено два состава твердеющей закладочной смеси для текущих горно-геологических условий разработки подземных выработок Ярегского месторождения и на ближайшую перспективу.

**Информация о статье**

Поступила:

12 апреля 2023 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 июня 2023 г.

Принята к публикации:

20 июня 2023 г.

Опубликована:

30 июня 2023 г.

Ключевые слова:

закладка выработанного пространства, твердеющая закладочная смесь, хвосты флотации, прочность закладки, подвижность смеси, компоненты закладочной смеси.

Один состав с повышенной прочностью в 5,13 МПа предназначен для возведения защитного слоя (кровли и почвы закладочного массива) подземных выработок, а второй состав – для возведения основного искусственного массива с прочностью в 3,62 МПа.

Для цитирования: Кантемиров В.Д., Титов Р.С., Яковлев А.М. Реализация методик по обоснованию рациональных составов твердеющей закладки подземных выработок // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. № 3 (157). С. 100-112. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-3-100-112, EDN: EXZNAI

Введение. Геотехнология с закладкой выработанного пространства является одной из основных систем разработки месторождений полезных ископаемых подземным способом. Закладка подземных выработок заключается в комплексе технологических процессов по их заполнению закладочным материалом, формирующим «искусственный» массив, способный воспринимать нагрузки от горного давления, для предотвращения обрушения и повышения устойчивости обрабатываемых участков месторождения [1, 4, 15].

Лаборатория управления качеством минерального сырья (УКР) ИГД УрО РАН выполнила исследования по адаптации методик по разработке рецептур твердеющей закладки подземного выработанного пространства к условиям обработки Ярегского нефтетитанового месторождения в Республике Коми (АО «Лукойл»).

Ярегское нефтетитановое месторождение является одним из наиболее богатых месторождений титана в России. В нем сосредоточено 40% промышленных категорий от суммарных балансовых запасов российского титана. Продуктивный пласт уникального сложноструктурного Ярегского месторождения представлен тремя основными слоями: верхний слой – нефтенасыщенные пески, далее слой пустой породы, нижний слой представлен титановой рудой, разделенной плоскостью условного водонефтяного контакта на две части – водоносный сорт руды (с низким содержанием нефти) и нефтетитановый сорт руды (с содержанием нефти более 5%). Уникальность залежей титана состоит в генетической и пространственной сопряженности с залежами тяжелой нефти. Контуры их промышленных запасов частично перекрываются. Залежь пластово-сводового типа сокрыта на глубине 140-200 м и содержится в песчаниках. Главным промышленным титаносодержащим минералом является лейкоксен. Лейкоксовая руда в виде мелко- и крупнозернистого песчаника, пропитанного нефтью, содержит 9,82% диоксида титана и 7,55% нефти.

Разработка месторождения ведется шахтным способом с применением паротепловых методов. При добыче титановой руды выбрана система с нисходящей слоевой выемкой руды и твердеющей закладкой. Эта система позволяет обеспечить высокую полноту извлечения руды и нефти из недр, применить малоотходную технологию добычи с использованием отвальных пород и хвостов обогащения в качестве заполнителя для закладки.

Разработка твердеющей закладки производится с учетом условий ее транспортирования в подземных выработках к месту формирования закладочного массива.

Транспортировка приготовленной закладочной смеси от поверхностного закладочного комплекса до мест закладки (камер) согласно техническому проекту производится трубопроводным транспортом с магистральным трубопроводом закладочного материала диаметром $D_{тр} = 108$ мм и суммарной длиной $L_{т} = 2240$ м. Подача закладочной смеси в камеры осуществляется в самотечном и пневмосамотечном режимах.

Методология. Основными компонентами состава твердеющих закладочных смесей являются инертные минеральные заполнители (песок, отсев, дробленая порода, отходы обогащения) вода и вяжущие материалы (цемент, известь, шлаки, золы), на основе которых изготавливается смесь с определенными заданными свойствами.

Технология твердеющей закладки включает следующие основные процессы: подготовка исходных материалов, приготовление закладочной смеси определенного состава, транспортирование закладочной смеси до места закладки и возведение искусственного массива. Применение систем разработки с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями требует обеспечения рудника большим количеством различного вида комплектующих

материалов: инертных материалов-заполнителей, вяжущих заполнителей, микрозаполнителей, активирующих и пластифицирующих добавок.

Для выявления основных тенденций, существующих при разработке составов закладочных смесей, был выполнен патентный поиск по базе патентов РФ за 5 лет. По результатам патентного поиска выявлено 78 патентов на изобретение «Состав закладочной смеси». Анализ патентов показал, что в большинстве представленных составов (более 58% патентов) в качестве основного вяжущего материала используется цемент марки М400 и редко (менее 2-х % от портландцементных составов) другие виды вяжущего. До 42% от всех рассмотренных патентов составляют безцементные составы, в которых основным вяжущим компонентом является гранулированный доменный шлак. Анализ патентов позволил установить, что для применения в сложных горно-геологических условиях в качестве сухого инертного заполнителя в большинстве составов применяются лежалые отходы переработки руд (хвосты) и отвальная дробленая пустая порода, а в качестве вяжущего компонента – цемент промышленного производства.

В распоряжение лаборатории УКР ИГД УрО РАН поступили образцы пород терриконов и хвостов флотации, образующихся при разработке нефтешахт Ярегского нефтетитанового месторождения - общим весом 280 кг. В состав образцов входили куски следующих пород: аргиллит и диабаз (текущая вскрыша из подземных выработок), туффит и песчаник (с отвалов пустых пород). Кроме того, поступили мелкозернистые хвосты обогащения.

С целью выявления свойств поступивших материалов и их пригодности в качестве инертного заполнителя был проведен комплекс лабораторных химико-минералогических исследований.

Выполнены следующие лабораторные и аналитические исследования:

1) рентгеноструктурный (фазовый) анализ – проводился на двух дифрактометрах (SHIMADZU XRD-6000 и ДРОН-2.0);

2) силикатный анализ – проводился рентгенофлуоресцентным волнодисперсионным спектрометром S4 Pioneer Bruker на предварительно изготовленных стеклах-образцах, полученных методом сплавления анализируемого материала;

3) анализ на содержание тяжелых элементов – производился рентгенофлуоресцентным энергодисперсионным спектрометром INNOV-X α -серии в режиме измерения «SOIL».

Результаты минералогических исследований пород и отходов обогащения показали отсутствие в их составе основных минералов клинкерной группы (алит, белит, алюминаты и алюмоферриты кальция). Силикатным анализом установлено, что содержание в исследуемых образцах основных оксидов (CaO – 1-9%, SiO_2 – 50-70%, Al_2O_3 - до 15%, Fe_2O_3 – 1,5-15,5%), образующих основные типы гидравлических вяжущих материалов, не позволяет их использовать как вяжущие компоненты твердеющей закладочной смеси. Для использования в качестве вяжущего компонента с учетом результатов патентных исследований рекомендуется использовать цемент марки М400.

Также установлено, что в нефтенасыщенных песчаниках присутствует органическое вещество, представленное битумом темно-коричневого цвета с незначительной примесью цементирующего глинистого вещества и гидрослюды. Количество органического вещества составляет 10-15% от объема породы. При конструировании состава закладочной смеси

Таблица 1. Расчетные значения нормативной прочности закладочного массива
Table 1. Calculated values of the normative strength of the filling mass

Глубина отработки H_p , м	Предел прочности на растяжение $\sigma_{пр}$, МПа	Нормативная прочность закладки на сжатие $\sigma_{сж} = \sigma_{пр}/0,16$, МПа
200	0,56	3,51
250	0,70	4,39
300	0,84	5,27
350	0,98	6,14
400	1,12	7,02
450	1,26	7,90
500	1,40	8,78
550	1,54	9,65

рекомендуется исключать породы, имеющие в своем составе органические включения, т.к. это может привести к снижению прочности твердеющей закладки.

Основными характеристиками закладочного массива являются прочность и динамика набора прочности. В зависимости от характера работы элемента искусственного массива прочность определяется при сжатии, растяжении, изгибе и др. Твердеющая закладочная смесь должна обеспечивать нормативную прочность и допустимую усадку искусственного закладочного массива или его элементов в принятые проектом сроки.

Расчетная нормативная прочность закладочного массива для условий Ярегского месторождения в зависимости от заданной глубины разработки и параметров принятой системы разработки установлена в диапазоне от 3,51 до 9,65 МПа (Табл. 1).

Таким образом, расчет состава закладочной смеси выполнен с заданными показателями прочности искусственного массива от 3,5 до 10 МПа.

Состав закладочной смеси на основе цементного вяжущего рассчитывается по методике, принятой для расчета бетонной смеси: определяется цементно-водное (Ц/В) или водоцементное (В/Ц) отношение, расход воды, расход цемента, после чего определяется расход крупного и мелкого заполнителей на 1 м³ смеси.

Расчет предварительного (проектного) состава твердеющей закладочной смеси производится исходя из следующих основных условий (положений методики):

1) закладочная смесь считается абсолютно плотным телом, сумма абсолютных объемов ее компонентов равна 1 м³ плотной смеси,

$$V_{ц} + V_{в} + V_{п} + V_{ш} = 1 \text{ м}^3 \text{ или } \frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{В}{\rho_{в}} + \frac{П}{\rho_{п}} + \frac{Ш}{\rho_{ш}} = 1 \text{ м}^3, \quad (1)$$

где $V_{ц}$, $V_{в}$, $V_{п}$, $V_{ш}$ – абсолютные объемы вяжущего (цемента), воды, мелкого и крупного заполнителей (песка и щебня), м³;

$\rho_{ц}$, $\rho_{в}$, $\rho_{п}$, $\rho_{ш}$ – средняя плотность вяжущего (цемента), воды, мелкого и крупного заполнителей (песка и щебня), кг/м³;

Ц, В, П, Ш – расход вяжущего (цемента), воды, мелкого и крупного заполнителей (песка и щебня), кг/м³;

2) цементно-песчаный раствор в закладочной смеси должен заполнить все пустоты между крупным заполнителем (щебнем в стандартном рыхлом состоянии) с некоторой раздвижкой его зерен, что необходимо для получения удобоукладываемой смеси и требуемой степени связывания зерен заполнителя в единый прочный монолит, поэтому

$$\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{В}{\rho_{в}} + \frac{П}{\rho_{п}} = П_{ш} \alpha \frac{Ш}{\rho_{ш}^n} = 1 \text{ м}^3, \quad (2)$$

где $\rho_{ш}^n$ – средняя насыпная плотность крупного заполнителя (щебня), кг/м³;

$П_{ш}$ – пустотность крупного заполнителя в рыхлом состоянии (щебня) (относительная величина), дол. Ед;

α – коэффициент раздвижки зерен крупного заполнителя (щебня) раствором смеси;

3) прочность закладочной смеси R_c прямо пропорциональна активности применяемого вяжущего (в данном случае марке цемента), качеству исходных материалов и зависит от водоцементного отношения (В/Ц) при стандартном режиме уплотнения в возрасте 28 суток нормального твердения.

Прочность закладочной смеси определяется аналогично расчету прочности бетона:

$$R_c = A_{1(2)} R_b \left(\frac{В}{Ц} \pm 0,5 \right), \quad (3)$$

где R_c – марка смеси, эквивалентна марки бетона R_b , кгс/см² (Мпа);

R_b – активность вяжущего (зависит от марки цемента $R_{ц}$), кгс/см² (Мпа);

$A_{1(2)}$ – коэффициенты, учитывающие качество материалов, используемых в составе смеси, где A_1 – для обычных смесей, $A_2 = 2/3A_1$ – для высокопрочных;

Ц/В – цементно-водное отношение (по массе).

Для обычных смесей в ф. 3 принимается «-» при Ц/В < 2,5 и В/Ц ≥ 0,4, для высокопрочных марок (эквивалент бетона М500 – М800) принимается «+» при Ц/В > 2,5 и В/Ц < 0,4.

В качестве вяжущего компонента в экспериментах использовался портландцемент марки ЦЕМ II А-Ш 32,5 (М400) производства «Евроцемент груп» ЗАО «Невьянский цементник».

Одной из характеристик закладочной смеси является удобоукладываемость или способность смеси в полном объеме заполнять форму и не расслаиваться при хранении и транспортировании.

Расход воды, необходимый для получения заданной удобоукладываемости и подвижности при соответствующей крупности зерен крупного заполнителя, определяется по специальным таблицам или из следующих зависимостей:

$$B = 0,032\Pi_n^2 - 1,97\Pi_n + 189,52 \text{ при } M_{кр} = 10, \quad (4)$$

$$B = 0,027\Pi_n^2 - 1,798\Pi_n + 173,37 \text{ при } M_{кр} = 20, \quad (5)$$

где $M_{кр}$ – наибольший размер зерен крупного заполнителя, мм;

Π_c – подвижность смеси, см.

Закладочная смесь при доставке ее трубопроводным транспортом должна обладать заданной подвижностью с показателем подвижности $\Pi_c \geq 20$ см при расходе воды (B) не менее 245 л/м³ для крупного заполнителя (щебня) с $M_{кр} = 10$ и не менее 240 л/м³ для модуля крупности щебня = 20 ($M_{кр} = 20$, по ГОСТ 7473-2010). Для последующих расчетов принято значение $\Pi_c = 25$ см.

Расчетные значения расхода вяжущего (цемента) устанавливаются на основе регрессионной зависимости (СНиП 5.01.23-83), устанавливающей нормы расхода цемента марки М400 для тяжелой смеси с маркой удобоукладываемости – «смесь подвижная, $\Pi_c \geq 20$ » на заполнителе с наибольшей крупностью $D_{max} = 20$ мм:

$$Ц \geq Ц_n = 0,079R_c^2 + 4,116R_c + 135,93 \quad (6)$$

Установлено, что для получения заданной подвижности проектируемой смеси расчетный минимально допустимый расход вяжущего (цемента) должен составлять не менее 200 – 220 кг/м³ (принято среднее значение – 210 кг/м³).

Расчетная формула для определения количества крупного заполнителя в смеси:

$$V_p = \left[1 - V_{ц} = 1 - \frac{ШЦ}{\rho_{ц}} \right] \rightarrow V_p = \left[\alpha V_{п.ц} = \alpha V_{п.н} \Pi_{ц} = \alpha \frac{ШЦ}{\rho_{ц}^n} \Pi_{ц} \right] \rightarrow 1 - V_{ц} = \alpha \frac{ШЦ}{\rho_{ц}^n} \Pi_{ц},$$

$$ШЦ = \frac{1}{\alpha \Pi_{ц} \frac{1}{\rho_{ц}^n} + \frac{1}{\rho_{ц}}}, \quad (7)$$

где α – коэффициент раздвижки зерен крупного заполнителя (щебня) раствором смеси; коэффициент α определяется дисперсностью мелкого заполнителя (песка), для подвижных смесей в среднем составляет 1,1;

$\Pi_{ц}$ – пустотность крупного заполнителя в рыхлом состоянии (щебня) (относительная величина), дол. Ед;

$\rho_{ц}^n$ – средняя насыпная плотность крупного заполнителя (щебня), кг/м³;

$\rho_{ц}$ – средняя плотность крупного заполнителя (щебня), кг/м³.

Где $V_p = V_{ц} + V_{в} + V_{п}$ – объема растворной части закладочной смеси, м³;

$V_{п}$ – объем крупного заполнителя (щебня), м³;

$$\Pi_{ц} = 1 - \frac{\rho_{ц}^n}{\rho_{ц}}. \quad (8)$$

Объем цементного теста определяется следующим выражением:

$$V_{цт} = B + \frac{Ц}{\rho_{ц}}, \quad (9)$$

где $\rho_{ц}$ – средняя плотность вяжущего (цемента), (для Портландцемент М400 Д20 (ЦЕМ II А-Ш 32,5) $\rho_{ц} = 3100$ кг/м³), кг/л;

$B, Ц$ – соответственно расход воды и вяжущего (цемента) в смеси.

Расход мелкого заполнителя (песка) рассчитывается как остаток от емкости 1 м³ состава смеси за вычетом крупного заполнителя (щебня), воды и вяжущего (цемента) с учетом плотности мелкого заполнителя:

$$\Pi = \left[1 - (V_{ц} + V_{в} + V_{с}) \right] \rho_{п} = \left[1 - \left(\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{B}{\rho_{в}} + \frac{ШЦ}{\rho_{ц}} \right) \right] \rho_{п}, \quad (10)$$

где $\rho_{п}$ – средняя плотность мелкого заполнителей (песка), кг/м³;

$\rho_{ц}$ – средняя плотность вяжущего (цемента), кг/м³;

$\rho_{п}$ – средняя плотность крупного заполнителей (щебня), кг/м³;

$\rho_{в}$ – плотность воды, кг/м³;

$Ц, B, ШЦ$ – расход вяжущего (цемента), воды и крупного заполнителя (щебня), кг/м³.

Расчетная плотность закладочной смеси определяется как сумма всех ее компонентов, кг/м³:

$$\rho_c = Ц + B + ШЦ + \Pi, \quad (11)$$

Расчет потребности материалов в составе закладочной смеси производится с учетом коэффициента выхода смеси:

$$\beta = \frac{1}{\left(\frac{Ц}{\rho_{ц}^H} + \frac{Щ}{\rho_{щ}^H} + \frac{П}{\rho_{п}^H}\right)}, \quad (12)$$

где β – коэффициент выхода, показывает, во сколько раз объем закладочной смеси меньше по сравнению с насыпными объемами составляющих ее состав компонентов (щебня, песка, цемента), дол. ед. или %;

$\rho_{ц}^H, \rho_{щ}^H, \rho_{п}^H$ – средние насыпные плотности соответственно вяжущего (цемента), крупного (щебня) и мелкого (песка) наполнителей, кг/м³. Для свежего вяжущего (цемента) $\rho_{ц}^H = 1150$ кг/м³, для слежавшегося $\rho_{ц}^H = 1550$ кг/м³.

На основе выполненных аналитических исследований разработаны варианты сочетания горных пород месторождения (диабаз, туффит и аргиллит) в составе крупного инертного заполнителя смеси в зависимости от ее заданной прочности (Табл. 2) и соответствующий расчетный расход компонентов на 1 м³ смеси (Табл. 3).

Таблица 2. Содержание горных пород месторождения в составе крупного заполнителя

Table 2. Content of the deposit rocks in the composition of the coarse filler

№ п.п	Прочность смеси R_c , МПа	Содержание породы в крупном заполнителе, %		
		Диабаз	Туффит	Аргиллит
1	3,5	80	10	10
2	4,0	70	20	10
3	5,0	60	25	15
4	6,0	50	30	20
5	7,0	50	25	25
6	8,0	50	20	30
7	9,0	50	15	35
8	10,0	50	10	40

Таблица 3. Расчетный расход компонентов проектируемой закладочной смеси

Table 3. Calculated consumption of components for the designed backfill mix

№ п.п	Проектная прочность смеси R_c , МПа	Расход цемента, воды, щебня и песка на 1 м ³ закладочной смеси, кг						
		Ц	В	Щ				П
				Диабаз	Туффит	Аргиллит	Всего	
1	3,5	210,0	301,8	905,6	113,2	113,2	1132,0	194,2
2	4,0	210,0	290,1	795,9	227,4	113,7	1137,1	208,8
3	5,0	210,0	269,3	690,1	287,6	172,5	1150,2	232,0
4	6,0	210,0	251,3	581,9	349,2	232,8	1163,9	250,5
5	7,0	222,9	250,0	580,8	290,4	290,4	1161,7	247,6
6	8,0	236,9	250,0	579,2	231,7	347,5	1158,3	242,9
7	9,0	250,9	250,0	577,5	173,2	404,2	1154,9	238,3
8	10,0	264,9	250,0	575,8	115,2	460,6	1151,5	233,7

Результат. По результатам расчетов (Табл. 3) в лабораторных условиях изготовлены контрольные образцы закладочной смеси в виде кубов с размером граней – 100×100×100 мм – образцы-кубы. Контрольные образцы-кубы изготавливались в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012. Компоненты смеси отбирались в объеме, необходимом для изготовления контрольного образца-куба установленной формы, приготовление опытных замесов производилось в соответствии с ГОСТ 27006-86.

Для повышения подвижности смеси использовалась поверхностно-активный компонент – гидрофилизующая добавка суперпластификатор типа «Полипласт СП-1» (СП-1) из расчета содержания в размере 1% от массы цемента. Добавление в закладочную смесь СП-1 приводит к образованию гидрофильной пленки (мономолекулярных адсорбционных оболочек) и способствует лучшему смачиванию частиц водой (снижающих внутреннее трение в смеси), что уменьшает их сцепление и повышает (пластичность) – «удобоукладываемость» закладочной смеси.

Для гарантированного обеспечения заданной прочности твердой фазы смеси в ее состав добавлялось полипропиленовое фиброволокно, которое является арматурным компонентом смеси. Оно обеспечивает пространственное армирование затвердевшей закладки и позволяет за счет своей долговечности и длительного срока разложения значительно усилить закладочный массив, повысить его прочностные характеристики при нагрузках и ударах (повышает прочность на сжатие и на изгиб в среднем на 10%) и эластичность конструкции.

Изготовление контрольных образцов-кубов производилось в следующем порядке:

- породы (диабаз, аргиллит и туффит), используемые в качестве крупного заполнителя, доводятся до требуемого гранулометрического состава, фракций 5 - 20 мм, с удалением из полученной фракции отсева зерном менее 2,8 мм; регламентируется использование в составе смеси крупного заполнителя с максимальным размером куска не более 20 мм ($\leq 0,2D$) из условий транспортирования готовой закладочной смеси трубопроводным транспортом (с диаметром трубы $D=108$ мм);

- в соответствии с расчетным расходом компонентов закладочной смеси взвешиваются крупный и мелкий заполнители, вяжущее (цемент) и вода;

- взвешенные сухие массы компонентов смеси смешиваются в сухом состоянии, с добавлением, если это предусмотрено рецептом, добавки – полипропиленовой фибры (установленное количество фибры определяется взвешиванием).

Далее тщательно перемешанная сухая смесь затворяется ранее отмеренным количеством воды, в которое, если это предусмотрено рецептом, вводится необходимое количество добавки суперпластификатора СП-1;

- окончательная смесь перемешивается до однородной консистенции и укладывается в соответствии с техникой укладки по ГОСТ 10180-2012, в формы для образцов размером 100×100×100 мм;

- после наступления 7-ми суточного срока твердения образцы достаются из формы и направляются на испытания прочности.

Все изготовленные контрольные образцы-кубы подвергаются испытаниям для определения их прочностных характеристик в контрольные сроки 7, 14 и 28 суток. Испытания образцов производятся в соответствии с действующими нормативными документами (ГОСТ 5802-86, ГОСТ 18105-2010, ГОСТ 10181-2014, ГОСТ 10180-2012 и ГОСТ 22690-2015), неразрушающим и разрушающим методами контроля.

Неразрушающий механический метод применялся для определения прочности образцов затвердевшей закладочной смеси на сжатие в возрасте твердения 7 и 14 суток косвенным ударно-импульсным методом (ГОСТ 22690-2015). Метод основан на взаимосвязи прочности затвердевшей закладки с энергией удара и ее изменениями в момент соударения бойка с поверхностью закладки, величиной прикладываемого усилия и показателями отскока бойка прибора. Определение косвенных характеристик прочности (К) производилось на боковых гранях испытываемых контрольных образцов-кубов с помощью электронного склерометра Оникс-2.5, предназначенного для контроля прочности, класса и однородности бетонов всех типов.

Окончательная оценка качества экспериментальных составов производится по результатам разрушающего испытания образцов-кубов на 28-е сутки их твердения. Испытания заключаются в измерении минимальных усилий, разрушающих контрольные образцы-кубы при статическом нагружении с постоянной скоростью нарастания нагрузки в $(0,6\pm 0,2)$ МПа/с. Испытания проводились на лабораторном малогабаритном гидравлическом прессе типа ПГМ-1000 МГ4 (производитель СКБ Стройприбор).

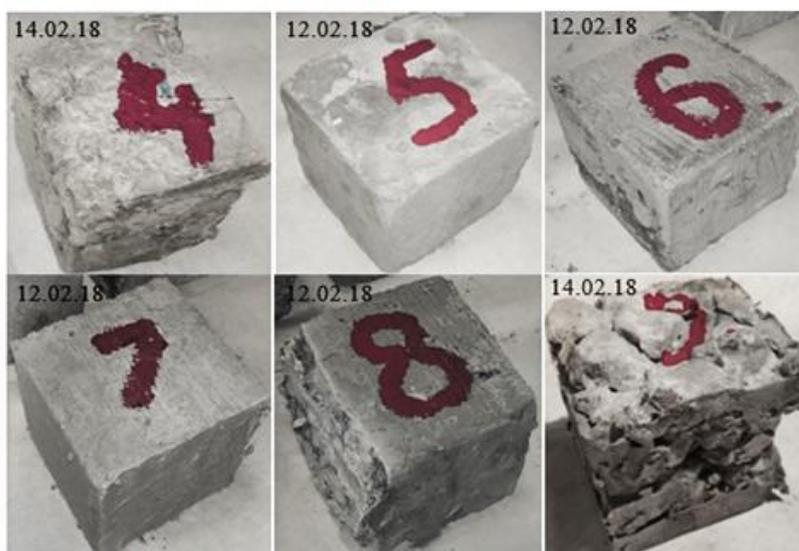
Всего для испытаний было изготовлено 19 образцов-кубов 1 партии с различными вариантами составов компонентов. Составам смесей после испытаний образцов-кубов присвоена марка, эквивалентная бетонам типа М 35. По результатам испытаний образцов-кубов составов серии №1 закладочной смеси нормативную проектную прочность искусственного массива, равную 3,51 МПа после 28 суток твердения, набрали 9 составов, при этом 4 состава набрали повышенную прочность – от 6,0 до 7,5 МПа.

На основе 4 образцов с повышенной прочностью изготовлена 2 партия образцов-кубов с корректировкой состава смеси для оценки возможности сокращения расхода дорогостоящего вяжущего компонента (цемента) с сохранением показателей прочности закладочного массива.

Таблица 4. Рекомендуемые составы твердеющей закладочной смеси
Table 4. Recommended compositions of the hardening backfill mix

Расход компонентов на 1 м ³ , кг						Прочность в возрасте 28 сут, МПа	Плотность в возрасте 28 сут, кг/м ³
Основные компоненты смеси				Добавки			
Ц (цемент)	П (песок)	Щ (щебень)	В (вода)	Пластификатор СП-1	Фибра полипропилен.		
Состав для возведения верхнего защитного слоя							
265	252	1220	264	1% от Ц (2,7 кг)	0,6	5,13	1901
Состав для возведения основного закладочного массива							
212	278	1220	264	1% от Ц (2,1 кг)	0,6	3,62	1819

1-я партия образцов-кубов



2-я партия образцов-кубов



Рис. 1. Отдельные образцы-кубы составов закладочной смеси на 7-е сутки твердения
Fig. 1. Separate cube samples of backfill mix compositions on the seventh day of hardening

Состав «скорректированной» смеси определяется расчетом, аналогичным расчету «исходного» состава, отличия заключаются в принятом расходе вяжущего (цемента), который в соответствии с ГОСТ 27006-86 в одну партию образцов добавляется на 20% больше, а в другую на 20% меньше по сравнению с «исходным» составом.

Всего во 2 партии было изготовлено 12 образцов-кубов с различным составом смеси. На Рис. 1 представлены отдельные образцы-кубы 1 и 2 партии. По результатам испытаний на прочность образцов-кубов партии №2 в возрасте твердения 7, 14 и 28 суток установлена общая для всех образцов положительная динамика роста показаний прочности по прибору ОНИКС-2,5, что свидетельствует о рациональном подборе компонентов в составе смесей, при этом 7 образцов набрали нормативную прочность (более 3,51 МПа).

По результатам лабораторно-аналитических исследований для реализации предложено два состава твердеющей закладочной смеси для текущих горно-геологических условий разработки подземных выработок Ярегского месторождения и на ближайшую перспективу. Один состав с повышенной прочностью в 5,13 МПа предназначен для возведения защитного слоя (кровли и почвы закладочного массива) подземных выработок, а второй состав – для возведения основного искусственного массива с прочностью в 3,62 МПа (Табл. 4).

Расход закладочной смеси при объеме добыче руды в 100 тыс. т/год составит 50,5 тыс. м³/год (с учетом 5% запаса на усадку и 2-3% на потери). Предполагается отдельно изготавливать 2 состава закладки, в т.ч. 19,1 тыс. м³ высокопрочной смеси (37,8% от общего объема) и рядовой смеси в количестве 31,4 тыс. м³ (62,2% от общего объема) (Табл. 5).

Рекомендованные составы прошли экспертизу в «Центре гигиены и эпидемиологии Свердловской области» на соответствие СанПиН 2.1.2.729-99 по содержанию вредных веществ и компонентов. Установлено, что они соответствуют Единым санитарно-эпидемиологическим и гигиеническим требованиям к товарам, подлежащим санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю), и могут быть использованы для возведения закладочных массивов в выработанном пространстве.

Таблица 5. Среднегодовая потребность в компонентах для изготовления закладочной смеси
Table 5. Annual average demand for components for the production of backfill mixture

Компонент смеси	Расход компонентов, т/год		
	Высокопрочная смесь	Рядовая смесь	Всего
Цемент	5 062	6 657	11 718
Песок	4 813	8 729	13 542
Щебень	23 302	38 308	61 610
Вода	5 042	8 290	13 332
СП-1	52	66	118
Фибра	11	19	30
Итого	38 282	62 068	100 351

Выводы. Выполненные аналитические и экспериментальные исследования позволили оценить и адаптировать методику расчета компонентного состава тяжелых бетонов применительно к составу твердеющей закладки.

С учетом анализа патентов и научно-технической литературы разработан и принят к реализации рациональный состав рецептур твердеющей закладочной смеси для формирования «искусственного» закладочного массива в отработанных подземных выработках нефтешахт Ярегского нефтетитанового месторождения. Для формирования надежной кровли и почвы «искусственного» закладочного массива разработана высокопрочная закладочная смесь с показателем прочности в 5,13 МПа в количестве 37,8% от общего объема закладки – 19,1 тыс. м³/год. Для закладки основного выработанного пространства предложен состав рядовой закладочной смеси с показателем прочности в 3,62 МПа в количестве 62,2% от общего объема закладки – 31,4 тыс. м³/год.

Из условий транспортирования готовой закладочной смеси трубопроводным транспортом (с диаметром трубы $D=108$ мм) регламентируется использование в составе смеси крупного заполнителя с максимальным размером куска не более 20 мм ($\leq 0,2D$), для этого необходимо предусмотреть одностадийное дробление и сортировку материала с использованием полустационарного агрегата типа ДРО-755-А (АО «Дробмаш», г. Выкса).

Для обеспечения необходимой подвижности закладочной смеси рекомендуется в ее состав вводить пластифицирующую добавку суперпластификатора СП-1, способствующую повышению удобоукладываемости (подвижности). Для обеспечения необходимой прочности

затвердевшей закладочной смеси рекомендуется вводить в состав армирующий наполнитель в виде полипропиленового фиброволокна.

Предложенные технические решения позволяют решить задачу эффективного формирования «искусственного» закладочного массива выработанного пространства с использованием твердеющей закладки на основе комплексного использования отходов производства для сложных горно-геологических условий подземной разработки Ярегского месторождения и тем самым существенно сократить материальные издержки и поднять экономическую эффективность предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лесовик Г. А. Закладочные смеси на основе техногенных песков // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Белгород : ФГБОУ ВПО БГТУ им. В.Г. Шухова, 2013. 24 с.
2. Крупник Л. А., Соколов Г. В. Закладочные смеси высокой плотности, их свойства и перспективы применения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) М. : Изд-во: МГТУ, 2015. № 11. С. 237–240.
3. Михайлов Ю. В. Подземная разработка рудных месторождений в сложных горно-геологических условиях. М. : Академи, 2008. 320 с.
4. Попов К. Н. [и др.] Новые строительные материалы и материалы из промышленных отходов // Справочное и учеб. пособие для обучения групп резерва высшего звена управления предприятиями строительного комплекса. М. : Логос-Развитие, 2002. 152 с.
5. Баранов А. О. Проектирование технологических схем и процессов подземной добычи руд: справ. пособие. М. : Недра, 1993. 283 с.
6. Маннанов Р. Ш. [и др.] Исследование составов и способов приготовления закладочных смесей на подземных передвижных закладочных установках // Комбинированная геотехнология: теория и практика реализации полного цикла комплексного освоения недр: матери-алы междунар. науч.-техн. конференции. Магнитогорск : ГОУ ВПО «МГТУ», 2011. С. 28–31.
7. Караев О. С., Голик В. И., Магомедов Ш. М. Нормирование прочности закладочных массивов при подработке // Горн. информ.- аналит. бюл. 2002. № 5. С. 32 – 35.
8. Кузьмин Е. В., Хайрутдинов М. М., Зенько Д. К. Основы горного дела. Учебник для вузов. М. : ООО «АртПРИНТ+», 2007. 472 с.
9. Волков Ю. В., Соколов И. В. Подземная разработка медноколчеданных месторождений Урала. Екатеринбург : УрО РАН, 2006. 232 с.
11. Кузьмин Е. В., Хайрутдинов М. М., Зенько Д. К. Основы горного дела. Учебник для вузов. М. : Недра, 2007. 472 с.
12. Монтянова А. Н. Формирование закладочных массивов при разработке алмазных месторождений в криолитозоне. М. : Издательство «Горная книга», 2005. 597 с.
13. Вертячих К. С., Хаукре А. М. Аспекты применения закладки в зарубежной и отечественной практике подземной разработки руд // Горный информационно-аналитический бюллетень № 7. М. : МГТУ, 2002. С. 88–92.
14. Коновалов А. П. [и др.] Закладочные работы на подземных рудниках и перспективы их совершенствования // Горн. журнал. 2001. № 7. С. 3–7.
15. Дьяковский В. Б. [и др.] Совершенствование закладочных работ в новых экономических условиях // Горный журнал. 2000. № 1. С. 26–28.
16. Крупник Л. А. [и др.] Улучшение реологических характеристик твердеющих закладочных смесей и упрочнение закладочных массивов добавкой поверхностно-активных веществ // Вестник КазНТУ. 2011. № 2. С. 34–38.
17. Лаптев Ю. В. [и др.] Комплексное освоение минеральных ресурсов на карьерах Урала // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. №3. С. 95–102.
18. Кантемиров В. Д. Проблемы использования вскрышных пород горнодобывающих предприятий Урала для производства строительных материалов // Проблемы комплексного освоения георесурсов: материалы III Международ. науч. конф. Т. IV Хабаровск, Россия, 16-18 сент. 2009 г. / ДВО РАН, Хабаровский НЦ, ИГД ДВО РАН и др. Хабаровск: ИГД ДВО РАН. 2010. С. 99–103.

© 2023 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Кантемиров Валерий Данилович – кандидат технических наук, заведующий сектором управления качеством минерального сырья Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: ukr@igduran.ru

Титов Роман Сергеевич – научный сотрудник сектора управления качеством минерального сырья Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: ukrigd15@mail.ru

Яковлев Андрей Михайлович – научный сотрудник сектора управления качеством минерального сырья Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: ukrigd15@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Кантемиров Валерий Данилович – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, анализ данных, выводы, написание текста, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, сбор данных, обзор соответствующей литературы.

Титов Роман Сергеевич – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, анализ данных, выводы, написание текста, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, сбор данных, обзор соответствующей литературы.

Яковлев Андрей Михайлович – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, анализ данных, выводы, написание текста, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, сбор данных, обзор соответствующей литературы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

IMPLEMENTATION OF METHODS FOR JUSTIFYING RATIONAL COMPOSITIONS OF HARDENING MIXTURES FOR UNDERGROUND MINING WORKINGS

Valery D. Kantemirov,
Roman S. Titov,
Andrey M. Iakovlev

Institute of Mining UB RAS

*for correspondence: ukr@igduran.ru



Article info

Received:

12 April 2023

Accepted for publication:

15 June 2023

Accepted:

20 June 2023

Published:

30 June 2023

Keywords: filling of mined-out space, hardening mixture, flotation tailings, strength of filling, mobility of the mixture, components of the hardening mixture.

Abstract.

Relevance. The use of hardening mixtures in underground mining is a necessary condition for increasing the efficiency of mining operations, improving working conditions and safety, and preserving the earth's surface. The development of methods for justifying the compositions of hardening mixtures using mining waste is particularly relevant for complex mining and geological conditions.

Objective. This work is devoted to the development of methods for creating hardening mixtures based on mining waste and tailings for underground mining of the Yarega oil-titanium deposit in the Komi Republic.

Methodology. The requirements for hardening mixtures are largely determined by the conditions and technologies of underground mining, as well as the methods of transporting and laying the hardening material in the mined-out space. The properties of hardening mixtures are characterized by physical, mechanical, granulometric, and rheological parameters. The main characteristics of the hardening mass are strength and the dynamics of strength gain. The calculated normative strength of the hardening mass for the Yarega deposit, depending on the depth of mining and the parameters of the adopted mining system, ranges from 3.51 to 9.65 MPa. The composition of the hardening mixture based on cement binder is calculated using the method adopted for calculating concrete mixtures: the cement-water (C/W) or water-cement (W/C) ratio is determined, followed by the water and cement consumption, and then the consumption of coarse and fine fillers per 1 m³ of

the mixture is determined. The article presents the methodology, calculation results, and test results of the component composition of the hardening mixture. Results. The compositions (recipes) of the hardening mixture based on tailings and waste rocks of the Yarega oil-titanium deposit are justified. Based on laboratory-analytical studies, two compositions of the hardening mixture for current mining and geological conditions of the Yarega deposit and for the near future are proposed. One composition with increased strength of 5.13 MPa is intended for the construction of a protective layer (roof and soil of the hardening mass) of underground workings, and the second composition with a strength of 3.62 MPa is intended for the construction of the main artificial mass.

For citation: Kantemirov V.D., Titov R.S., Yakovlev A.M. Implementation of methods for justifying rational compositions of hardening mixtures for underground mining workings. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2023; 2(157):100-112. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2023-3-100-112, EDN: EXZNAI

REFERENCES

1. Lesovik G.A. Zakladochnye smesi na osnove tekhnogennykh peskov. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Belgorod: FGBOU VPO BGTU im. V.G. Shuhova; 2013. 24 s.
2. Krupnik L.A., Sokolov G.V. Zakladochnye smesi vysokoj plotnosti, ih svoystva i perspektivy primeneniya. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. 2015; 11:237–240.
3. Mihajlov Yu.V. Podzemnaya razrabotka rudnykh mestorozhdenij v slozhnykh gorno-geologicheskikh usloviyah. M.: Akademi»; 2008.
4. Popov K. N. [et al.] Novye stroitel'nye materialy i materialy iz promyshlennykh othodov. Spravochnoe i ucheb. posobie dlya obucheniya grupp rezerva vysshego zvena upravleniya predpriyatiyami stroitel'nogo kompleksa. M.: Logos-Razvitie; 2002.
5. Baranov A.O. Proektirovanie tekhnologicheskikh skhem i processov podzemnoj dobychi rud: sprav. posobie. M.: Nedra; 1993.
6. Mannanov R. Sh. [et al.] Issledovanie sostavov i sposobov prigotovleniya zakladochnykh smesey na podzemnykh peredvizhnykh zakladochnykh ustanovkakh. *Kombinirovannaya geotekhnologiya: teoriya i praktika realizatsii polnogo cikla kompleksnogo osvoeniya nedr: materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. konferencii*. Magnitogorsk: GOU VPO «MGU», 2011.
7. Karaev O.S. [et al.] Normirovanie prochnosti zakladochnykh massivov pri podrabotke. *Gorn. inform.- analit. byul.* 2002; 5:32–35.
8. Kuz'min E.V. [et al.] Osnovy gornogo dela. Uchebnik dlya vuzov. M.: OOO «ArtPRINT+»; 2007.
9. Volkov Yu.V., Sokolov I.V. Podzemnaya razrabotka mednokolchedannykh mestorozhdenij Urala. Ekaterinburg: UrO RAN; 2006.
10. Kuz'min E.V. [et al.] Osnovy gornogo dela. Uchebnik dlya vuzov. M.: Nedra; 2007.
11. Montyanova A.N. Formirovanie zakladochnykh massivov pri razrabotke almaznykh mestorozhdenij v kriolitozone. M.: Izdatel'stvo «Gornaya kniga»; 2005.
12. Vertyachih K.S., Hakure A.M. Aspekty primeneniya zakladki v zarubezhnoj i otechestvennoj praktike podzemnoj razrabotki rud. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' № 7*. M.: MGGU; 2002.
13. Kononov A.P. [et al.] Zakladochnye raboty na podzemnykh rudnikakh i perspektivy ih sovershenstvovaniya. *Gorn. zhurnal*. 2001; 7:3–7.
14. D'yakovskij V.B. [et al.] Sovershenstvovanie zakladochnykh rabot v novykh ekonomicheskikh usloviyah. *Gornyj zhurnal*. 2000; 1:26–28.
15. Krupnik L.A. [et al.] Uluchshenie reologicheskikh harakteristik tverdeyushchih zakladochnykh smesey i uprochnenie zakladochnykh massivov dobavkoj poverhnostno-aktivnykh veshchestv. *Vestnik KazNTU*. 2011; 2:34–38.
16. Laptev Yu.V. [et al.] Kompleksnoe osvoenie mineral'nykh resursov na kar'erah Ura-la. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*. 2011; 3:95–102.
17. Kantemirov V.D. Problemy ispol'zovaniya vskryshnykh porod gornodoby-vayushchih predpriyatij Urala dlya proizvodstva stroitel'nykh materialov. *Problemy kompleksnogo osvoeniya georesursov: materialy III Mezhdunarod. nauch. konf. T. IV* Habarovsk, Rossiya, 16-18 sent. 2009 g. DVO RAN, Habarovskij NC, IGD DVO RAN i dr. Habarovsk: IGD DVO RAN; 2010.

© 2023 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Valery D. Kantemirov – PhD (Engineering), Head of the Sector of Mineral Resources Quality Management, Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia. E-mail: ukr@igduran.ru

Roman S. Titov – scientific researcher, Sector of Mineral Resources Quality Management, Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia. E-mail: ukrigd15@mail.ru

Andrey M. Iakovlev – scientific researcher, Sector of Mineral Resources Quality Management, Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia. E-mail: ukrigd15@mail.ru

Contribution of the authors:

Valery D. Kantemirov – setting up a research task, conceptualizing research, analyzing data, drawing conclusions, writing a text, scientific management, review of relevant literature, data collection, review of relevant literature.

Roman S. Titov – setting up a research task, conceptualizing research, analyzing data, drawing conclusions, writing a text, scientific management, review of relevant literature, data collection, review of relevant literature.

Andrey M. Iakovlev – setting up a research task, conceptualizing research, analyzing data, drawing conclusions, writing a text, scientific management, review of relevant literature, data collection, review of relevant literature.

All authors have read and approved the final manuscript.

