

## Разработка рецептур твердеющей закладки для подземных выработок при отработке нефтетитанового месторождения

Кантемиров В. Д.<sup>1\*</sup>, Титов Р. С.<sup>1</sup>, Яковлев А. М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

\*e-mail: ukr@igduran.ru

### Реферат

**Введение.** В статье представлены методологические подходы к проектированию твердеющих смесей для закладки подземного выработанного пространства. Использование твердеющей закладки при подземной разработке полезных ископаемых является необходимым для повышения эффективности горных работ и полноты использования недр, улучшения условий и безопасности труда, сохранения земной поверхности и комплексного использования отходов горного производства.

**Цель работы** – разработка рецептур твердеющих закладочных смесей для условий отработки Ярегского нефтетитанового месторождения в Республике Коми с использованием отходов производства.

**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 расчета бетонной смеси: определяется цементно-водное или водоцементное отношение, расход воды, расход цемента, после чего определяется расход крупного и мелкого заполнителей на 1 м<sup>3</sup> смеси. В статье представлены методика и результаты расчета компонентного состава закладочной смеси.

**Результаты.** Обоснованы составы (рецепты) твердеющей закладочной смеси на основе хвостов обогащения и отвалных 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. Один состав с повышенной прочностью 5,13 МПа предназначен для возведения защитного слоя (кровли и почвы закладочного массива) подземных выработок, второй состав с прочностью 3,62 МПа – для возведения основного искусственного массива.

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

**Ключевые слова:** закладка выработанного пространства; закладочная смесь; хвосты флотации; твердеющие смеси; прочность закладки; подвижность смеси; компоненты закладочной смеси.

**Работа выполнена** по теме «Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем» (FUWE-2022-0005), рег. № 1021062010531-8-1.5.1.

**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. Закладка выработанного пространства является самым надежным способом управления горным давлением и позволяет более чем в 2 раза уменьшить интенсивность его проявления, снизить потери полезных ископаемых в недрах и деформацию поверхности земли на подрабатываемых территориях, способствует комплексному использованию отходов горного производства и повышению безопасности горных работ [1–6]. Наибольшее распространение системы разработки с твердеющей закладкой получили при разработке рудных месторождений, залегающих в сложных горно-геологических и гидрогеологических условиях [7–9].

Лаборатория управления качеством минерального сырья Института горного дела (УКР ИГД УрО РАН) выполнила исследования по разработке рецептур твердеющей закладки подземного выработанного пространства при отработке 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 сплошной слоевой выемкой руды и твердеющей закладкой (рис. 1).

Эта система позволяет обеспечить высокую полноту извлечения руды и нефти из недр, применить малоотходную технологию добычи с использованием хвостов обогащения в качестве заполнителя для закладки [10–18].

Транспортировка приготовленной закладочной смеси от поверхностного закладочного комплекса до мест закладки (камер) согласно техническому проекту производится трубопроводным транспортом с магистральным трубопроводом закладочного материала диаметром  $D_{\text{тр}} = 108$  мм и суммарной длиной  $L_{\text{т}} = 2240$  м. Подача закладочной смеси в камеры осуществляется в самотечном и пневмосамотечном режимах [19, 20]. С поверхности закладочная смесь транспортируется на горизонт закладки по трубопроводам, прокладываемым в вертикальных скважинах, с диаметром трубы (металл)  $D_{\text{тр}} = 219$  мм. Скважины проходятся с поверхности до гор. +203 м. Прием закладочной смеси осуществляется в камере приема закладочных скважин на гор. +199 м и +203 м по мере отработки слоев. Проектом предус-

матриваются две скважины, одна из которых резервная. Для обеспечения подачи проектного расхода закладочной смеси в отработанные выработки при производительности закладочного комплекса  $25 \text{ м}^3/\text{ч}$  скорость ее движения по трубам должна быть не менее  $0,76 \text{ м/с}$ , при этом твердеющую смесь необходимо подавать непрерывно для недопущения расслоения закладки при производстве закладочных работ.

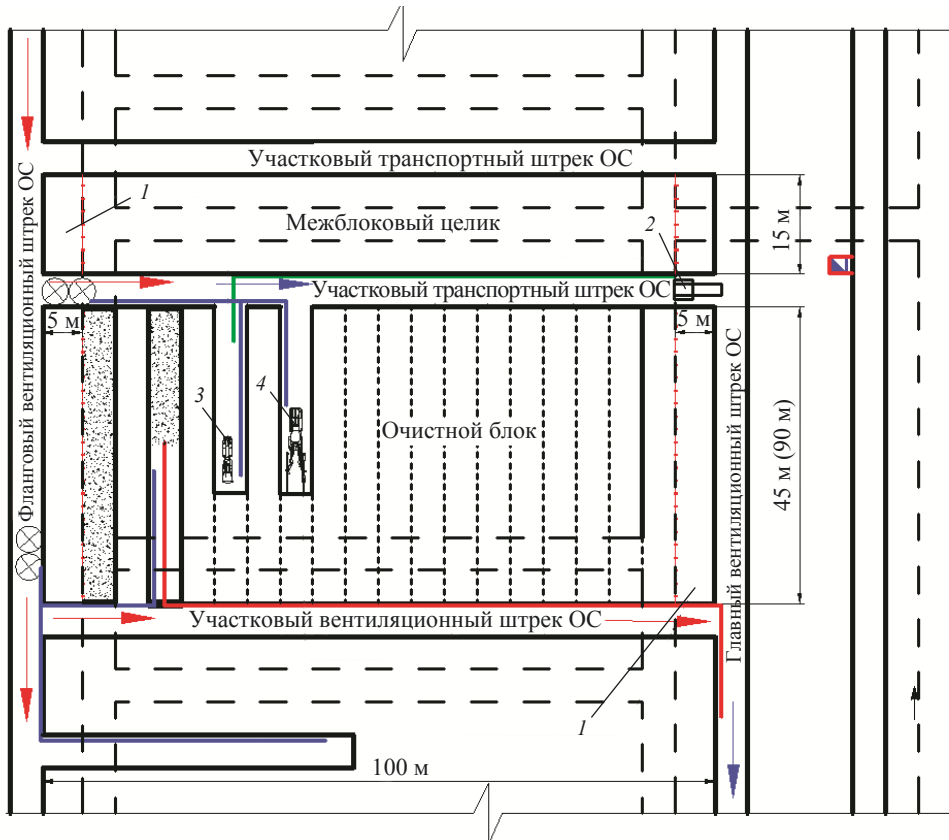


Рисунок 1. Схема отработки основного слоя участка опытно-промышленных работ на Ярегском месторождении: 1 – предохранительный целик; 2 – перегружатель БП-15; 3 – погрузочно-доставочная машина; 4 – буровая установка

Figure 1. The sequence of mining the base coat of the pilot site at the Yarega field: 1 – safety pillar; 2 – transfer hopper BP-15; 3 – load-haul dumper; 4 – drilling rig

**Целью** выполненных исследований являлась разработка рациональных рецептов твердеющей закладки с максимальным использованием местных материалов и минимальным уровнем затрат.

**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. 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 [9, 11, 19, 20].

Технология твердеющей закладки включает следующие основные процессы: подготовка исходных материалов, приготовление закладочной смеси определен-

ного состава, транспортировка 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 комплекующих материалов: инертных материалов-заполнителей, вяжущих заполнителей, микрозаполнителей, активирующих и пластифицирующих добавок. Поэтому при проектировании закладочных комплексов необходимо предусматривать максимальное использование местных материалов и отходов производств после их предварительного анализа, который позволит выбрать для условий рудника материалы, применение которых даст наилучшие технико-экономические показатели и обеспечит получение закладочного массива требуемой прочности [21–24].

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 % от портоландцементных составов) другие виды вяжущего. До 42 % от всех рассмотренных патентов составляют бесцементные 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), а также мелкозернистые хвосты обогащения.

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

Выполнены следующие лабораторные и аналитические исследования:

- рентгеноструктурный (фазовый) анализ – проводился на двух дифрактометрах (SHIMADZU XRD-6000 и ДРОН-2.0);
- силикатный анализ – проводился рентгенофлуоресцентным волнодисперсионным спектрометром S4 Pioneer Bruker на предварительно изготовленных стеклах-образцах, полученных методом сплавления анализируемого материала;
- выявление содержания тяжелых элементов – производилось рентгенофлуоресцентным энергодисперсионным спектрометром INNOV-X  $\alpha$ -серии в режиме измерения SOIL.

Результаты минералогических исследований пород 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<sub>2</sub> – 50–70 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – до 15 %, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 1,5–15,5 %), образующих основные типы гидравлических вяжущих материалов, не позволяет использовать их как вяжущие компоненты твердеющей закладочной смеси. Анализ качественного состава минерального материала

отходов горного производства показал, что его можно использовать только как крупный и мелкий инертный заполнитель в разрабатываемых закладочных смесях. 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 рекомендуется исключать породы, имеющие в своем составе органические включения, так как это может привести к снижению прочности твердеющей закладки.

Свойства твердеющих закладочных смесей характеризуются физико-механическими, гранулометрическими и реологическими параметрами, такими как: объемная масса, пористость и подвижность смеси; водоотделение и водоудерживающая способность смеси; размер частиц и характер их распределения в смеси; количество твердого материала в смеси; вязкость и предельное напряжение сдвига. Реологические свойства твердеющих смесей должны обеспечивать их устойчивое транспортирование по трассе закладочного трубопровода, равномерное, без расслоения, растекание по камере и необходимую глубину проникновения в породу. Гранулометрический состав используемых в смеси материалов определяет их проницаемость, плотность укладки частиц, скорость фильтрации, а также прочностные, деформационные и компрессионные свойства искусственного массива.

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 [25–30].

**Таблица 1. Расчетные значения нормативной прочности закладочного массива**  
**Table 1. Design values of backfill reference strength**

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

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 м<sup>3</sup> смеси.

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

*Закладочная смесь считается абсолютно плотным телом, сумма абсолютных объемов ее компонентов равна 1 м<sup>3</sup> плотной смеси:*

$$V_{\text{ц}} + V_{\text{в}} + V_{\text{п}} + V_{\text{щ}} = 1 \text{ м}^3 \quad \text{или} \quad \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{\text{В}}{\rho_{\text{в}}} + \frac{\text{П}}{\rho_{\text{п}}} + \frac{\text{Щ}}{\rho_{\text{щ}}} = 1 \text{ м}^3,$$

где  $V_{\text{ц}}$ ,  $V_{\text{в}}$ ,  $V_{\text{п}}$ ,  $V_{\text{щ}}$  – абсолютные объемы вяжущего (цемента), воды, мелкого и крупного заполнителей (песка и щебня), м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{ц}}$ ,  $\rho_{\text{в}}$ ,  $\rho_{\text{п}}$ ,  $\rho_{\text{щ}}$  – средняя плотность вяжущего (цемента), воды, мелкого и крупного заполнителей (песка и щебня), кг/м<sup>3</sup>; Ц, В, П, Щ – расход вяжущего (цемента), воды, мелкого и крупного заполнителей (песка и щебня), кг/м<sup>3</sup>.

*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:

$$\frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{\text{В}}{\rho_{\text{в}}} + \frac{\text{П}}{\rho_{\text{п}}} = \text{П}_{\text{щ}} \alpha \frac{\text{Щ}}{\rho_{\text{щ}}^{\text{н}}} = 1 \text{ м}^3,$$

где  $\text{П}_{\text{щ}}$  – пустотность крупного заполнителя в рыхлом состоянии (щебня) (относительная величина), доли ед.;  $\alpha$  – коэффициент раздвижки зерен крупного заполнителя (щебня) раствором смеси;  $\rho_{\text{щ}}^{\text{н}}$  – средняя насыпная плотность крупного заполнителя (щебня), кг/м<sup>3</sup>.

*Прочность закладочной смеси*  $R_{\text{с}}$  прямо пропорциональна активности (марке) применяемого вяжущего (в данном случае цемента)  $R_{\text{ц}}$ , качеству исходных материалов, зависит от водоцементного отношения (В/Ц) при стандартном режиме уплотнения в возрасте 28 суток нормального твердения и определяется формулой основного закона прочности бетона:

$$R_{\text{с}} = A_{1(2)} R_{\text{в}} \left( \frac{\text{Ц}}{\text{В}} \pm 0,5 \right), \quad (1)$$

где  $R_{\text{с}}$  – марка смеси, эквивалентна марке бетона  $R_{\text{б}}$ , кгс/см<sup>2</sup> (МПа);  $A_{1(2)}$  – коэффициенты, учитывающие качество материалов, используемых в составе смеси,  $A_1$  – для обычных смесей,  $A_2 = 2/3 A_1$  – для высокопрочных;  $R_{\text{в}}$  – активность вяжущего (марка цемента  $R_{\text{ц}}$ ), кгс/см<sup>2</sup> (МПа); Ц/В – цементно-водное отношение (по массе).

Для обычных смесей (1) 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 принят портландцемент марки ЦЕМ II А-Ш 32,5 (М400) производства «Евроцемент групп» ЗАО «Невьянский цементник».

Расход воды, необходимый для приготовления 1 м<sup>3</sup> закладочной смеси заданной удобоукладываемости, определяется по значениям наибольшей крупности зерен крупного заполнителя (безразмерного показателя – модуля крупности  $M_{кр}$ ) и требуемой подвижности ( $\Pi_c$ ) или жесткости (Ж) этой смеси,  $V = f(M_{кр}, \Pi$  или Ж). Расчетный расход воды для приготовления закладочной смеси в зависимости от ее подвижности и соответствующей крупности зерен крупного заполнителя определяется по специальным таблицам или из следующих зависимостей, для подвижной смеси:

$$\begin{aligned} V &= 0,032\Pi_c^2 - 1,97\Pi_c + 189,52 \quad \text{при } M_{кр} = 10, \\ V &= 0,027\Pi_c^2 - 1,798\Pi_c + 173,37 \quad \text{при } M_{кр} = 20, \end{aligned}$$

где  $M_{кр}$  – наибольший размер зерен крупного заполнителя, мм;  $\Pi_c$  – подвижность смеси, см.

Закладочная смесь при доставке ее трубопроводным транспортом до места закладки должна обладать заданной подвижностью с показателем подвижности  $\Pi_c \geq 20$  см при  $V \geq 245$  л/м<sup>3</sup> для  $M_{кр} = 10$  мм и  $V \geq 240$  л/м<sup>3</sup> для  $M_{кр} = 20$  мм (по ГОСТ 7473-2010). Для последующих расчетов принято значение  $\Pi_c = 25$  см.

Рассчитанные значения расхода вяжущего должны сравниваться с соответствующими нормами ( $\Pi_n$ ) его расхода, обеспечивающими заданную прочность искусственного массива. Для этого можно воспользоваться регрессионной зависимостью, полученной на основании требований СНиП 5.01.23-83, устанавливающей нормы расхода цемента марки М400 для тяжелой смеси с маркой по удобоукладываемости «смесь подвижная,  $\Pi_c \geq 20$ » на заполнителе с наибольшей крупностью  $D_{max} = 20$  мм:

$$\Pi \geq \Pi_n = 0,079R_c^2 + 4,116R_c + 135,93. \tag{2}$$

Рассчитанные значения расхода вяжущего, не удовлетворяющие условию (2), корректируются и приводятся к значениям, обеспечивающим заданную прочность искусственного массива.

Для получения заданной подвижности проектируемой смеси расчетный минимально допустимый расход вяжущего (цемента) должен составлять не менее 200–220 кг/м<sup>3</sup> (принято среднее значение – 210 кг/м<sup>3</sup>).

Расчетная формула для определения количества крупного заполнителя в смеси:

$$\begin{aligned} V_p &= \left[ 1 - V_{щ} = 1 - \frac{\Pi}{\rho_{щ}} \right] \rightarrow V_p = \left[ \alpha V_{п.щ} = \alpha V_{п.н} \Pi_{щ} = \alpha \frac{\Pi}{\rho_{щ}^н} \Pi_{щ} \right] \rightarrow 1 - V_{щ} = \alpha \frac{\Pi}{\rho_{щ}^н} \Pi_{щ}; \\ \Pi &= \frac{1}{\alpha \Pi_{щ} \frac{1}{\rho_{щ}^н} + \frac{1}{\rho_{щ}}}, \end{aligned}$$

где  $V_p = V_{щ} + V_v + V_n$  – объем растворной части закладочной смеси, м<sup>3</sup>;  $V_{п.щ}$  – объем пустот в крупном заполнителе, м<sup>3</sup>;  $V_{п.н}$  – объем крупного заполнителя в рыхлом состоянии (щебня), м<sup>3</sup>;  $\alpha$  – коэффициент раздвижки зерен крупного заполнителя (щебня) раствором смеси, коэффициент  $\alpha$  определяется дисперсностью мелкого

заполнителя (песка), для подвижных смесей в среднем составляет 1,1;  $\Pi_{щ}$  – пустотность крупного заполнителя в рыхлом состоянии (щебня) (относительная величина), доли ед.,  $\Pi_{щ} = 1 - \rho_{щ}^н / \rho_{щ}$ .

Объем цементного теста определяется следующим выражением:

$$V_{ц.т} = B + \frac{\Pi}{\rho_{ц}},$$

где  $\rho_{ц}$  – средняя плотность вяжущего (цемента), кг/л, для Портландцемента М400 Д20 (ЦЕМ II А-Ш 32,5)  $\rho_{ц} = 3100$  кг/м<sup>3</sup>.

Расход мелкого заполнителя (песка) рассчитывается как остаток от емкости 1 м<sup>3</sup> состава смеси за вычетом крупного заполнителя (щебня), воды и вяжущего (цемента) с учетом плотности мелкого заполнителя:

$$\Pi = \left[ 1 - (V_{ц} + V_{щ} + V_{в}) \right] \rho_{п} = \left[ 1 - \left( \frac{\Pi}{\rho_{ц}} + \frac{B}{\rho_{в}} + \frac{\Pi}{\rho_{щ}} \right) \right] \rho_{п}.$$

Расчетная плотность закладочной смеси определяется как сумма всех ее компонентов, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_{с} = \Pi + B + \Pi + \Pi.$$

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

$$\beta = \frac{1}{\left( \frac{\Pi}{\rho_{ц}^н} + \frac{\Pi}{\rho_{щ}^н} + \frac{\Pi}{\rho_{п}^н} \right)},$$

где  $\beta$  – коэффициент выхода, показывает, во сколько раз объем закладочной смеси меньше по сравнению с насыпными объемами составляющих ее компонентов (щебня, песка, цемента), доли ед. или %;  $\rho_{ц}^н$ ,  $\rho_{щ}^н$ ,  $\rho_{п}^н$  – средние насыпные плотности вяжущего (цемента), крупного (щебня) и мелкого (песка) наполнителей соответственно, кг/м<sup>3</sup>; для свежего вяжущего (цемента)  $\rho_{ц}^н = 1150$  кг/м<sup>3</sup>, для слежавшегося  $\rho_{ц}^н = 1550$  кг/м<sup>3</sup>.

На основе аналитических исследований разработаны варианты сочетания горных пород месторождения (диабаз, туфит и аргиллит) в составе крупного инертного заполнителя смеси в зависимости от ее заданной прочности (табл. 2) и соответствующий расчетный расход компонентов на 1 м<sup>3</sup> смеси (табл. 3).

**Результат.** По результатам расчетов (табл. 3) в лабораторных условиях изготовлены контрольные образцы закладочной смеси в виде кубов с размером граней – 100 × 100 × 100 мм. 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 использовался поверхностно-активный компонент – гидрофилизирующая 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 (что снижает внутреннее трение в смеси), это уменьшает их сцепление и повышает пластичность – удобоукладываемость закладочной смеси.

**Таблица 2. Содержание горных пород месторождения в составе крупного заполнителя**

**Table 2. The content of deposit's rock within the coarse aggregate**

Прочность смеси $R_c$ , МПа	Содержание породы в крупном заполнителе, %		
	Диабаз	Туффит	Аргиллит
3,5	80	10	10
4,0	70	20	10
5,0	60	25	15
6,0	50	30	20
7,0	50	25	25
8,0	50	20	30
9,0	50	15	35
10,0	50	10	40

**Таблица 3. Расчетный расход компонентов проектируемой закладочной смеси**

**Table 3. Estimated consumption of the designed filling mixture components**

Проектная прочность смеси $R_c$ , МПа	Расход компонентов на 1 м <sup>3</sup> закладочной смеси, кг						П
	Ц	В	Щ			Всего	
			Диабаз	Туффит	Аргиллит		
3,5	210,0	301,8	905,6	113,2	113,2	1132,0	194,2
4,0	210,0	290,1	795,9	227,4	113,7	1137,1	208,8
5,0	210,0	269,3	690,1	287,6	172,5	1150,2	232,0
6,0	210,0	251,3	581,9	349,2	232,8	1163,9	250,5
7,0	222,9	250,0	580,8	290,4	290,4	1161,7	247,6
8,0	236,9	250,0	579,2	231,7	347,5	1158,3	242,9
9,0	250,9	250,0	577,5	173,2	404,2	1154,9	238,3
10,0	264,9	250,0	575,8	115,2	460,6	1151,5	233,7

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 ( $\leq 0,2D_{\text{тр}}$ ) из условий транспортирования готовой закладочной смеси трубопроводным транспортом (с диаметром трубы  $D_{\text{тр}} = 108$  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);

– 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  $100 \times 100 \times 100$  мм;

– после 7 суток твердения образцы достаются из формы и направляются на испытания прочности.

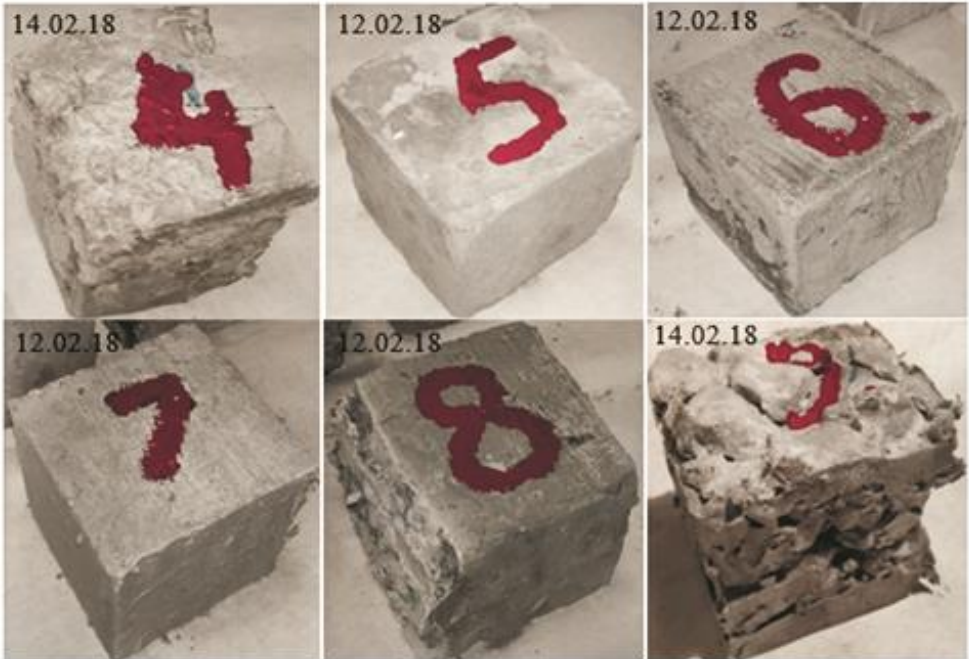
Все изготовленные контрольные образцы-кубы подвергаются испытаниям для определения их прочностных характеристик в контрольные сроки 7, 14 и 28 суток. Испытания образцов производятся в соответствии с действующими нормативными документами (ГОСТ 5802-86, ГОСТ 18105-2010, ГОСТ 10181-2014, ГОСТ 10180-2012 и ГОСТ 22690-2015) неразрушающим и разрушающим методами контроля. Неразрушающий механический метод применяется 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) производится 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 партии № 1 с различными вариантами составов компонентов. Составам смесей после испытаний образцов-кубов присвоена марка, эквивалентная бетонам типа М 35. По результатам испытаний образцов-кубов 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 партия № 2 образцов-кубов с корректировкой состава смеси для оценки возможности сокращения расхода дорогостоящего вяжущего компонента (цемента) с сохранением показателей прочности закладочного массива. Также производилась корректировка зернового состава крупного заполнителя для обеспечения требуемых условий транспортирования смеси трубопроводным транспортом при закладке подземного выработанного пространства. Корректировка выполнялась с учетом расчетных

*a*



*б*



Рисунок 2. Отдельные образцы-кубы составов закладочной смеси на 7-е сутки твердения: *a* – партия № 1; *б* – партия № 2

Figure 2. Single samples-cubes of backfill mixture formulae on the 7th day of hardening: *a* – batch no. 1; *б* – batch no. 2

зависимостей между содержанием соответствующих компонентов в составе смеси. 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 добавляют на 20 % больше, а в другую на 20 % меньше по сравнению с «исходным» составом. Корректировка составов производится в два этапа: I – корректировка состава смеси по удобоукладываемости и II – корректировка состава смеси по прочности, всего в партии № 2 было изготовлено 12 образцов-кубов с различным составом смеси. На рис. 2 представлены отдельные образцы-кубы партий № 1 и 2. 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).

**Таблица 4. Рекомендуемые составы твердеющей закладочной смеси**  
**Table 4. Recommended formulae of the hardening backfill mixture**

Расход компонентов на 1 м <sup>3</sup> , кг						Прочность, МПа*	Плотность, кг/м <sup>3</sup> *
Основные компоненты смеси				Добавки			
Ц	П	Щ	В	Пластификатор СП-1	Фибра-полипропилен		
<i>Верхний защитный слой</i>							
265	252	1220	264	1 % от Ц (2,7 кг)	0,6	5,13	1901
<i>Основной закладочный массив</i>							
212	278	1220	264	1 % от Ц (2,1 кг)	0,6	3,62	1819

\* Для возраста 28 суток.

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 5,13 МПа предназначен для возведения верхнего защитного слоя (кровли и почвы закладочного массива) подземных выработок, второй состав – для возведения основного закладочного массива с прочностью 3,62 МПа (табл. 4).

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.

Расход закладочной смеси при объеме добычи руды в 100 тыс. т/г составит 50,5 тыс. м<sup>3</sup>/г (с учетом 5 % запаса на усадку и 2–3 % на потери). Предполагается отдельно изготавливать два состава закладки, в том числе 19,1 тыс. м<sup>3</sup> высокопрочной смеси (37,8 % от общего объема) и 31,4 тыс. м<sup>3</sup> рядовой смеси (62,2 % от общего объема) (табл. 5).

**Выводы.** В результате выполненных исследований разработан и принят к реализации рациональный состав твердеющей закладочной смеси для формирования

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

Компонент смеси	Расход компонентов, т/г		
	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

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 5,13 МПа в количестве 37,8 % от общего объема закладки – 19,1 тыс. м<sup>3</sup>/г. Для закладки основного выработанного пространства предложен состав рядовой закладочной смеси с показателем прочности 3,62 МПа в количестве 62,2 % от общего объема закладки – 31,4 тыс. м<sup>3</sup>/год.

Для изготовления принятых составов закладочных смесей в качестве крупного инертного заполнителя рекомендуется использовать щебень из скальных вскрышных горных пород (диабаз) (ГОСТ 8267-93) фракцией 10–20 мм, в качестве мелкого заполнителя – песок хвостов обогащения фракцией 0–2,5 мм (ГОСТ 8736-93).

При отсутствии необходимого объема скальной горной массы допускается в качестве крупного инертного заполнителя использовать менее прочные вскрышные породы (туффит и аргиллит), но не более 50 % от общего объема крупного заполнителя в составе смеси.

Из условий транспортирования готовой закладочной смеси трубопроводным транспортом (с диаметром трубы  $D_{тр} = 108$  мм) регламентируется использование в составе смеси крупного заполнителя с максимальным размером куска не более 20 мм ( $\leq 0,2D_{тр}$ ), 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 вводить в ее состав пластифицирующую добавку суперпластификатора СП-1, способствующую повышению удобоукладываемости (подвижности). Расход добавки, вводимой в состав закладочной смеси, установлен в количестве 1 % от объема вяжущего материала (цемента), расходуемого на 1 м<sup>3</sup> смеси данного состава (0,01Ц).

Для обеспечения необходимой прочности затвердевшей закладочной смеси рекомендуется в состав вводить армирующий заполнитель в виде полипропиленового фиброволокна. Расход фиброволокна составляет 0,6 кг на 1 м<sup>3</sup> сухой смеси.

Годовой расход компонентов составит: до 75 тыс. т инертного заполнителя (породы вскрыши и отходы обогащения), 11,7 тыс. т цемента марки М400, до 13,3 тыс. т воды, 177 т суперпластификатора СП-1 и 30,3 т фиброволокна.

Предложенные технические решения позволяют для сложных горно-геологических условий подземной разработки Ярегского месторождения решить задачу эффективного формирования искусственного закладочного массива выработано-

го пространства с использованием твердеющей закладки на основе комплексного использования отходов производства и тем самым существенно сократить материальные издержки и поднять экономическую эффективность предприятия [25–28].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вяткин А. П., Горбачев В. Г., Рубцов В. А. Твердеющая закладка на рудниках. М.: Недра, 1983. 168 с.
2. Лесовик Р. В., Агеева М. С., Богусевич Г. Г., Сопин Д. М. Разработка составов закладочных смесей // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. № 12. С. 31–34.
3. Ковальский Е. Р., Громцев К. В. Разработка технологии закладки выработанного пространства при выемке // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 202–209.
4. Васильева М. А., Волчихина А. А., Морозов М. Д. Оборудование и технологии для проведения работ по дозакладке выработанного пространства // ГИАБ. 2021. № 6. С. 133–144.
5. Волков Ю. В., Соколов И. В. Подземная разработка медноколчеданных месторождений Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 232 с.
6. Анушенков А. Н. Производство закладочных работ. На примере Таштагольского подземного рудника. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2016. 136 с.
7. Михайлов Ю. В. Подземная разработка рудных месторождений в сложных горно-геологических условиях. М.: Академия, 2008. 320 с.
8. Кузьмин Е. В., Хайрутдинов М. М., Зенько Д. К. Основы горного дела. М.: Недра, 2007. 472 с.
9. Байконуров О. А. Подземная разработка месторождений с твердеющей закладкой. М.: Недра, 1981. 384 с.
10. Бронников Д. М. Закладочные работы в шахтах / под ред. Д. М. Бронникова, М. Н. Цыгалова. М.: Недра, 1989. 400 с.
11. Volkov E. P., Anushenkov A. N. Developing the technology of mine stowing with processing tailings based hardening blends // News of the Higher Institutions. Mining Journal. 2019. No. 7. P. 5–13. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-7-5-13
12. Лесовик Г. А. Закладочные смеси на основе техногенных песков: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2013. 24 с.
13. Хайрутдинов М. М., Конгар-Сюрюн Ч. Б., Тюляева Ю. С., Хайрутдинов А. М. Бесцементные закладочные смеси на основе водорастворимых техногенных отходов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 11. С. 30–36.
14. Kongar-Syuryun C., Tyulyaeva Y., Khairutdinov A. M., Kowalik T. Industrial waste in concrete mixtures for construction of underground structures and minerals extraction // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Hanoi. 2020. Vol. 869. Art. 032004. DOI: 10.1088/1757-899X/869/3/032004
15. Ivannikov A. L., Kongar-Syuryun C., Rybak J., Tyulyaeva Y. The reuse of mining and construction waste for backfill as one of the sustainable activities // World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMES 2019). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Prague. 2019. Vol. 362. Art. 012130. DOI: 10.1088/1755-1315/362/1/012130
16. Khairutdinov A. M., Kongar-Syuryun C., Kowalik T., Faradzov V. Improvement of the backfilling characteristics by activation of halite waste for non-waste geotechnology // 12th International Scientific Conference of Civil and Environmental Engineering for PhD. Students and Young Scientists. 15–16 October 2020. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – High Tatras, Slovakia. 2020. Vol. 867. Art. 012018. DOI 10.1088/1757-899X/867/1/012018
17. Rybak J., Gorbatyuk S. M., Bujanovna-Syuryun K. Ch., Khairutdinov A. M., Tyulyaeva Yu. S., Makarov P. S. Utilization of mineral waste: a method for expanding the mineral resource base of a mining and smelting company // Metallurgist. 2021. Vol. 64. Issue 9-10. P. 851–861. DOI: 10.1007/s11015-021-01065-5
18. Sheshpari M. A. Review of underground mine backfilling methods with emphasis on cemented paste backfill // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2015. Vol. 20. No. 13. P. 5183–5208.
19. Крупник Л. А., Агапова Н. П., Абдикалькова Р. С. Улучшение реологических характеристик твердеющих закладочных смесей и упрочнение закладочных массивов добавкой поверхностно-активных веществ // Вестник КазННТУ. 2011. № 2. С. 10–14.
20. Крупник Л. А., Соколов Г. В. Закладочные смеси высокой плотности, их свойства и перспективы применения // ГИАБ. 2015. № 11. С. 237–240.
21. Belem T., Benzazaoua M. Design and application of underground mine paste backfill technology // Geotechnical and Geological Engineering. 2008. Vol. 26. P. 147–174.
22. Караев О. С., Голик В. И., Магомедов Ш. М. Нормирование прочности закладочных массивов при подработке // ГИАБ. 2002. № 5. С. 32–35.
23. Зубков А. В. Геомеханика и геотехнология. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 335 с.
24. Ковальский Е. Р., Громцев К. В., Петров Д. Н. Моделирование процесса деформирования междукammerных целиков в условиях закладки очистных камер // ГИАБ. 2020. № 9. С. 87–101. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-87-101

25. Pierce M. E. Stability analysis of paste backfill exposures at Brunswick Mine // *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics*. CRC Press, 2020. P. 147–156.

26. Salman S., Jeong G. J. Assessment of molybdenum mine tailings as filler in cement mortar // *Journal of Building Engineering*. 2020. Vol. 31. Art. 101322. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101322

27. Коновалов А. П., Аршавский В. В., Хуцишвили В. И., Сорокина Л. Н., Анфиногеев С. В. Закладочные работы на подземных рудниках и перспективы их совершенствования // *Горный журнал*. 2001. № 7. С. 3–7.

28. Wickland B. E., Wilson G. W., Wijewickreme D., Klein B. Design and evaluation of mixtures of mine waste rock and tailings // *Canadian Geotechnical Journal*. 2006. Vol. 43. №. 9. P. 928–945. DOI: 10.1139/t06-058

29. Лаптев Ю. В., Кантемиров В. Д., Тимохин А. В. Комплексное освоение минеральных ресурсов на карьерах Урала // *ГИАБ*. 2011. № 3. С. 95–102.

30. Кантемиров В. Д. Проблемы использования вскрышных пород горнодобывающих предприятий Урала для производства строительных материалов // *Проблемы комплексного освоения георесурсов: матер. III Междунар. науч. конф. Хабаровск, Россия, 16–18 сентября 2009 г.* 2010. Т. IV. С. 99–103.

Поступила в редакцию 19 декабря 2022 года

### Сведения об авторах:

**Кантемиров Валерий Данилович** – кандидат технических наук, заведующий лабораторией управления качеством минерального сырья Института горного дела УрО РАН. E-mail: ukr@igduran.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6486-2740>

**Титов Роман Сергеевич** – старший научный сотрудник лаборатории управления качеством минерального сырья Института горного дела УрО РАН. E-mail: ukr07@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3569-2743>

**Яковлев Андрей Михайлович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории управления качеством минерального сырья Института горного дела УрО РАН. E-mail: quality@igduran.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8285-6387>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-38-54

## Developing formulations for hardening backfill for underground workings when developing an oil and titanium field

Valerii D. Kantemirov<sup>1</sup>, Roman S. Titov<sup>1</sup>, Andrei M. Iakovlev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

### Abstract

**Introduction.** The article presents methodological approaches to the design of hardening mixtures for underground mined-out space backfilling. It is necessary to use hardening backfill in underground mining to improve the efficiency of mining, completeness of subsoil use, working conditions and safety, as well as to preserve the earth's surface and to use mining waste in a comprehensive way.

**Research objective** is to develop formulations of hardening backfill mixtures using production waste for the conditions of the Yarega oil and titanium field, the Komi Republic.

**Methods of research.** The requirements for backfill mixtures are based on underground mining conditions and accepted technologies, as well as on the methods of transporting and laying the backfill material of the hardening mixture into the mined-out space. The properties of hardening backfill mixtures are characterized by physical, mechanical, granulometric and rheological parameters. The main characteristics of the backfill mass are the strength and dynamics of strength gain. The design reference strength of the backfill mass for the conditions of the Yarega field, depending on the predetermined depth of mining and the mining system parameters, is set within the range from 3.51 to 9.65 MPa. The backfill mixture composition based on the cementitious binder is calculated according to concrete mixture calculation procedure: the cement-water or water-cement ratio, water consumption, and cement consumption are determined, after that the of coarse and fine aggregates consumption per 1 m<sup>3</sup> of the mixture is determined. The article presents the procedure and results of the backfill mixture component compositional analysis.

**Results.** The hardening backfill mixture formulae based on the tailings and debris from the Yarega oil and titanium field are substantiated. Based on the laboratory and analytical study results,

the hardening backfill mixture formula is proposed for implementation both for the current mining and geological conditions of the Yarega deposit and for the short-term. The first formula with the increased strength of 5.13 MPa is intended for underground working protective coat construction (roof and backfill soil), the second formula is for the main artificial backfill mass with the strength of 3.62 MPa.

**Conclusions.** For difficult mining and geological conditions of the Yarega field underground development, the proposed technical solutions make it possible to solve the problem of building an effective artificial mined-out space backfill mass using hardening backfill based on the integrated use of production waste, which makes it possible to significantly reduce material costs and increase the economic efficiency of the enterprise.

**Keywords:** mined-out space backfill; backfill mixture; flotation tailings; hardening mixtures; backfill strength; mixture consistency; backfill components.

**The research was carried out** within the frame work of R & D theme is “Methodological foundations of the strategy for the solid mineral deposits integrated development in the dynamics of mining systems development” (FUWE-2022-0005), reg. no. 1021062010531-8-1.5.1.

#### REFERENCES

1. Viatkin A. P., Gorbachev V. G., Rubtsov V. A. *Hardening filling mixtures in mines*. Moscow: Nedra Publishing; 1983. (In Russ.)
2. Lesovik R. V., Ageeva M. S., Bogusevich G. G., Sopin D. M. The development of compositions of backfilling mixtures. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova = Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2016; 12: 31–34. (In Russ.)
3. Kovalskii E. R., Gromtsev K. V. Development of the technology of stowing the developed space during mining. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2022; 254: 202–209. (In Russ.)
4. Vasilieva M. A., Volchikhina A. A., Morozov M. D. Re-backfill technology and equipment. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2021; 6: 133–144. (In Russ.)
5. Volkov Iu. V., Sokolov I. V. *Underground mining of copper-pyrite deposits of the Urals*. Ekaterinburg: UB RAS Publishing; 2006. (In Russ.)
6. Anushenkov A. N. *Backfilling workflow. By the example of Tashtagolsky underground mine*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University Publishing; 2016. (In Russ.)
7. Mikhailov Iu. V. *Underground mining of ore deposits in complex mining-geological conditions*. Moscow: Akademiia Publishing; 2008. (In Russ.)
8. Kuzmin E. V., Khairutdinov M. M., Zenko D. K. *The fundamentals of mining*. Moscow: Nedra Publishing; 2007. (In Russ.)
9. Baikonurov O. A. *Underground mining with hardening backfill*. Moscow: Nedra Publishing; 1981. (In Russ.)
10. Bronnikov D. M. *Backfilling work in mines*. Moscow: Nedra Publishing; 1989. (In Russ.)
11. Volkov E. P., Anushenkov A. N. Developing the technology of mine stowing with processing tailings based hardening blends. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 7: 5–13. Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2019-7-5-13
12. Lesovik G. A. *Filling materials based on manufactured sand: PhD in Eng. abstr. of diss.* Belgorod; 2013. (In Russ.)
13. Khairutdinov M. M., Kongar-Siuriun Ch. B., Tiuliaeva Iu. S., Khairutdinov A. M. Cementless backfill mixtures based on water-soluble manmade waste. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020; 331(11): 30–36. (In Russ.)
14. Kongar-Syuryun C., Tyulyaeva Y., Khairutdinov A. M., Kowalik T. Industrial waste in concrete mixtures for construction of underground structures and minerals extraction. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Hanoi. 2020; 869: 032004. Available from: doi: 10.1088/1757-899X/869/3/032004
15. Ivannikov A. L., Kongar-Syuryun C., Rybak J., Tyulyaeva Y. The reuse of mining and construction waste for backfill as one of the sustainable activities. In: *World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS 2019). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Prague. 2019; 362: 012130. Available from: doi: 10.1088/1755-1315/362/1/012130
16. Khayrutdinov A. M., Kongar-Syuryun C., Kowalik T., Faradzhev V. Improvement of the backfilling characteristics by activation of halite waste for non-waste geotechnology. In: *12th International Scientific Conference of Civil and Environmental Engineering for PhD. Students and Young Scientists. 15–16 October 2020. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – High Tatras, Slovakia*. 2020; 867: 012018. Available from: doi: 10.1088/1757-899X/867/1/012018



17. Rybak J., Gorbatyuk S. M., Bujanovna-Syuryun K. Ch., Khairutdinov A. M., Tyulyaeva Yu. S., Makarov P. S. Utilization of mineral waste: a method for expanding the mineral resource base of a mining and smelting company. *Metallurgist*. 2021; 64(9-10): 851–861. Available from: doi: 10.1007/s11015-021-01065-5
18. Sheshpari M. A. Review of underground mine backfilling methods with emphasis on cemented paste backfill. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2015; 20(13): 5183–5208.
19. Krupnik L. A., Agapova N. P., Abdikalykova R. S. Improving rheological characteristics of filling mixtures and hardening the filling masses by adding surface-active substances. *Vestnik KazNITU = Bulletin of KazNRTU*. 2011; 2: 10–14. (In Russ.)
20. Krupnik L. A., Sokolov G. V. Filling mixtures of high density, their properties and prospects of use. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 11: 237–240. (In Russ.)
21. Belem T., Benzaazoua M. Design and application of underground mine paste backfill technology. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2008; 26: 147–174.
22. Karaev O. S., Golik V. I., Magomedov Sh. M. Rate-making for filling mass density when undermining. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2002; 5: 32–35. (In Russ.)
23. Zubkov A. V. *Geomechanics and geotechnology*. Ekaterinburg: UB RAS Publishing; 2001. (In Russ.)
24. Kovalskii E. R., Gromtsev K. V., Petrov D. N. Modeling deformation of rib pillars during backfill. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2020; 9: 87–101. (In Russ.) Available from: doi: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-87-101
25. Pierce M. E. Stability analysis of paste backfill exposures at Brunswick Mine. *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics*. CRC Press: 2020. P. 147–156.
26. Salman S., Jeong G. J. Assessment of molybdenum mine tailings as filler in cement mortar. *Journal of Building Engineering*. 2020; 31: 101322. Available from: doi: 10.1016/j.jobe.2020.101322
27. Kononov A. P., Arshavskii V. V., Khutsishvili V. I., Sorokina L. N., Anfinozhev S. V. Backfilling operations in underground mines and the prospects of their improvement. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2001; 7: 3–7. (In Russ.)
28. Wickland B. E., Wilson G. W., Wijewickreme D., Klein B. Design and evaluation of mixtures of mine waste rock and tailings. *Canadian Geotechnical Journal*. 2006; 43(9): 928–945. Available from: doi: 10.1139/t06-058
29. Laptev Iu. V., Kantemirov V. D., Timokhin A. V. Integrated development of mineral resources at Ural open pits. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2011; 3: 95–102. (In Russ.)
30. Kantemirov V. D. The problems of using overburden from Ural mining enterprises to produce construction materials. In: *The problems of integrated development of mineral resources: Proceedings of the 3rd Internat. sci. and tech. conf.* Khabarovsk, Russia, 16–18 September 2009. 2010. Vol. 4. P. 99–103. (In Russ.)

Received 19 December 2022

#### Information about the authors:

**Valerii D. Kantemirov** – PhD (Engineering), Head of the Laboratory of mineral raw materials quality control, Institute of Mining UB RAS. E-mail: ukr@igduran.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6486-2740>

**Roman S. Titov** – senior researcher, Laboratory of mineral raw materials quality control, Institute of Mining UB RAS. E-mail: ukr07@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3569-2743>

**Andrei M. Iakovlev** – PhD (Engineering), senior researcher, Laboratory of mineral raw materials quality control, Institute of Mining UB RAS. E-mail: [quality@igduran.ru](mailto:quality@igduran.ru); <https://orcid.org/0000-0001-8285-6387>

**Для цитирования:** Кантемиров В. Д., Титов Р. С., Яковлев А. М. Разработка рецептур твердеющей закладки для подземных выработок при отработке нефтетитанового месторождения // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 4. С. 38–54. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-38-54

**For citation:** Kantemirov V. D., Titov R. S., Iakovlev A. M. Developing formulations for hardening backfill for underground workings when developing an oil and titanium field. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 4: 38–54 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-38-54