

УДК 622.274

## ТРУБОПРОВОДНЫЙ ТРАНСПОРТ ЛИТЫХ ТВЕРДЕЮЩИХ ЗАКЛАДОЧНЫХ СМЕСЕЙ С ПОНИЖЕННЫМ ВОДОСОДЕРЖАНИЕМ

### PIPELINE TRANSPORT OF THE CAST HARDENING STOWAGE MIXES WITH THE LOWERED WATER CONTENT

Стовманенко Андрей Юрьевич ,  
ст. преподаватель, e-mail: s600122@yandex.ru

**Stovmanenko Andrey Yu.**,  
senior teacher, e-mail: s600122@yandex.ru

Анушенков Александр Николаевич ,  
докт. техн. наук, профессор, e-mail: sfu-prm@ya.ru

**Anushenkov Alexander N.**,  
Dr.Sc. (Engineering), professor, e-mail: sfu-prm@ya.ru

Сибирский федеральный университет, 660025, Россия, Красноярск, пр-т Красноярский рабочий, 95,

Siberian federal university, 660025, Russia, Krasnoyarsk, 95 Krasnoyarsky Rabochoy street,

**Аннотация:** В статье рассмотрены вопросы совершенствования систем трубопроводного транспортирования литых твердеющих закладочных смесей, для закладки отработанных горных выработок в условиях горного производства. Предложено новое направление развития технических средств, предназначенных для обеспечения надежной и бесперебойной доставки закладочных смесей с пониженным водосодержанием, связанное с применением специальных гидродинамических активаторов, устанавливаемых на закладочном трубопроводе. В качестве активирующих устройств предложены и описаны оригинальные запатентованные конструкции активаторов, обеспечивающие высокую эффективность восстановления реологических свойств закладочных смесей, при их транспортировании по подземному закладочному трубопроводу.

**Abstract:** In the article questions of improvement of systems of pipeline transportation of the cast hardening stowage mixes, for a laying of the fulfilled excavations in the conditions of mining are considered. The new direction of development of technical means of the stowage mixes intended for ensuring safe and uninterrupted delivery with the lowered water content connected with use of the special hydrodynamic activators installed on the stowage pipeline is offered. As the activating devices the original patented designs of activators providing high efficiency of restoration of rheological properties of stowage mixes at their transportation on the underground stowage pipeline are offered and described.

**Ключевые слова:** закладочные смеси; закладочные работы; трубопроводный транспорт.

**Keywords:** stowage mixes, stowage works, pipeline transport.

Большинство подземных рудников в России работают на глубине более 500 м. В подобных условиях управление горным давлением, сдвижением подрабатываемого массива становится решающим фактором успешной работы предприятий. Основным средством решения этой проблемы является применение систем разработки с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями [1]. Кроме того, освоение технологий с закладкой позволяет повысить полноту и качество извлечения запасов, утилизировать отходы различных производств, сохранять гидрологический режим и поверхность регионов. Твердеющая закладка позволяет повысить производительность труда рабочих и уменьшить капитальные затраты на вскрытие месторождений.

Термин «закладка» [2] определяет процесс со-

здания искусственного монолитного массива в выработанном пространстве (рис.1) и подразумевает использование разнообразных закладочных смесей: бетонных, цементированных, твердеющих, а также закладочные смеси с хвостами обогащения, шлаками, щебнем и др., содержащие вяжущие вещества, которые под воздействием гидратации и гидролиза вяжущего, кристаллизации, химических реакций превращаются в монолит.

В практике разработки месторождений можно выделить направление, по которому идет развитие технологии приготовления, транспорта и укладки твердеющих смесей, подразумевающее приготовление литых и пластичных закладочных смесей на поверхностных закладочных комплексах с подачей их к месту укладки с помощью са-

мотёчного или самотечно-пневматического трубопроводного транспорта [3]. Необходимую прочность закладочного массива обеспечивают за счет соответствующего расхода вяжущих и водоцементного отношения.

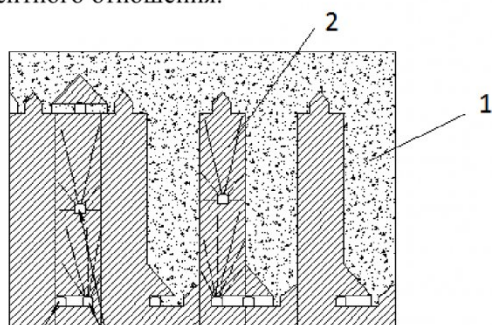


Рис. 1. Система проходки горных выработок с твердеющей закладкой

1-закладочный массив; 2-рудный массив

Fig. 1. System of a driving of excavations with use of the hardening stowage mix

1-stowage massif; 2-ore massif

На закладочных работах используются твердеющие смеси с крупным наполнителем и литые. Смеси с крупным наполнителем обеспечивают высокую прочность создаваемого искусственного массива, но требуют значительного расхода дорогостоящего вяжущего – цемента [4]. Существенно осложняется транспорт таких смесей в подземных условиях, возрастает опасность закупорки, износа и отказов в трубопроводах, поэтому на рудниках предпочтение отдается литым твердеющим смесям (ЛТС). При подаче в камеры ЛТС достигается наибольшая производительность установки, высокая интенсивность закладки камер, удовлетворительное растекание смеси и тщательное заполнение пустот. Составы применяемых твердеющих смесей зависят от наличия местных материалов, требуемой прочности и принятой схемы приготовления и подачи закладочной смеси в выработанное пространство.

Компоненты для приготовления закладочных твердеющих смесей разделяют по их назначению:

а) Вяжущие вещества и активизирующие добавки — представляют собой тонкоизмельченные материалы, способные при затворении водой образовывать тесто, постепенно твердеющее и превращающееся в камневидное тело. Прочность вяжущих веществ колеблется в широких пределах от нескольких единиц до 7 МПа и более в месячном возрасте [5]. Имеются разработки по использованию измельченных отходов горного, металлургического и теплоэнергетического производства в качестве вяжущих компонентов ЛТС [6, 7].

б) Заполнители. Основные требования к заполнителям: предел прочности должен быть не менее чем на 10–15 % выше нормативной прочности закладки, небольшая растворимость в воде, низкий коэффициент увеличения в объеме во

влажной среде, отсутствие вредных примесей и экономичность. Крупность заполнителя зависит от способа возведения и транспортирования закладки и характеризуется модулем крупности.

в) Вода для закладки. Рудничные воды нередко содержат значительное количество растворенных в них кислот или солей, агрессивных к бетону. Для ЛТС применяют воду с показателем кислотности  $\geq 4$ , содержание сульфатов не должно превышать 2,7 г/л в пересчете на ионы  $SO_3$ , а других солей — не более 5 г/л.

г) Пластифицирующие добавки — применяют для повышения текучести смесей, экономии цемента и придания искусственному камню большей прочности (за счет уменьшения водоцементного отношения). Применение пластифицирующих добавок, повышающих транспортабельность закладочных смесей, сопряжено с большими дополнительными затратами.

Основные требования, предъявляемые к закладочным смесям, доставляемым в подземные горные выработки трубопроводным транспортом [8]:

а) удовлетворительная кинетика твердения закладки, обеспечивающая нормативную прочность в установленные сроки;

б) реологические свойства, обеспечивающие удовлетворительную транспортировку смесей по подземным трубопроводам и укладку в выработки;

Приготовленные литые закладочные смеси представляют собой схватывающиеся тонкодисперсные гидросмеси (размер твердых частиц, полученных измельчением  $d_{cp} = 80$  мкм и менее), при объемной концентрации твердого до 68 %, обладающие тиксотропными свойствами с предельным напряжением сдвига и вязкостью. Для описания режима течения таких гидросмесей уравнение Ньютона должно быть заменено уравнением Шведова – Бингама. Реологическую модель большинства ЛТС можно представить уравнением [9]:

$$\tau = -\eta \frac{du}{dr} + \tau_0,$$

где  $\eta$  и  $\tau_0$  — соответственно структурная (пластическая) вязкость и динамическое напряжение сдвига жидкости.

Движение ЛТС с внутренней пространственной структурой начнется лишь тогда, когда напряжение сдвига  $\tau$  превысит какое-то определенное критическое значение  $\tau_0$ , необходимое для разрушения структуры. Структурную сетку можно представить в виде множества цепочек из частиц, связанных общими узловыми частицами (рис. 2). Основным способом разрушения внутренней структуры тиксотропных вязкопластичных смесей (наряду с химическим) является внешнее механическое воздействие на смесь (активация смеси), то есть образование в смеси

существенных гидродинамических сил, превышающих энергию внутренней структурной связи  $W_c$ , вследствие чего происходит разрушение структурной сетки и повышение текучести и однородности состава смеси.



Рис. 2. Схема тиксотропных изменений  
Fig. 2. Scheme of thixotropic changes

После снятия активирующего воздействия, структура тиксотропной смеси восстанавливается с течением времени. Такие смеси сразу после прекращения перемешивания постепенно становятся структурированной системой с осадком. Реологические свойства закладочной смеси должны отвечать требованиям технологической инструкции: растекаемость не менее 10-12 см, предельное напряжение сдвига не более 180 Па, коэффициент расслаивания - не более 1,3 [10].

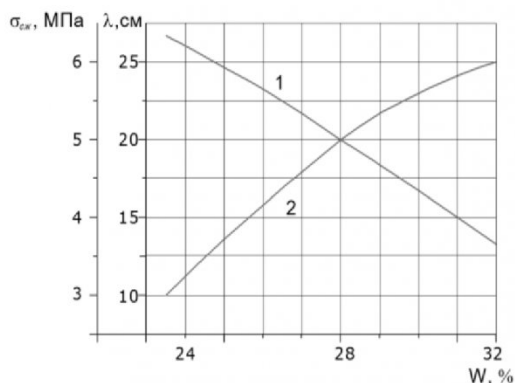


Рис. 3. Влияние водосодержания  $W$  на реологические характеристики закладочных смесей  
1 – изменение прочности закладочного массива  $\sigma_{сж}$ ; 2 – изменение текучести смеси  $\lambda$ .

Fig. 3. Influence of water content  $W$  on rheological characteristics of stowage mixes

1 – change of durability of the stowage massif  $\sigma_{сж}$ ; 2 – change of fluidity of mix  $\lambda$ .

В настоящее время при трубопроводном транспортировании ЛТС их водосодержание достигает 500-550 л/м<sup>3</sup>, что позволяет транспортировать смеси в состоянии близком к ньютоновским жидкостям, но существенно снижает впоследствии прочность закладочного массива [11]. Как показано на рис. 3, прочность создаваемого закладочного массива  $\sigma_{сж}$ , при установленной продолжительности твердения, с понижением водосодержания ЛТС  $W$  существенно увеличивается [10]. Однако при понижении водосодержания  $W$  одновременно ухудшаются реологические свойства ЛТС и, следовательно, надежность работы трубопроводной транспортной системы, что со-

здает существенные трудности с обеспечением бесперебойной доставки закладочного материала в подземное выработанное пространство.

Таким образом, влагосодержание ЛТС одновременно является критерием ее текучести и прочности формируемого массива.

Прочностные и реологические свойства закладочных смесей могут существенно меняться в зависимости от компонентного состава, способа их производства и транспортирования, водосодержания ЛТС и других факторов, что в основном определяет последующую прочность закладочного массива, скорость его твердения и транспортабельность ЛТС. В таких условиях важным направлением исследований становится создание способов и средств управления процессом транспортирования литых закладочных смесей с пониженным водосодержанием, с целью поддержания их реологических и прочностных свойств в необходимых пределах.

Решение уравнения энергетического баланса потока на участке самотека ЛТС сводится обычно к определению предельной длины транспортирования по горизонтальному участку закладочного трубопровода  $L_{г}$ , соответствующей достижению потоком ЛТС критической скорости движения пульпы  $v_{кр}$ ,

$$v_{кр} = 145,842 \left( \frac{\eta}{d} \right)^{0,33004} \left( \frac{g}{\gamma} \right)^{0,66502} \tau_0^{0,33498}$$

где  $d$  – диаметр транспортного трубопровода, м

$g$  – ускорение свободного падения, м<sup>2</sup>/с

$\gamma$  – плотность литой закладочной смеси, т/м<sup>3</sup>.

Таким образом, условием надежного транспортирования ЛТС с пониженным водосодержанием является своевременное разрушение ее тиксотропной структуры, с целью снижения вязкости и предельного напряжения сдвига в смеси.

Для решения проблемы управления реологическими свойствами ЛТС с пониженным водосодержанием, в рамках проводимых исследований, предлагается применять специализированный вид механического оборудования – гидродинамические активаторы. Работа гидродинамических активаторов основана на генерировании механических возмущений в смеси с образованием полей переменных скоростей и давлений, создаваемых энергией внешнего привода. Гидродинамические активаторы, как технологическое оборудование, могут иметь конструкции различных видов.

Например, активатор ЛТС [12, 13] содержит трубчатую вихревую камеру 1 (рис. 4, а), подшипники 2, трубчатую проточную камеру 3, корпус 4, электропривод 5, обмотки статора 6, установленные на корпусе 5 и обмотки ротора 7, установленные на вихревой камере 1, обеспечивающие ее вращательное движение. На внутренней поверхности трубчатой вихревой камеры 1, установлены лопатки 8. Активатор установлен непосредственно

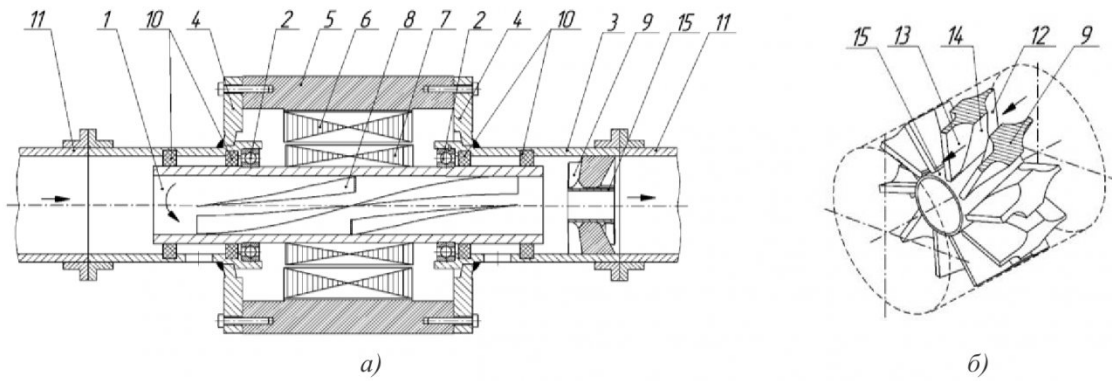


Рис. 4. Активатор закладочной смеси  
Fig. 4. Activator of stowage mix

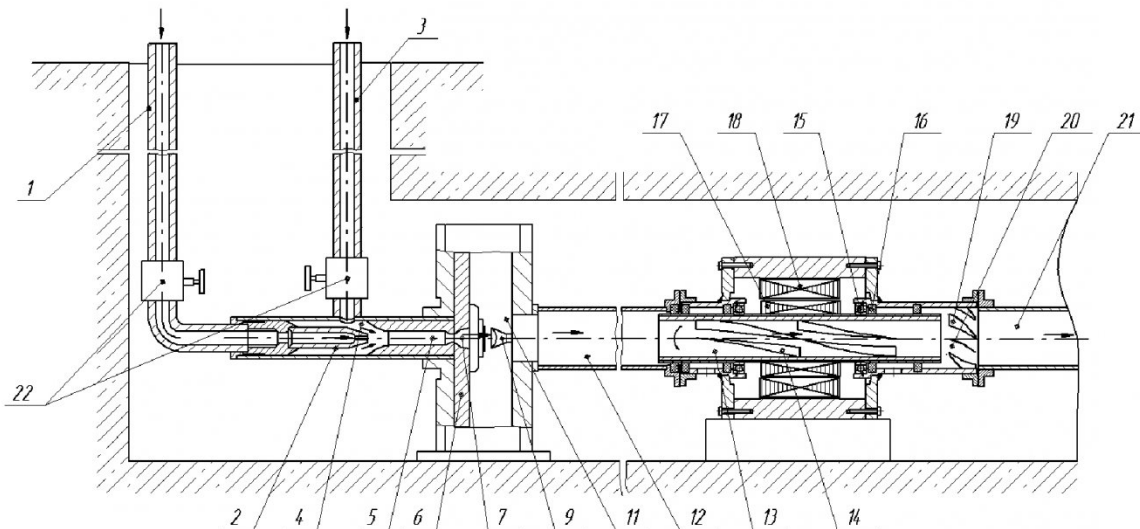


Рис. 5. Смеситель-активатор закладочной смеси  
Fig. 5. Mixer-activator of stowage mix

на закладочном трубопроводе 11.

При движении ЛТС через данное устройство, смесь механически активируется лопатками 8, приобретая однородность и повышенную текучесть. Пульсации давления и скорости потока смеси, при движении ЛТС в неподвижных межлопаточных каналах 14 (рис. 4, б) направляющего аппарата 15, имеющих сужение 12 и расширение 13, обеспечивают дополнительное разрушение гидратных пленок на частицах цемента ЛТС, увеличивая впоследствии скорость твердения закладочного массива.

При раздельной подаче компонентов закладочных смесей в ствол рудника, может использоваться смешительно-активирующий комплекс, представленный на рис. 5 [14]. Комплекс содержит вертикальные подводящие трубопроводы 1 и 3, предназначенные для раздельной подачи гидратированного наполнителя и вяжущего вещества к смешительным соплам 2, в эжекционные камеры 4. Патрубки 5, кавитационного устройства, прижаты к вращающемуся диску 6 с концентричными профилированными отверстиями 7, приводимому во вращение от электродвигателя 8. Электродвигатель 8 вращает диск 7 с ча-

стотой, необходимой для создания ультразвуковых пульсаций потока закладочной смеси. Пульсации скорости и давления в кавитационной области способствуют гидродинамическому воздействию на смесь, сопровождаемому ее перемешиванием и активацией. Активирующее гомогенизирующее устройство (рис. 5, поз. 13-20), установленное далее по трубопроводу 21, на определенном расстоянии  $L_r$ , работает аналогично вышеописанному устройству рис. 4. Взаимодействие смеси с лопатками вихревой камеры активирующего устройства создает комплексное механическое воздействие на транспортируемую смесь.

В результате исследований [15] установлено, что такие активирующие устройства обеспечивают возможность подачи твердеющих смесей, обладающих тиксотропными свойствами, даже при влагосодержании 24-26% по трубам, на значительные расстояния, с сохранением их необходимых реологических свойств. Таким образом, модернизация закладочных комплексов транспортирования ЛТС с применением активирующего оборудования является актуальным направлением развития трубопроводного транспорта закладоч-

ных смесей и обеспечивает снижение издержек на разработку полезных ископаемых, а также позволяет повысить безопасность ведения подземных горных работ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ломоносов Г. Г. Производственные процессы подземной разработки рудных месторождений. – М., Горная книга, 2011. –376 с.
2. Хайрутдинов, М.М Подземная геотехнология с закладкой выработанного пространства. Недостатки и возможности совершенствования / Хайрутдинов М.М., Шаймярдянов И.К. // Горный информационно-аналитический бюллетень «Неделя горняка -2008» / Горная книга. –М., 2008. –С. 240-250.
3. Гришко, А.П., Стационарные машины и установки / Гришко А.П., Шелоганов В.И. –М.: Горная книга, 2007. –475 с.
4. Анушенков, А.Н. Основы процессов производства и транспортирования закладочных смесей, при подземной разработке месторождений полезных ископаемых / Анушенков А.Н., Стовманенко А.Ю., Волков Е.П. –Красноярск: СФУ, 2015. –208 с.
5. Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых. –М.: Ростехнадзор, 2013.
6. Горбунова О.А. Освоение подземного пространства при утилизации техногенных отходов. Заполнение выработанного пространства твердеющей закладкой на основе отходов обогащения. –М.: Горная книга, 2010. –97 с.
7. Ермолович Е.А. Бесцементная закладочная смесь на основе техногенных отходов // Научные ведомости. Серия Естественные науки, 2010. – №9. –С. 156–158.
8. Bondarenko, V. New Techniques and Technologies in Mining / Bondarenko V., Kovalevska I., Dychkovskiy R. // CRC Press, 2010. –300 p.
9. Schramm G. A. Practical approach to rheology and rheometry // Gebrueder HAAKE GmbH, 2003. –312 p.
10. Анушенков А.Н. Разработка комплексов приготовления и транспорта твердеющих смесей для закладки горных выработок. Красноярск: ГУЦМиЗ, 2006. –170 с.
11. Развитие технологии трубопроводного транспорта закладочных смесей на большие расстояния на руднике «Октябрьский» // Физ. тех. проблемы разработки полезных ископаемых. Тапсиев А.П. [и др.] Новосибирск, 2009. №3. С. 81–91.
12. Пат. 157377, РФ, МКИ E21F 15/08. Активатор жидких сред / СФУ; Стовманенко А.Ю., Анушенков А.Н. –Опубл. в Б.И., 2015. –№ 33.
13. Пат. 126369, РФ, МКИ E21F 15/00. Активатор жидких сред (варианты) / СФУ; Стовманенко А.Ю., Анушенков А.Н. –Опубл. в Б.И., 2013. –№ 9.
14. Пат. 159536, РФ, МКИ E21F 15/10. Смесительно-активирующее устройство / СФУ; Стовманенко А.Ю., Анушенков А.Н. –Опубл. в Б.И., 2016. –№ 9.
15. Стовманенко А.Ю., Анушенков А.Н. Повышение эффективности транспортирования закладочных смесей при подземной разработке месторождений полезных ископаемых // Материалы 13-го международного симпозиума «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных условиях. Белгород: ВИОГЕМ, 2015. С. 292–303.

### REFERENCES

1. Lomonosov G. G. Productions of underground mining of ore fields. – M, the Mountain book, 2011. – 376 pages.
2. Hayrutdinov, M. M Underground geotechnology with laying of the developed space. Shortcomings and opportunities Improvement / Hayrutdinov M. M., Shaymyardyanov I.K.//Mountain information and analytical bulletin "Week of the Miner-2008" / Mountain book. – M, 2008. – Page 240-250.
3. Grishko, A.P., Stationary devices and units / Grishko A.P., Sheloganov V. I. – M.: Mountain book, 2007. –475 pages.
4. Anushenkov A.N., Stovmanenko A.Yu., Volkov E.P. Bases of processes of production and transportation of stowage mixes, by underground mining of mineral deposits. Krasnoyarsk: SFU, 2015. –208 p.
5. Safety rules when conducting mining operations and processing solid minerals. – M. Rostekhnadzor, 2013.
6. Gorbunova O. A. Development of underground space at utilization of technogenic waste. Filling of the developed space with the hardening bookmark on the basis of enrichment waste. – M.: Mountain book, 2010. – 97 pages.
7. Yermolovich E.A. Without cement stowage mix on the basis of technogenic waste // Scientific sheets. Series Natural sciences, 2010. – No. 9. – Page 156-158.

8. Bondarenko, V. *New Techniques and Technologies in Mining* / Bondarenko V., Kovalevska I., Dychkovskiy R. // CRC Press, 2010. –300 p.
9. Schramm G. A. *Practical approach to rheology and rheometry* // Gebrueder HAAKE GmbH, 2003. -312 p.
10. Anushenkov A.N. *Development of complexes of preparation and transport of the hardening mixes for a laying of excavations*. Krasnoyarsk: University of non-ferrous metals and gold, 2006. 170 pages.
11. *Development of technology of pipeline transport of stowage mixes on long distances on the October mine*//Physical. those. problems of development of minerals. Tapsiyev A.P. Novosibirsk, 2009. No. 3. Page 81-91.
12. Stovmanenko A.Yu., Anushenkov A.N. *Activator of liquid*, Patent RF no. 157377, E21F 15/08. 2015.
13. Stovmanenko A.Yu., Anushenkov A.N. *Activator of liquid (options)* Patent RF no. 126369 E21F 15/00, 2013.
14. Stovmanenko A.Yu., Anushenkov A.N. *The mixing activating device* Patent RF no. 159536, E21F 15/10, 2016.
15. Stovmanenko A.Yu., Anushenkov A.N. *Increase of efficiency of transportation of stowage mixes by underground mining of fields of minerals*//Materials of the 13th international symposium "Development of fields of mineral resources and underground construction in difficult conditions. Belgorod: VIOGEM, 2015. Page 292-303.

Поступило в редакцию 15.03.2016  
Received 15 March 2016