

УДК 622.272

## **Разработка рецептур и механизма активации закладочных смесей для подземной разработки полезных ископаемых с использованием хвостов обогащения**

**Е.П. Волков\***, С.А. Вохмин,  
А.Н. Анушенков, А.И. Голованов  
Сибирский федеральный университет,  
Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

Received 06.11.2013, received in revised form 19.01.2014, accepted 27.02.2014

---

*Основным решением, позволяющим обеспечить безопасность и достаточно высокую эффективность подземной разработки месторождений в усложняющихся горно-геологических и горно-технических условиях, является использование при добыче руд систем с закладкой выработанного пространства. Из всех существующих систем разработок с закладкой наибольшей эффективности достигают при использовании твердеющих закладочных смесей. В статье приведены результаты лабораторных исследований по разработке рецептур и механизма активации закладочных смесей для подземной разработки полезных ископаемых с использованием хвостов обогащения. Проведенные исследования позволили выявить закономерности повышения реакционных свойств литых твердеющих смесей с выбранным активизатором.*

*Ключевые слова: хвосты обогащения, закладочный раствор, кинетика твердения.*

---

Практика ведения горных работ показывает, что закладка выработанного пространства экономически оправдана при разработке не только месторождений ценных руд, но и ряда угольных и железорудных месторождений.

Для формирования искусственного массива используют специально добываемые заполнитель и цемент, отличающиеся высокой стоимостью. Их использование и сопровождающие потери при существующих технологиях формирования закладочного массива снижают конкурентную способность систем разработки с закладкой, препятствуя их широкому внедрению.

В то же время на горно-металлургических предприятиях в районах добычи накопилось много отходов различных производств, одними из которых являются хвосты обогащения добываемых на предприятии руд.

Использование хвостов обогащения для производства работ по закладке выработанных пространств, в том числе и твердеющими смесями, имеет важные экологические, экономиче-

ские и технологические предпосылки. Закладочные смеси с использованием хвостов обогащения используются в России, Канаде, ЮАР, Австралии и других странах.

Кроме определения рецептур закладочных смесей, отвечающих требованиям ведения очистной выемки, необходимо разработать рациональный способ их производства с использованием активации материалов смеси.

При двухкомпонентном составе закладочной смеси – ХЦ (хвосты + цемент) традиционные способы её приготовления с использованием смесителя и шаровой мельницы. При этом необходимо проанализировать эффективность используемых способов активации закладочных смесей и наметить пути совершенствования их приготовления на горно-рудных предприятиях. На основании проведения лабораторных исследований по подбору составов смеси были предоставлены цемент М300 и породные хвосты ТОФ.

Портландцемент отбирали на ленточном конвейере № 9 на руднике «Комсомольский».

Хвосты отвалынные из бака сгущенных хвостов подавали через сливной патрубок в бочки.

Для определения гранулометрического состава отобранных породных хвостов ТОФ были взяты две пробы (табл. 1).

Перед подбором составов закладочных смесей были проведены исследования по определению фактического содержания воды в породной части хвостов, отбираемых из проб, для проведения лабораторных испытаний. Полученные результаты нужны для дальнейшего расчета необходимого количества воды для затворения образцов.

Для этого была отобрана проба хвостов, определены ее объем и плотность. Затем из пробы была выведена вода высушиванием и определена масса на электронных весах (точность измерения 0,1 г), объем и плотность сухих хвостов. Плотность сухих хвостов составила 1,82 г/см<sup>3</sup>.

Далее в высушенные хвосты постепенно добавляли воду. В каждой серии фиксировали количество добавленной воды, объем пробы и ее вес, определяли плотность жидких хвостов. По результатам исследований составлена диаграмма для определения количества воды в хвостах, содержащихся в отобранной пробе, в зависимости от ее плотности (рис. 1).

Минимальное значение плотности 1,82 г/см<sup>3</sup> внизу графика соответствует значению плотности насыпных хвостов после их полного обезвоживания. Постепенное добавление воды

Таблица 1. Гранулометрический состав породных хвостов

Классы крупности, мм	Выход			
	Проба № 1		Проба № 2	
	г	%	г	%
+ 0,250	12,6	2,52	36,4	7,28
+ 0,170	126,1	25,22	315,8	63,16
+ 0,080	31,6	6,32	20,0	4,00
+ 0,074	77,7	15,54	62,7	12,54
+ 0,063	50,2	10,04	23,2	4,64
+ 0,045	110,9	22,18	27,4	5,48
- 0,045	90,9	18,18	14,5	2,90
Итого	500	100,0	500	100,0

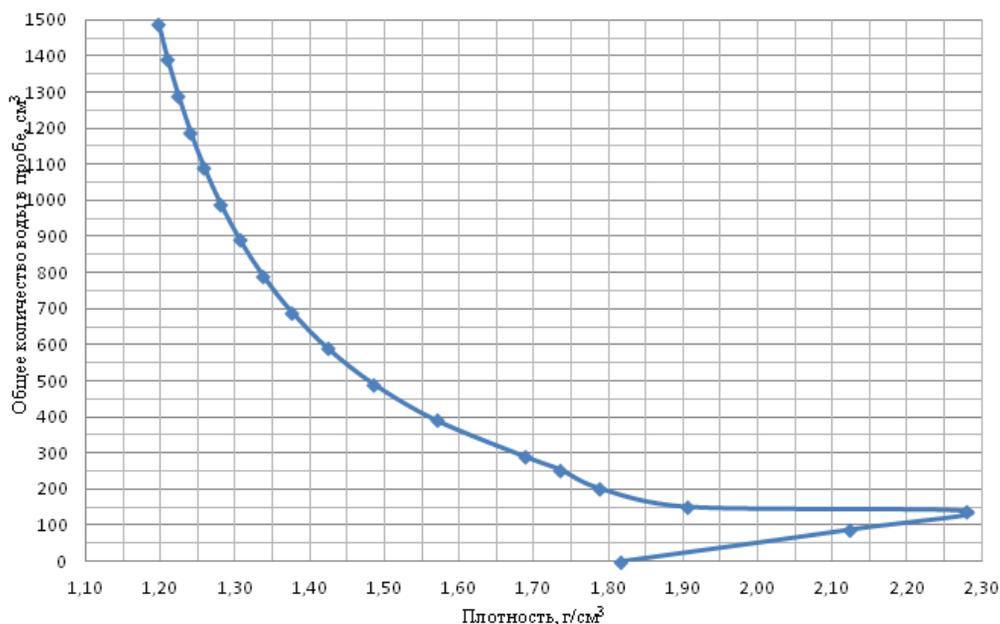


Рис. 1. Зависимость количества воды в пробе хвостов ТОФ от их плотности

приводит к заполнению пор предварительно сухого состава хвостов при одновременном уменьшении объема пробы за счет растекания увлажненных частиц. Это вызывает увеличение плотности увлажненных хвостов. Плотность увеличивается до максимального значения, которое соответствует стадии максимального смачивания хвостов. По данным лабораторных исследований, плотность при этом составляет 2,28 г/см³.

Затем при появлении воды, покрывающей объем полностью смоченной пробы, плотность влагосодержащих хвостов начинает равномерно уменьшаться. График построен до плотности хвостов 1,2 г/см³, которая соответствует предельно минимальной плотности хвостов, поступающих в бак приема.

На основании полученной зависимости определяется фактический объем воды в одном литре хвостов (рис. 2) и необходимое количество воды для подбираемого состава закладочной смеси. График зависимости построен для реальных условий (плотность хвостов, подаваемых на производство закладочных смесей, должна быть не менее 1,2 г/см³).

Учитывая, что зависимость изменения плотности влагосодержащих (текучих) хвостов от количества воды в 1 л должна иметь прямолинейный характер, в качестве расчетной графической зависимости принята прямая.

Зависимость количества воды в 1 л хвостов, см³ – (В) от плотности влагосодержащих хвостов (γ) можно определить по формуле

$$B = - 629,4 + 1646. \tag{1}$$

Данная формула применима в интервале  $2,28 \text{ г/см}^3 > \gamma > 1,2 \text{ г/см}^3$ .

Подбор составов закладочных смесей произведен согласно требованиям РТПП – 045 – 2004 (п. 7.6).

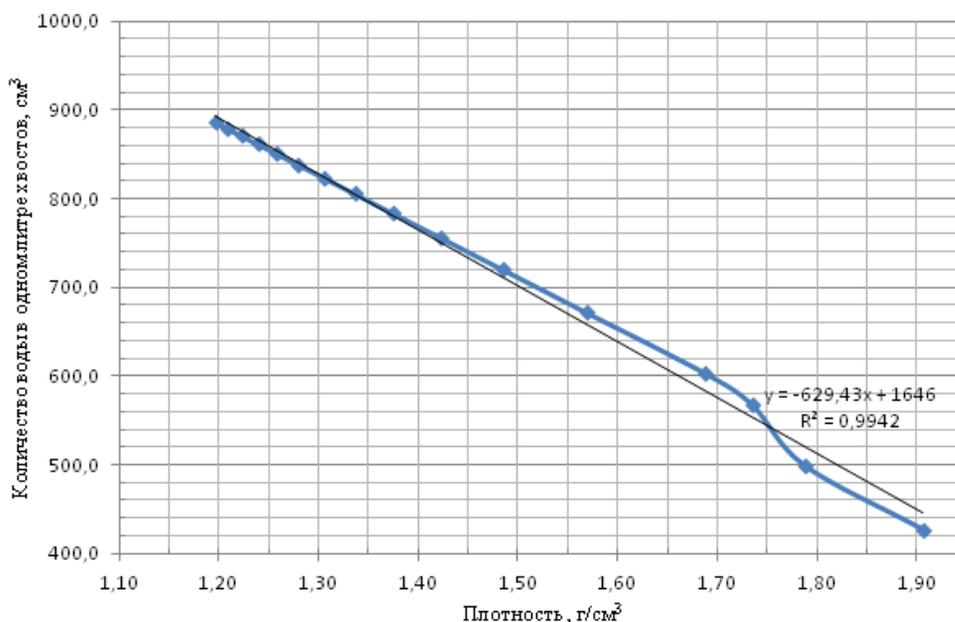


Рис. 2. Зависимость количества воды в 1 л хвостов ТОФ от их плотности

Состав материалов на 1 м³ закладочной смеси при составах ХЦ рассчитывают из выражения

$$\frac{Ц}{\gamma_{ц}} + \frac{X}{\gamma_{x}} + B = 1, \quad (2)$$

где Ц, X и B – содержание цемента, породной части хвостов обогащения ТОФ и воды, т/м³;  $\gamma_{ц}$ ,  $\gamma_{x}$ , – удельный вес цемента и хвостов, т/м³.

Для подбора составов закладочных смесей ХЦ (хвосты + цемент + вода) первоначально было определено необходимое удельное количество воды для затворения. Анализ ранее проведенных исследований, данных по закладочному комплексу рудника «Комсомольский», и составов, изложенных в РТПП – 045 – 2004, предопределили принять в лабораторных исследованиях количество воды на 1 м³ закладочной смеси в объеме 500 л по всем исследуемым составам. Дальнейшие исследования показали, что величина распыла по Суттарду была не менее 180 мм, что удовлетворяет требованиям при транспортировании смеси.

Удельное количество цемента в составах ХЦ, исследуемых через перемешивание в смесителе, принято: 140; 170; 200; 240; 280; 320; 360 и 400 кг/м³, при использовании шаровой мельницы: 170; 240; 320 и 400 кг/м³.

Исходное количество воды в 1 л хвостов определяли по формуле 1.

Необходимое количество хвостов обогащения для всех составов рассчитывали по формуле 2.

Для изготовления образцов исследуемых составов закладочных смесей было изготовлено 10 одноячеековых металлических форм, аналогичных применяемым в лаборатории ПЗК рудника «Комсомольский», и 10 деревянных разборных комплектов форм по 15 ячеек.

Испытание составов твердеющих закладочных смесей ХЦ проводили по двум схемам:

- с использованием смесителя;
- с использованием совместного домола в шаровой мельнице.

Для лабораторных испытаний составов ХЦ применен смеситель лопастного типа объемом 50 л.

Время смешивания во всех экспериментах принято 10 мин. Сразу после окончания смешивания определяли растекаемость смеси по Суттарду и измеряли ее плотность.

Кривая набора прочности состава ХЦ при удельном расходе цемента 280 кг/м<sup>3</sup> имеет следующую зависимость:

$$\sigma_{с.жс} = 0,6928 \cdot \ln(t) - 0,5145, \text{ МПа.} \quad (3)$$

Данная зависимость характерна для кинетики твердения составов с применением смесителя (табл. 2).

Кинетика твердения составов ХЦ с применением смесителя изображена на рис. 3.

Зависимости набора прочности образцов от удельного расхода цемента по контрольным срокам испытаний: 7, 28, 90 дней приведены на рис. 4.

Плотность твердеющей смеси и контрольные характеристики прочности на 3, 7, 28 и 90-е сутки представлены в табл. 3.

Для лабораторных испытаний составов ХЦ была использована также шаровая мельница.

Для помола в мельнице применяли циплепсы, каждый весом 120 г. Их объем принимали из расчета 1/3 от объема исследуемого состава смеси. При замешивании 25 л смеси вес циплепсов составил 39 кг.

Кривая набора прочности состава ХЦ с применением шаровой мельницы при удельном расходе цемента 240 кг/м<sup>3</sup> имеет следующую зависимость:

$$\sigma_{с.жс} = 0,5006 \cdot \ln(t) - 0,3098, \text{ МПа.} \quad (4)$$

Данная зависимость характерна для кинетики твердения составов с применением шаровой мельницы (табл. 4).

Таблица 2. Составы (ХЦ) и зависимости их твердения с применением смесителя

Номер состава	Расход материалов, кг/м <sup>3</sup>			Зависимость
	Хвосты ТОФ	Цемент	Вода, л	
1	1274	140	500	$\sigma_{с.жс} = 0,1774 \cdot \ln(t) - 0,1783$
2	1246	170	500	$\sigma_{с.жс} = 0,3682 \cdot \ln(t) - 0,4153$
3	1079	200	550	$\sigma_{с.жс} = 0,471 \cdot \ln(t) - 0,5017$
4	1183	240	500	$\sigma_{с.жс} = 0,5532 \cdot \ln(t) - 0,3978$
5	1147	280	500	$\sigma_{с.жс} = 0,6928 \cdot \ln(t) - 0,5145$
6	1112	320	500	$\sigma_{с.жс} = 0,7833 \cdot \ln(t) - 0,561$
7	1075	360	500	$\sigma_{с.жс} = 0,8877 \cdot \ln(t) - 0,5305$
8	1039	400	500	$\sigma_{с.жс} = 0,9728 \cdot \ln(t) - 0,3155$

Таблица 3. Составы на основе хвостов и цемента (ХЦ) и контрольные характеристики прочности с применением смесителя

Номер состава	$\gamma_{тв. смеси}, \text{т/м}^3$	Контрольная характеристика прочности, МПа, сут			
		3	7	28	90
1	1,91	-	0,15	0,45	0,6
2	1,92	-	0,3	0,8	1,25
3	1,83	-	0,4	1,1	1,6
4	1,92	0,3	0,55	1,5	2,1
5	1,93	0,35	0,7	1,8	2,65
6	1,93	0,45	0,85	2,0	3,05
7	1,94	0,6	1,05	2,4	3,5
8	1,94	0,75	1,35	3,1	4,0

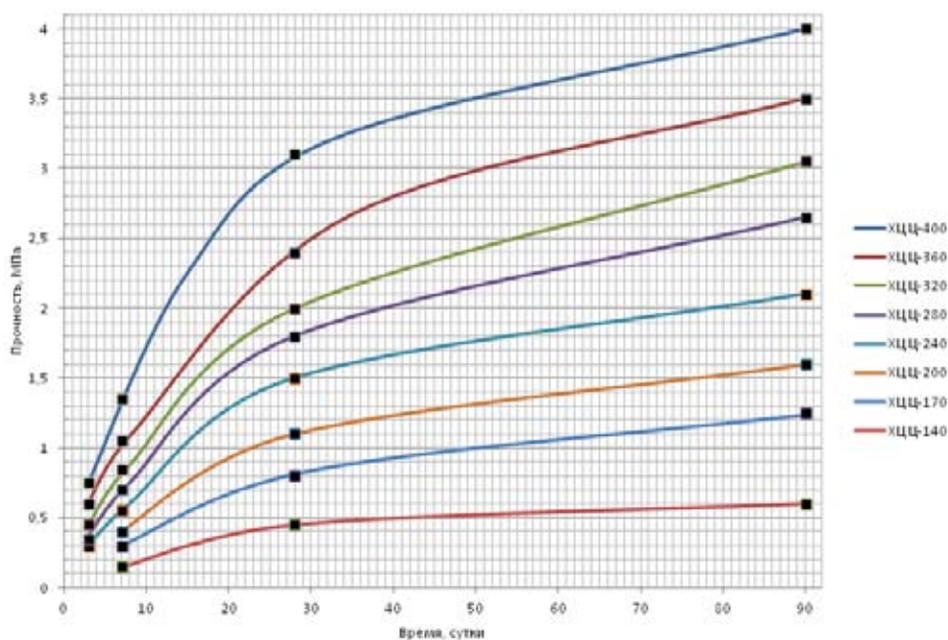


Рис. 3. Кинетика твердения составов ХЦ с применением смесителя

Таблица 4. Составы (ХЦ) и зависимости их твердения с применением шаровой мельницы

Номер состава	Расход материалов, кг/м <sup>3</sup>			Зависимость
	Хвосты ГОФ	Цемент	Вода, л	
1	1246	170	500	$\sigma_{сж} = 0,4604 \cdot \ln(t) - 0,5421$
2	1183	240	500	$\sigma_{сж} = 0,5006 \cdot \ln(t) - 0,3098$
3	1111	320	500	$\sigma_{сж} = 0,803 \cdot \ln(t) - 0,3531$
4	1039	400	500	$\sigma_{сж} = 0,931 \cdot \ln(t) - 0,3971$

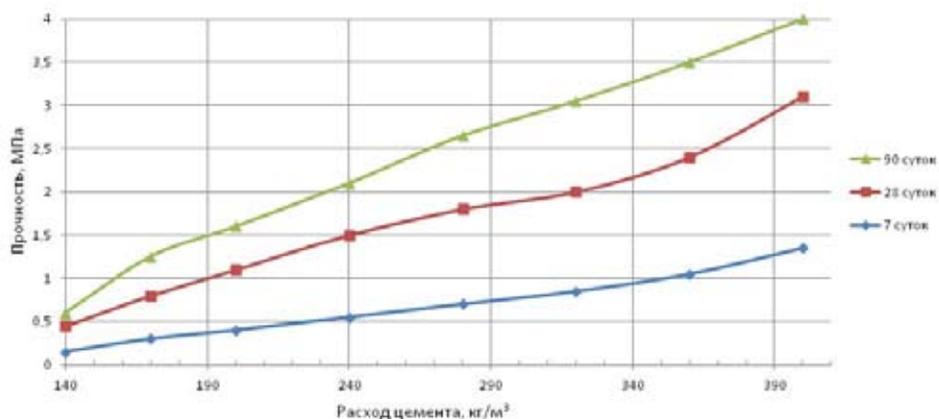


Рис. 4. Зависимости набора прочности образцов составов ХЦ от удельного расхода цемента по контрольным срокам испытаний

Таблица 5. Составы на основе хвостов и цемента (ХЦ) и контрольные характеристики прочности с применением шаровой мельницы

Номер состава	$\gamma_{\text{тв. смеси}}$ , т/м³	Контрольная характеристика прочности, МПа, сут			
		3	7	28	90
1	1,92	-	0,35	0,95	1,5
2	1,92	0,3	0,55	1,25	2,0
3	1,93	0,6	1,2	2,25	3,3
4	1,94	1,5	2,25	3,3	4,7

Плотность твердеющей смеси и контрольные характеристики прочности на 3, 7, 28 и 90-е сутки представлены в табл. 5.

Кинетика твердения составов ХЦ с применением шаровой мельницы изображена на рис. 5.

Зависимости набора прочности образцов от удельного расхода цемента по контрольным срокам испытаний: 7, 28, 90 дней приведены на рис. 6.

Таким образом, в результате лабораторных исследований выявлены:

- зависимость количества воды от плотности текучих породных хвостов ТОФ;
- закономерности повышения реакционных свойств литых твердеющих смесей (ЛТС) на основе хвостов обогащения ТОФ-2 Норильского комбината;
- основные закономерности изменения свойств ЛТС на основе хвостов обогащения ТОФ-2 с выбранным активизатором (цемент).

Анализ результатов лабораторных и опытно-промышленных исследований показывает, что в контрольные сроки твердения прочность образцов, полученных в различных условиях (лабораторные исследования и опытно-промышленные испытания), значительно отличаются.

Различные прочности, показываемые одними и теми же рецептурами составов в сторону ее увеличения в натуральных условиях и лабораторных образцов, объясняются рядом причин.

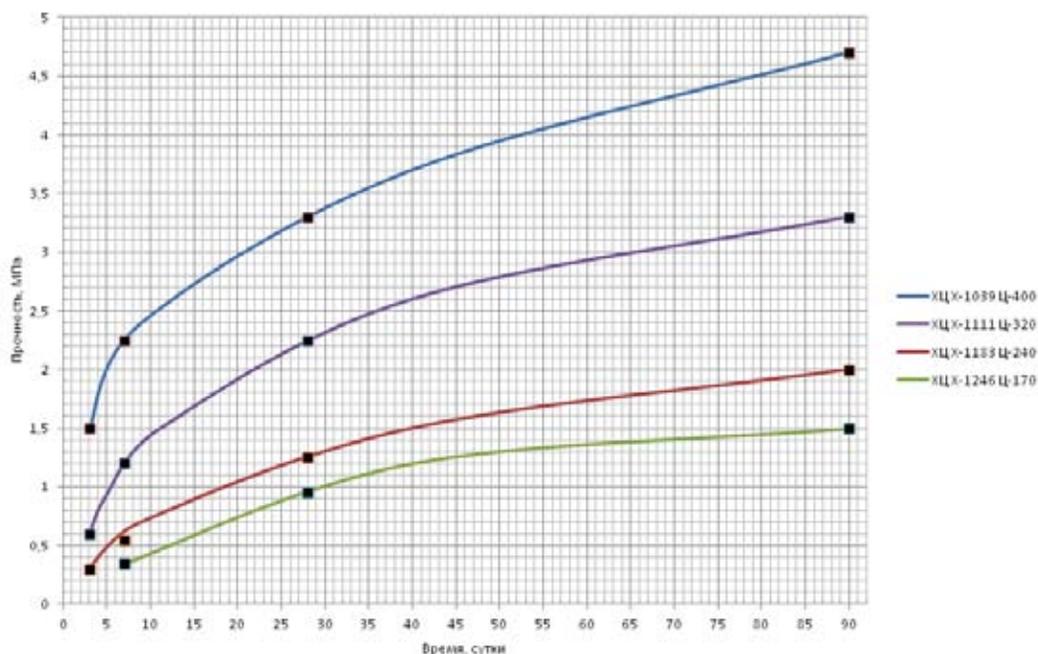


Рис. 5. Кинетика твердения составов ХЦ с применением шаровой мельницы

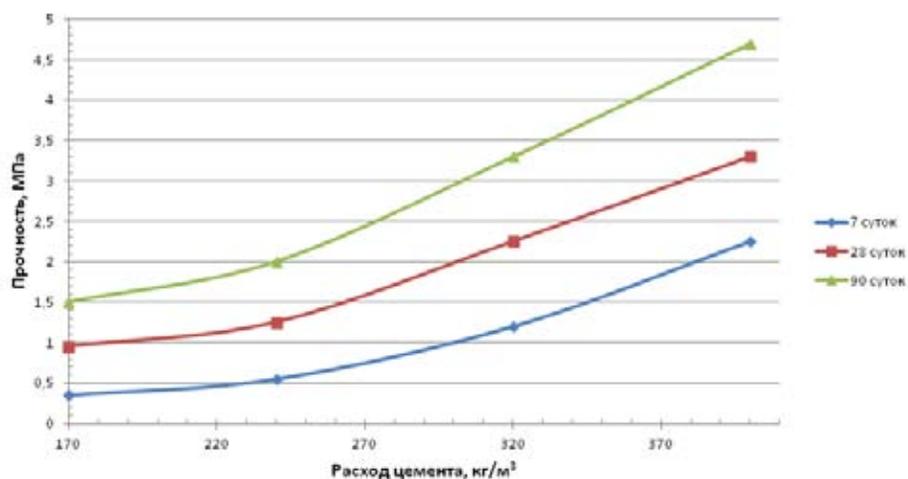


Рис. 6. Зависимости набора прочности образцов составов ХЦ от удельного расхода цемента по контрольным срокам испытаний

Во-первых, для приготовления твердеющих смесей из отвалных продуктов в шаровых мельницах подбирается шихта из различных типов производственных отходов и материала заполнителя и вяжущего, некоторые из которых могут выступать как в рамках вяжущего, так и заполнителя в зависимости от тонины их измельчения и среды, в которой идет измельчение и их гомогенизация (активация) в растворе, инициирующем их вяжущие способности.

Очевидно, что натурные условия позволяют обеспечить все вышеназванные условия в процессе производства твердеющих смесей более эффективно, чем в смоделированных в лабораторных условиях мельничного способа приготовления, когда эффективность измельчения, перемешивания и гомогенизации составов менее энергонасыщенна.

Однако картина набора прочности составов в лаборатории и в условиях производства смесей на руднике «Комсомольский» в целом идентична.

Таким образом, изучение технологических возможностей способов ведения закладочных работ на основе отходов различных производств с применением активации в процессе приготовления и транспорта литых твердеющих смесей в настоящее время становится весьма актуальной темой. Основываясь на идее использования закономерностей повышения вяжущих и реологических свойств различных смесей материалов при их активации, мы видим возможность создать новую ресурсосберегающую технологию приготовления и транспорта твердеющих смесей из отвальных продуктов.

## **Development of Formulations and the Mechanism of Activation of Mixtures for Underground Mining with use of Mill Tailings**

**Evgeniy P. Volkov, Sergey A. Vokhmin,  
Alexander N. Anushenkov and Alexey I. Golovanov**  
*Siberian Federal University  
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia*

---

*The basic solution, allowing to provide safety and sufficiently high efficiency of underground mining of fields in becoming complicated mining-and-geological and mining conditions, use at production of ores of filling method. From all systems of development existing today filling method, the greatest efficiency reach when using hardening concrete mixes. Results of laboratory researches on development of compoundings and the mechanism of activation of hardening concrete mixes are given in article for underground mining of minerals with use of mill tailings. The conducted researches allowed to reveal regularities of increase of reactionary properties of filling method with the chosen activator.*

*Key words: mill tailings, filling mass, kinetics of maturing.*

---