

# УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ ДОЛОМИТА В ГОРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

В.И. ГОЛИК, доктор техн. наук, профессор, ФГБУН Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и правительства Республики Северная Осетия-Алания, О.Н. ПОЛУХИН, доктор полит. наук, профессор, ректор, Белгородский государственный университет, О.З. ГАБАРАЕВ, доктор техн. наук, профессор, Северо-Кавказский государственный технологический университет

**В статье говорится о том, что из отходов доломитов возможно получение вяжущего вещества, сравнимого по свойствам с товарным цементом, что позволяет использовать экологически корректные технологии добычи руд. Смеси на основе доломитов и хвостов обогащения по прочности только на 8–22% уступают смесям со стандартным цементом и пригодны для строительства в горных выработках.**

Большинство запасов месторождений России не может извлекаться открытым способом, поэтому в ближайшей перспективе им предстоит конверсия на технологии разработки подземным способом.

Эта тенденция вступает в противоречие с сельскохозяйственным направлением развития регионов. Многие из них располагают крупными запасами черноземных пахотных земель, которые в совокупности составляют основу продовольственной безопасности РФ и исключают использование технологий с разрушением земной поверхности.

Опыт разработки месторождений позволяет прогнозировать для использования системы разработки с закладкой пустот твердеющими смесями, что при неоспоримых преимуществах требует высоких эксплуатационных затрат на изготовление твердеющих закладочных смесей и наличие определенного сырья для их изготовления.

Регионы располагают запасами цементного сырья – мела, глин и суглинков, выветрелых сланцев и т.п., но добыча его для приготовления твердеющих смесей осложнит экологическую ситуацию, которая и сейчас во многих регионах неблагоприятна.

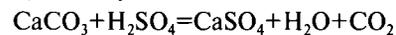
Концепция освоения рудных месторождений включает освоение технологий глубокой переработки отходов горного производства для комплексного предотвращения деградации геологической среды. Наиболее перспективны отходы добычи доломитов, которые используются как некондиционный строительный материал.

Для обоснования возможности и экологической целесообразности использования доломитовых отходов в составе твердеющих закладочных смесей исследуются параметры:

- прочность твердеющих смесей с традиционным вяжущим;
- прочность твердеющих смесей на основе доломитовых вяжущих;
- методы повышения вяжущих способностей доломитов;
- методы управления массивами закладкой на основе доломитов.

Экономическая целесообразность технологий разработки с закладкой твердеющими смесями увеличивается в связи с тем, что разубоживание руды закладочным материалом влияет на показатели ее обогащения и экологию региона. Загрязнение руды цементом на 1% снижает извлечение металлов в концентраты на 0,8–1,0%, в то время как разубоживание вмещающими породами на тот же 1% – лишь на 0,15–0,20%. При использовании твердеющей смеси на цементной основе извлечение при обогащении снижается на 4–5%.

Любая порода, содержащая в достаточном количестве  $\text{CaCO}_3$  (доломит, известняк, мрамор, кальцит, сидерит, магнезит и т.п.), может быть использована как в качестве вяжущего, так и в качестве заполнителя. При воздействии на породы, содержащие  $\text{CaCO}_3$ , кислотными растворами или кислотными рудничными сточными водами, получается гипс. При воздействии на известняк серной кислоты природного происхождения с участием пирита получаются гипс, вода и углекислый газ:



Условиями образования гипса являются наличие серной кислоты в растворе или в воде с  $\text{pH} < 6$  и необходимость отвода воды и углекислого газа. Важным свойством такого материала является увеличение объема при затвердевании. Для создания прочной и монолитной закладки достаточно превратить в гипс всего лишь 20–30% известняка или доломита. Количество серной кислоты для превращения в гипс пород, содержащих  $\text{CaCO}_3$ :

$$\sqrt{S} = \gamma_s P \frac{M_s}{M_d},$$

где  $\sqrt{S}$  – количество серной кислоты для образования смеси;  $P$  – количество содержащей  $\text{CaCO}_3$  породы:

$$P = q \frac{M_n \gamma_s}{M_d \gamma_n},$$

где  $q$  – количество гипса, ангидрита, доли ед.;  $q=0,2$ ;  $\gamma_u, \gamma_n, \gamma_s$  – объемная масса гипса, мрамора, известняка, кальцита, сидерита, доломита и др. и серной кислоты,  $\text{т/м}^3$ ;  $M_s$  – молекулярный вес серной кислоты;  $M_n$  – молекулярный вес известняка;  $M_d$  – молекулярный вес гипса.

Скорость твердения закладочного массива зависит от наличия в нем отработанного раствора. Условия формирования такого массива исследованы на модели, имитирующей добычный блок. Моделирование выполнено на плоском стенде размерами: длина 2 м, ширина 0,5 м, высота

2,5 м с прозрачным изолирующим корпусом, позволяющим регистрировать параметры газовых процессов.

Масштаб моделирования 1:200. Породы имитируются песчано-цементной смесью однородного весового состава в соотношении 15:1 при водоцементном отношении 1,7 и расходе компонентов: песок – 170 кг, цемент марки 400 – 12 кг, вода – 20 л на одну порцию, имитирующую 1 м<sup>3</sup>.

Для образования твердеющей закладки использованы сухие материалы, уложенные двумя слоями поочередно. Верхний слой двухслойной секции засыпан отходами доломита. В нижнем слое засыпан инертный к серной кислоте измельченный алевролит с добавкой обожженной извести. Часть раствора и образующиеся в результате реакции кислые воды переходят из верхнего в нижерасположенный слой, где под их воздействием образуется гашеная известь.

В процессе моделирования слои обрабатывали раствором серной кислоты, имитирующим шахтные воды. Раствор попадает в расположенный под этим слоем нижний слой и используется на гашение женой извести, которая является вяжущим для твердеющей смеси.

Применение доломитов и женой извести улучшает прочность массива при сокращении времени его твердения. При фильтрации через нижний слой пород раствора гипс, образовавшийся в верхнем слое, оседает на породах нижнего слоя. В нижнем слое появляется затвердевший массив, прочность которого не уступает прочности верхнего слоя.

Поступающий в основание модели отработанный раствор серной кислоты используется повторно в замкнутом цикле без выхода в окружающую среду.

Условия опыта варьировали: изменяли концентрацию раствора серной кислоты и варианты отвода воды из закладки. При изменении одного параметра другие оставляли постоянными (табл. 1-2).

Таблица 1. Влияние кислотности растворов на параметры твердения

Кислотность, РН	4,0	5,0	6,0
Время набора прочности 1,5 МПа, с	10	15	25

Таблица 2. Влияние параметров увлажнения

Время отвода вод из массива, недели	1	2	3	4	5	6
	Время набора прочности 1,5 МПа, недели	1	1,2	2,5	4	8
Время набора прочности 2,5 МПа, недели	1,2	1,4	3	6	12	24

Если воду из закладки не отводить, гипс образуется 3-4 месяца. Если воду отводить в течение 1-2 недель, твердеющая закладка за 1-2 недели набирает прочность 1,5-2,5 МПа, а объем ее увеличивается на 10-30%.

Марка вяжущих из доломита может быть увеличена за счет его активации. Разрушение кристаллов в дезинтеграторе образует более активные дефектные поверхности, чем при расколе и разломе в шаровых мельницах. Одновременно с этим протекают механохимические реакции, компонентами которых являются примеси, пары воды и точечные дефекты. Часть энергии, аккумулируемой

материалом, расходуется на образование агрегатов новых веществ.

При дезинтеграции материала происходит его разделение, причем твердые частицы являются дополнительные абразивом. Тонкое измельчение позволяет изготавливать аналоги вяжущих веществ за счет прироста удельной поверхности от 40 до 150%.

Для установления механизма активации доломитовых отходов сравниваются варианты смесей доломита и хвостов обогащения Мизурской фабрики:

- доломит и хвосты без подготовки;
- доломит с подготовкой в шаровой мельнице и хвосты;
- доломит с подготовкой в дезинтеграторе и хвосты.

Темпы увеличения марки доломитового вяжущего за счет эффектов активации оцениваются по прочности контрольных кубов в возрасте 14, 28 и 90 дней при одноосном сжатии.

Пробы доломита измельчали в шаровой мельнице и активировали в дезинтеграторе стендового типа. На раме смонтированы два электродвигателя, соединенные с валами. На валах закреплены роторы. Масса ротора, вала и рабочего органа дезинтегратора при скорости вращения до 50 с<sup>-1</sup> обеспечивает достаточную для исследований кинетическую энергию. В стенде использованы лопастные роторы с негативным защитным слоем с наплавкой быстро изнашивающихся участков сплавом Э320х23С2ГТР.

Масса использованных роторов, кг: первый – 90; второй – 42; третий – 56,5; четвертый – 81,5. Гранулометрический состав активируемых доломитов фиксируется перед заполнением каждой партии рабочего органа. Производительность дезинтеграторной установки определяется взвешиванием проб, прошедших через дозатор в течение определенного времени. В качестве заполнителя использовали высебки хвостов размерами более 20 мм. Компоненты перемешивали вручную: вначале сухой доломит и заполнитель, затем добавляли воду. На основании полученных данных определяется энергетический эквивалент вяжущего.

На первом этапе исследований изготовлены кубы из базового состава (табл. 3).

Таблица 3. Смесей с доломитом (тонкость помола 15%)

Компоненты смеси, кг/м <sup>3</sup>			Осадка конуса, см	Предельное напряжение сдвига, Па	Прочность, МПа		
доломит	хвосты	вода			14	28	90
40	1650	350	15,5	120	0,25	0,37	0,54
80	1600	350	14,9	119	0,39	0,47	0,67
120	1550	350	17,2	105	0,72	0,89	1,19
180	1500	350	16,5	130	0,94	1,19	1,24

На втором этапе исследований доломиты подготовлены в шаровой мельнице, а высебки хвостов обогащения использованы как заполнитель. Результаты испытания кубов указывают на прирост прочности (табл. 4).

Активация в шаровой мельнице повышает прочность в пределах 10%.

На третьем этапе исследуется эффективность активации доломитов в дезинтеграторе. В него загружали порции

Таблица 4. Смесы с доломитом после мельницы (тонкость помола 30%)

Компоненты смеси, кг/м <sup>3</sup>			Осадка конуса, см	Предельное напряжение сдвига, Па	Прочность, МПа		
Доломит	хвосты	вода			14	28	90
40	1650	350	16,5	130	0,3	0,41	0,67
80	1600	350	17,1	130	0,45	0,59	0,91
120	1550	350	15,9	125	0,81	0,99	1,22
180	1500	350	16,3	128	1,1	1,21	1,37

такой же крупности, как и в шаровую мельницу - отсека фракции менее 20 мм. После дезинтегратора отмечается снижение тонкости помола и удельной поверхности фракции менее 0,1 мм (табл. 5).

Таблица 5. Крупность доломитов после дезинтегратора

Серия	Остаток на сите в %, мм										Крупность в %, мм	Поверхность, м <sup>2</sup> /кг	
	2,5	1,6	1,0	0,6	0,4	0,315	0,20	0,16	0,1	0,08			0,1
I	0,6	0,7	1,4	2,8	4,4	4,57	10,1	7,48	13,7	54,5	44,4	118,2	91,0
II	1,0	1,3	2,3	4,6	7,0	5,63	11,0	8,6	13,1	45,3	35,8	121,6	79,8
III	1,4	2,5	3,3	5,3	8,2	6,48	13,9	6,84	13,7	38,7	29,9	119,6	69,6
IV	1,2	1,6	2,0	6,7	9,7	8,40	14,3	6,72	13,4	35,9	27,0	101,5	76,6
V	1,1	2,5	3,3	5,2	8,3	6,40	14,7	6,74	13,8	38,8	29,9	105,3	75,2
VI	1,0	1,3	2,5	4,4	7,5	5,13	11,2	8,40	13,2	45,1	35,8	114,5	80,8
ср.	1,1	1,8	2,8	4,8	7,7	6,10	12,5	7,46	13,5	43,1	33,8	113,4	77,1

В качестве заполнителя использована та же смесь фракций величиной -0,1 +2,5 мм (табл. 6).

Таблица 6. Крупность песчано-хвостовой смеси

Выход фракции, %										Поверхность, м <sup>2</sup> /кг
2,5	1,6	1,0	0,6	0,4	0,31	0,2	0,16	0,1	-0,1	
31,6	10,0	7,2	11,0	11,5	7,36	7,4	2,34	3,87	9,62	30,5

Изменение свойств смесей после активации характеризуется табл. 7.

Таблица 7. Смесы с хвостовой добавкой после активации в дезинтеграторе

Расход материалов, кг/м <sup>3</sup>			Осадка конуса, см	Напряжение сдвига, Па	Прочность кубов, МПа		
доломит	хвосты	вода			14	28	90
40	1650	350	9,20	140	0,60	0,82	0,97
80	1600	350	9,71	131	0,91	1,19	1,32
120	1550	350	10,01	125	1,19	1,30	1,53
180	1500	350	10,50	145	1,50	1,71	2,05

Для сравнительной оценки активации в шаровой мельнице и в дезинтеграторе подготовлены две партии доломитов с тонкостью помола 40% (табл. 8). Результаты исследований позволяют утверждать, что активация в дезинтеграторе увеличивает прочность смеси на 15-20% по сравнению с мельницей.

В дезинтеграторе тонкость помола 50-60% обеспечивается при суммарной встречной скорости вращения роторов около 100 м/с.

Базой для оценки эффективности активатора служит выход фракции 0,08 мм, получаемой при размоле

Таблица 8. Смесы с доломитовым вяжущим после активации

Компоненты смеси, кг/м <sup>3</sup>			Растекаемость, см	Предельное напряжение сдвига, Па	Прочность, МПа			
доломит	заполнитель	вода			Возраст, суток			
						14	28	90
Шаровая мельница (тонкость 40%)								
40	1620	350	19,6	114	0,26	0,31	0,51	
80	1590	350	22,1	119	0,32	0,43	0,65	
120	1540	350	23,2	98	0,73	0,87	1,05	
180	1480	350	20,1	120	1,20	1,35	1,51	
Дезинтегратор (тонкость 40%)								
40	1600	350	18,4	106	0,30	0,45	0,63	
80	1590	350	19,7	122	0,56	0,73	0,82	
120	1540	350	18,9	97	0,88	1,02	1,26	
180	1480	350	20,1	103	1,33	1,47	1,64	

хвостового материала такого же состава в шаровой мельнице.

Активность доломита может быть увеличена повторной переработкой в дезинтеграторе (табл. 9).

Таблица 9. Крупность доломитов после дезинтегратора

Серия	Остаток на сите в %, мм										Крупность в %, мм	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	
	2,5	1,6	1,0	0,6	0,4	0,315	0,20	0,16	0,1	0,08			0,1
1	0,4	0,5	1,2	2,4	4,0	4,97	10,5	7,50	14	49,5	40,5	123,2	99,0
2	0,6	1,0	1,3	4,0	7,5	6,23	12,0	8,9	13	47,3	48,8	120,6	79,8
3	1,0	1,5	3,0	5,3	6,2	8,48	14,2	6,84	15	38,7	59,9	119,6	69,6
4	0,2	0,6	1,0	5,7	9,7	9,40	15,3	6,72	15	39,9	47,0	111,5	75,6
5	1,0	1,5	2,3	3,2	3,3	6,90	14,7	9,74	17	36,2	49,9	115,3	79,2
6	0,5	1,0	1,5	2,4	4,5	8,13	13,2	8,40	15	40,1	49,5	124,5	70,8
ср.	1,0	1,0	2,0	3,8	3,7	6,10	17,5	7,46	15	43,1	44,8	112,4	97,1

Выход активных мелких фракций доломита после вторичной переработки увеличился на 10%. Дальнейшей переработкой в дезинтеграторе возможно получение суммы мелких фракций, близких к 100% от переработанной массы, что имеет значение для повышения прочности смесей с вяжущим из доломита.

#### Выводы:

1. Из отходов доломитов силами горного предприятия возможно получение вяжущего вещества, сравнимого по свойствам с товарным цементом, что позволяет использовать экологически корректные технологии добычи руд.

2. Смесы на основе доломитов и хвостов обогащения по прочности только на 8-22% уступают смесям со стандартным цементом и пригодны для строительства в горных выработках.

3. Активация отходов увеличивает прочность закладочной смеси на 15-20% по сравнению с базовой технологией.

4. При дополнительной подготовке в активаторах возможно принципиальное изменение качества продукции из доломитов с получение мелких активных фракций, что радикально изменяет извлекаемую ценность доломитов и другого сырья.