

УДК 622.257.1

В.А. Хямляйнен, М.А. Баёв

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТАМПОНАЖНЫХ РАСТВОРОВ И ПАРАМЕТРЫ ТЕХНОЛОГИИ ЦЕМЕНТАЦИИ *

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований реологических свойств тампонажных растворов с добавлением отходов углеобогащения. Особое внимание уделено изучению влияния добавки жидкого стекла на вязкость таких растворов. Приведены результаты исследования свойств тампонажных камней, полученных из растворов с минеральными и химическими добавками.

Ключевые слова: тампонаж, реологические свойства, вязкость, прочность, цемент, зола, водоугольное топливо.

В практике строительства и поддержания капитальных горных выработок угольных шахт в сложных горно-геологических и гидрогеологических условиях нашел достаточно широкое применение тампонаж горных пород растворами на основе вяжущего в виде цемента [1]. Многочисленные попытки замены цемента на высокопроникающие химические растворы показали их высокую стоимость, что обусловило область их применения только в малограничающихся и тонкотрешиноватых породах. Поэтому весьма актуальна задача дальнейшего снижения стоимости тампонажного раствора на основе цемента путем частичной его замены на отходы углеобогащения.

В качестве таких отходов может быть использована зола гидроотвалов или зола сжигания водоугольного топлива [2]. Целесообразность ее применения – получение раствора с необходимыми свойствами, экономия цемента, более полная утилизация отходов про-

изводства (сжигание отходов углеобогащения и использование продуктов сжигания – золы).

Введение золы в состав раствора оказывает влияние на реологические свойства раствора, физико-механические и фильтрационные свойства цементного камня и, как следствие, на параметры формирования цементационных завес. Для оценки этого влияния были проведены экспериментальные исследования реологических свойств тампонажных растворов и прочностных характеристик затвердевшего камня, а также выполнены численные расчеты радиуса цементации в трещиноватом горном массиве.

При исследовании реологических свойств за основу была принята разработанная нами методика экспериментальных исследований и учтены отдельные результаты предварительных измерений [3].

При этом экспериментальные исследования реологических характеристик проводили на ротационном вискозиметре Brookfield модели LVDV-II+Pro.

*Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП Минобрнауки «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», Соглашение №14.В37.21.0581 от 20.08.2012 г.

В опытах использовали адаптер для малых образцов SSA (измерительная система типа коаксиальных цилиндров – шпиндель SC4-18 (биконический), камера для образцов с температурным датчиком RTD SC4-13RPY).

Цементационные растворы приготавливали с использованием портландцемента ПЦ400 ГОСТ 31108-2003 Топкинского цементного завода. Испытывали растворы с водотвердым отношением T:B=1:1. В качестве активных добавок-наполнителей использовали сухую золу-уноса (г.Иркутск, ТЭЦ-9, участок 1, Ad=99,4 %, 21.01.2013г.) и золу гидроотвала (г. Иркутск, Ad=99,9 %, 21.01.2013 г.), а также золу сжигания водоугольного топлива из промпродукта (г. Междуреченск, ДКВР-10-13, 26.11.2012 г.). Отношение количества золы к количеству цемента (по массе) принимали равным 0 % (без золы), 20 %, 50 %, 80 % и 100 % (без цемента). Также исследовали растворы с добавками хлористого кальция (CaCl_2) и жидкого стекла ($\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{nSiO}_2$). Хлористый кальций, растворенный в воде, и жидкое стекло добавляли в воду перед засыпкой цемента и перемешиванием раствора. Количество добавок принимали в соответствии с существующими рекомендациями: хлористый кальций – 3 % массы цемента в пересчете на сухое вещество; жидкое стекло – 5 % массы цемента. Растворы для испытаний приготавливали на водопроводной питьевой воде. Продолжительность перемешивания раствора, принятая на основании опытных замесов, равнялась 1 мин. Температура во всех опытах фиксировалась температурным датчиком вискозиметра.

При исследовании свойств тампонажных камней, за основу была принята методика определения прочности цементного камня по ГОСТ 30744-2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного

песка». Для определения прочности образцов из растворов заливались кубики размерами 70x70x70 мм. Кубики извлекались из форм через 5 сут, и оставшееся время хранились в помещении с температурой $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ и относительной влажностью $(65 \pm 10) \%$. Испытание образцов на прочность осуществляли в возрасте 28 сут путем раздавливания кубиков на прессе.

Результаты экспериментальной оценки влияния золы на реологические свойства тампонажного раствора приведены на рис. 1.

Эксперименты показали, что для растворов с концентрацией сухой золы-уноса от 0 до 50 % (рис. 1, кривые 2, 3) реологические характеристики определяются главным образом цементом – значения эффективной вязкости этих растворов практически совпадают. Однако растворы с концентрацией золы 80 % и более приобретают псевдопластичный характер течения и имеют в несколько раз большие значения коэффициента эффективной вязкости, что свидетельствует о значительном влиянии золы на реологическое поведение растворов данного состава. На графике видно, что зола гидроотвала уменьшает эффективную вязкость раствора, как бы «разжижая» его (рис. 1, кривые 4, 5). Такое влияние обусловлено высокой влажностью золы (20-30 % от массы). Наибольшее влияние на реологические свойства растворов оказывает зола сжигания водоугольного топлива, приготовленного из промпродукта (рис. 1, кривые 6, 7). Общая закономерность для таких растворов – резкое возрастание эффективной вязкости (рис. 1, кривая 6). Из-за этой особенности данной золы эксперименты для концентраций 50 % и более проводили с растворами с T:B=1:2. Следует отметить, что у раствора с концентрацией золы 50 % (рис. 1, кривая 7) наблюдается отлич-

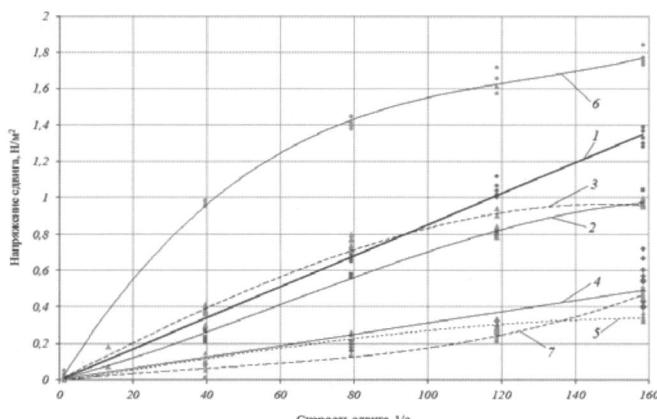


Рис. 1. Зависимость напряжения сдвига τ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ для раствора концентрации $T:B=1:1$ при различном количестве золы: 1 – без золы; 2 – 20 % сухой золы-уноса; 3 – 50 % сухой золы-уноса; 4 – 20 % золы гидроотвала; 5 – 50 % золы гидроотвала; 6 – 20 % золы сжигания водоугольного топлива из промпродукта; 7 – 50 % золы сжигания водоугольного топлива из промпродукта ($T:B=1:2$).

ный от остальных дилатантный характер течения – рост вязкости при увеличении скорости сдвига.

Результаты экспериментальной оценки влияния добавок хлористого кальция и жидкого стекла на реологические свойства тампонажного раствора на основе цемента приведены на рис. 2.

Из графиков видно, что для раствора без добавок (рис. 2, кривая 1) зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига близка к линейной. Добавка хлористого кальция незначительно влияет на величину вязкости, однако у такого раствора проявляется дилатантный характер течения (рис. 2, кривая 3). Раствор с добавкой жидкого стекла имеет выраженные псевдопластичные свойства (рис. 2, кривая 2) и гораздо более высокое значение коэффициента эффективной вязкости. При скорости сдвига выше $39,6 \text{ c}^{-1}$ измерить вязкость данного раствораказалось технически невозможно (данной измерительной системой при данных условиях) и на графике аппроксимирующая кривая в этом диапазоне показана тонкой пунктирной линией. Как видно из графиков

(рис. 2, кривые 4, 5) жидкое стекло слабо реагирует с сухой золой-уноса и реологические свойства растворов с концентрацией золы 50 % и более практически не отличаются от свойств этих же растворов без добавки жидкого стекла и близки со свойствами «чистого» цементного раствора. Зола гидроотвала так же слабо реагирует с жидким стеклом (рис. 2, кривые 6, 7). Его добавление в растворы с концентрацией золы 50 % и более приводит к незначительному увеличению вязкости в сравнении с теми же растворами без жидкого стекла. При этом значения коэффициента эффективной вязкости остаются ниже аналогичных значений для растворов на основе цемента без добавок.

Одним из основных параметров формирования цементационной завесы является размер зоны цементации, определяемый радиусом распространения раствора от скважины. В работе [1] получено выражение для определения предельного радиуса цементации для нестабильных растворов в зависимости от их вязкости. На основе представленных выше результатов выполнены численные расчеты радиуса цементации тампонажными растворами на основе цемента с различными добавками в трещиноватом горном массиве. Результаты расчета представлены в табл. 1.

Полученные данные свидетельствуют о целесообразности применения растворов без добавки жидкого стекла при тампонаже массива горных пород с относительно небольшим раскрытием трещин, что связано с достаточной проникающей способностью таких растворов. Растворы с добавкой жидкого стекла напротив – следует использовать при большом раскрытии трещин или,

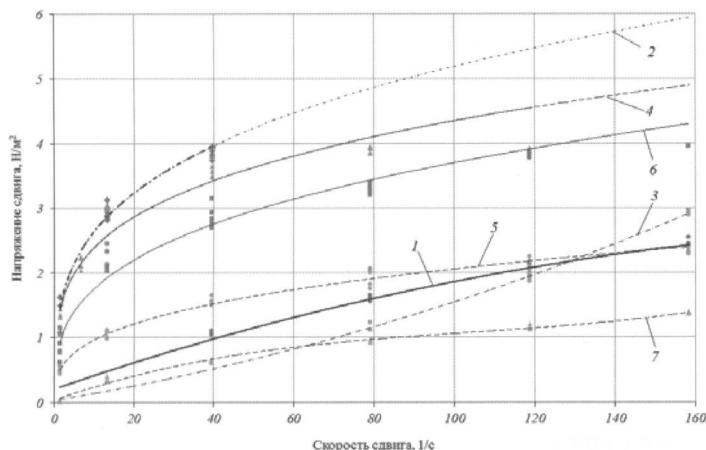


Рис. 2. Зависимость напряжения сдвига τ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ для раствора концентрации $T:B=1:1$ с различными добавками:

1 – без добавок; 2 – 5 % жидкого стекла (без золы); 3 – 3 % CaCl_2 (без золы); 4 – 20 % сухой золы-уноса + 5 % жидкого стекла; 5 – 50 % сухой золы-уноса + 5 % жидкого стекла; 6 – 20 % золы гидроотвала + 5 % жидкого стекла; 7 – 50 % золы гидроотвала + 5 % жидкого стекла

например, для ограничения зоны тампонирования.

Известно, что прочность горных пород в массиве в 1,5–2 раза ниже, чем в образце [1]. Для условий Кузбасса прочность горных пород в зонах геологических нарушений в 2–5 раз ниже, чем вне их. Учитывая эти данные и результаты наших экспериментов можно сделать вывод о возможности применения тампонажных растворов с различными добавками в цементации трещиноватого породного массива.

Результаты испытаний позволяют сделать следующие обобщения.

Для раствора без добавок зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига близка к линейной. Добавка хлористого кальция незначительно влияет на величину вязкости. Раствор с добавкой жидкого стекла имеет выраженные псевдопластичные свойства. Введение в тампонажные растворы на основе цемента золы сжигания отходов углеобогащения оказывает различное влияние на его реологические свойства. Основными факторами при этом являются тип

и количество добавляемой золы. Максимальный эффект оказывает зола сжигания водоугольного топлива. Наименьшее влияние на реологические свойства оказывает сухая зола-уноса. Жидкое стекло увеличивает вязкость растворов, причем степень влияния различна и зависит от вида и количества добавленной золы.

Добавление золы в тампонажный раствор приводит к снижению прочности цементного камня, полученного из такого раствора. Помимо этого сухая зола-уноса увеличивает выход тампонажного камня. Добавка хлористого кальция к цементному раствору без золы увеличивает прочность на 30 %. С увеличением содержания золы эффект снижается. Добавка жидкого стекла наиболее эффективно действует на повышение стабильности растворов. Но при этом происходит значительное снижение прочности тампонажного камня.

Результаты исследования свойств тампонажных камней с золошлаковыми отходами, приведены в табл. 2.

В целом, результаты выполненных исследований реологических характеристик и прочности тампонажного камня растворов с добавлением сухой золы уноса, золы гидроотвала и золы сжигания водоугольного топлива с введением химических добавок в виде жидкого стекла и хлористого кальция показывают, что такие растворы удовлетворяют требованиям, предъявляемым к тампонажным растворам. Учитывая также экономичность замены цемента золой можно сделать вывод о перспективности применения таких растворов.

Таблица 1

Результаты вычислений радиуса цементации в трещиноватом породном массиве

Таблица 2

Характеристика тампонажных растворов с различными добавками

№ опыта	T:B	Состав раствора, %				Плотность раствора, кг/м ³	Выход камня, %	Предел прочности образца при сжатии в возрасте 28 сут, МПа
		Цемент	Зола	CaCl ₂	Жидкое стекло			
Портландцемент без золы								
1.	1:1	100	-	-	-	1629	80	7,18
2.	1:1	100	-	3	-	-	-	9,19
3.	1:1	100	-	-	5	-	96	2,43
С добавкой сухой золы-уноса								
4.	1:1	80	20	-	-	1433	86	5,84
5.	1:1	50	50	-	-	1378	87	3,54
6.	1:1	80	20	3	-	-	-	8,49
7.	1:1	50	50	3	-	-	-	3,18
8.	1:1	80	20	-	5	-	97	2,10
9.	1:1	50	50	-	5	-	96	1,43
С добавкой золы гидроотвала								
10.	1:1	80	20	-	-	1465	64	3,55
11.	1:1	50	50	-	-	1413	70	3,13
12.	1:1	80	20	3	-	-	-	7,74
13.	1:1	50	50	3	-	-	-	4,32
14.	1:1	80	20	-	5	-	93	1,74
15.	1:1	50	50	-	5	-	90	1,10
С добавкой золы сжигания водоугольного топлива из промпродукта								
16.	1:1	50	50	-	-	1378	79	2,94

При этом особое внимание следует обратить на перспективность безотходной технологии приготовления и сжигания водоугольного топлива из отхо-

дов углеобогащения с последующим использованием отходов сжигания при приготовлении тампонажных растворов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хямляйнен, В.А. Формирование цементационных завес вокруг капитальных горных выработок / В.А. Хямляйнен, Ю.В. Бурков, П.С. Сыркин. – М.: Недра, 1994. – 400 с.
2. Мурко, В.И. Физико-технические основы водоугольного топлива / В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.А. Хямляйнен; под общ. Ред. В И Мурко; РАЕН; ГУ КузГТУ. – Кемерово: Кузбассвязьздат, 2009. – 195 с.
3. Влияние золы сжигания отходов углеобогащения на реологические свойства тампонажных растворов / М.А. Баёв, К.Г. Дятлов, А.Г. Шевцов, В.А. Хямляйнен // Сборник материалов V Всероссийской, 58 научно-практической конференции молодых ученых «РОССИЯ МОЛОДАЯ», 16-19 апреля 2013 г. В 2 т. Т. 1 / Редкол.: В.Ю. Блюменштейн (отв. редактор) [и др.]. – Кемерово: КузГТУ, 2013. – С. 96-99. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Хямляйнен Вениамин Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой теоретической и геотехнической механики, **Баёв Михаил Алексеевич** – ассистент кафедры теоретической и геотехнической механики

e-mail bma.gdk@gmail.com

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачёва.

ESTIMATION OF INFLUENCE OF WASTE COAL ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF PLUGGING SOLUTIONS AND TECHNOLOGY PARAMETERS CEMENTATION

Khyamalyaynen V A., Doctor of Technical Sciences, Professor, E-mail: vah@kuzstu.ru
Bayov M A, Assistant, e-mail: bma_gdk@gmail.com
T F Gorbachev Kuzbass State Technical University

The results of experimental studies of the rheological properties of cement slurries with the addition of waste coal. Special attention is paid to the effect of additives on the viscosity of the liquid glass such solutions. The results of studying the properties of cement stones obtained from solutions with mineral and chemical additives.

Key words: plugging, rheological properties, viscosity, strength, cement, ash, hydrocarbon fuel

REFERENCES

1. Khyamalyaynen V A, Burkov Yu V, Syrkin P S *Formirovanie tsementatsionnykh zaves vokrug kapi-tal'nykh gornykh vyrobok* (Formation of cement-grout curtains around permanent roadways) Moscow, Nedra, 1994 400 p
2. Murko V I, Fedyaev V.I., Khyamalyaynen V A *Fiziko-tehnicheskie osnovy vodougol'nogo topliva* (Physico-technical basics of coal-water fuel) pod obshch Red. VI Murko, RAEN, GU KuzGTU Kemerovo Kuzbassvuzizdat, 2009 195 p
3. Baev M A, Dyatlov K G, Shevtsov A G, Khyamalyaynen V A *Vliyanie zoly szhiganiya otkhodov ugleobogashcheniya na reologicheskie svoistva tamponazhnykh rastvorov* (Influence of waste coal burning ash on rheological properties of grouting mortar). Sbornik materialov V Vserossiiskoi, 58 nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh «ROSSIYa MOLODAYa», 16-19 aprelya 2013 g V 2 t T 1 Kemerovo KuzGTU, 2013 P 96-99

