

УДК 622.257.1

В.А. Хямляйнен, М.А. Баёв

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТАМПОНАЖНЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ ЦЕМЕНТА И ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ

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 малопроницаемых и тонкотрециноватых породах. Вместе с тем весьма актуальна задача и 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 во- доугольного топлива [2]. Целесообразность ее применения – получение раствора с необходимыми свойствами, экономия цемента, более полная утилизация отходов производства (сжигание отходов углеобогащения и использование продуктов сжигания – золы).

Введение золы в состав раствора оказывает влияние на свойства раствора и физико-механические и фильтрационные свойства цементного камня и, как следствие, на эффективность тампонажных работ.

Ниже приведены результаты экспериментальных исследований влияния зол сжигания отходов углеобогащения на физико-механические свойства тампонажных растворов.

Под физико-механическими свойствами в дальнейшем изложении понимаются реологические свойства непосредственно приготовленного тампонажного раствора и прочностные характеристики затвердевшего камня.

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, который предназначен для измерения вязкости жидкостей при заданных скоростях сдвига и проведения реологических исследований неньютоновских систем. 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, объем образца 8 мл).

Цементационные растворы приготавливали с использованием портландцемента ПЦ400 ГОСТ 31108-2003 Топкинского цементного завода. Испытывали растворы с водотвердым отношением Т:В=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%, 21.01.2013г.), а также золу сжигания водоугольного топлива из промпродукта (г. Междуреченск, ДКВР-10-13, 26.11.2012г.). 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 ($\text{Na}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2$).

Хлористый кальций, растворенный в воде, и жидкое стекло добавляли в воду перед засыпкой

Таблица 1. Реологические свойства тампонажных растворов на основе цемента с добавлением сухой золы-уноса

Состав раствора, %		T:B	Коэффициент эффективной вязкости $\eta_{\text{эфф}} \cdot 10^3$, Па·с, при скорости сдвига $\dot{\gamma}$, 1/с					
Цемент	Зола		1,32	13,2	39,6	79,2	118,8	158,4
100	—	1:1	0	-	7,59	8,59	8,82	8,72
80	20	1:1	0	-	6,12	7,26	6,73	6,16
50	50	1:1	0	8,19	9,26	9,59	7,76	6,01
20	80	1:1	0	-	27,12	21,51	17,42	13,35
—	100	1:1	0	43,01	32,17	21,27	14,03	11,95

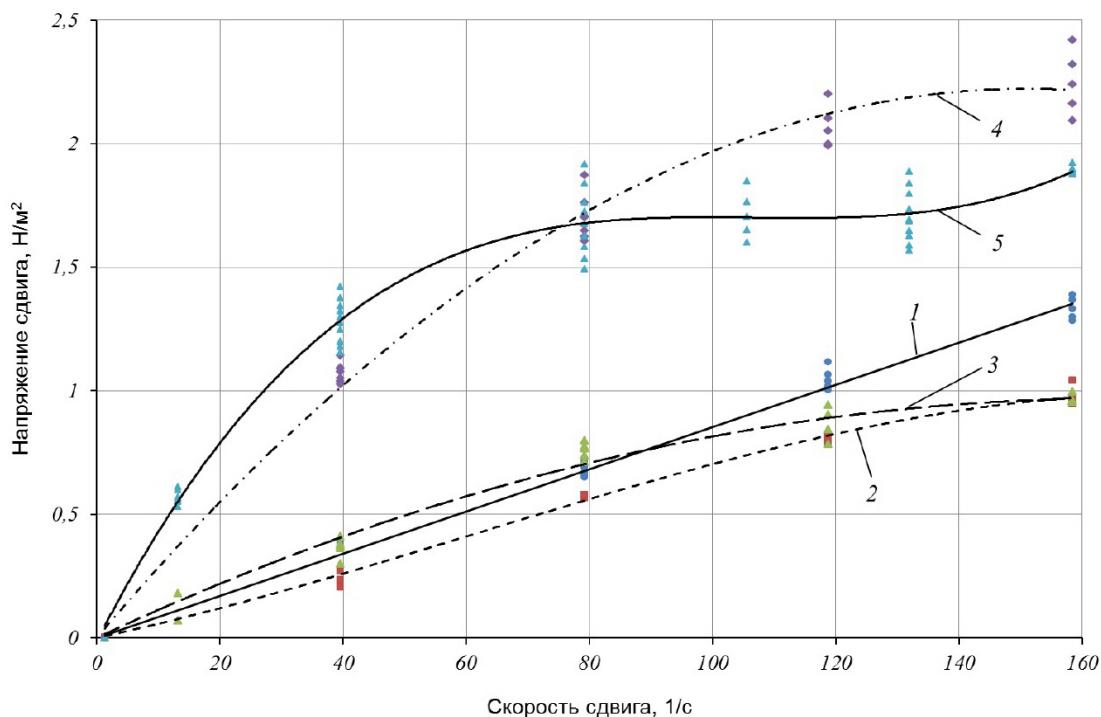


Рис. 1. Зависимость напряжения сдвига τ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ для раствора концентрации $T:B=1:1$ при различном количестве сухой золы-уноса: 1 – без золы; 2 – 20%; 3 – 50%; 4 – 80%; 5 – 100% (без цемента)

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.

После приготовления растворов определяли их реологические характеристики: напряжение сдвига τ и коэффициент эффективной вязкости $\eta_{\text{эфф}}$. По полученным данным строили зависимости напряжения сдвига τ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ для растворов различного состава.

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 сухой золы-уноса на реологические свойства тампонажного раствора приведены на рис. 1 и в табл. 1.

Таблица 2. Реологические свойства тампонажных растворов на основе цемента с добавлением золы гидроотвала

Состав раствора, %		T:B	Коэффициент эффективной вязкости $\eta_{\text{эфф}} \cdot 10^3$, Па·с, при скорости сдвига $\dot{\gamma}$, 1/с					
Цемент	Зола		1,32	13,2	39,6	79,2	118,8	158,4
100	–	1:1	0	-	7,59	8,59	8,82	8,72
80	20	1:1	0	-	2,09	2,37	2,35	2,72
50	50	1:1	0	-	2,49	2,94	2,48	2,13
20	80	1:1	0	-	5,22	2,19	2,39	2,23

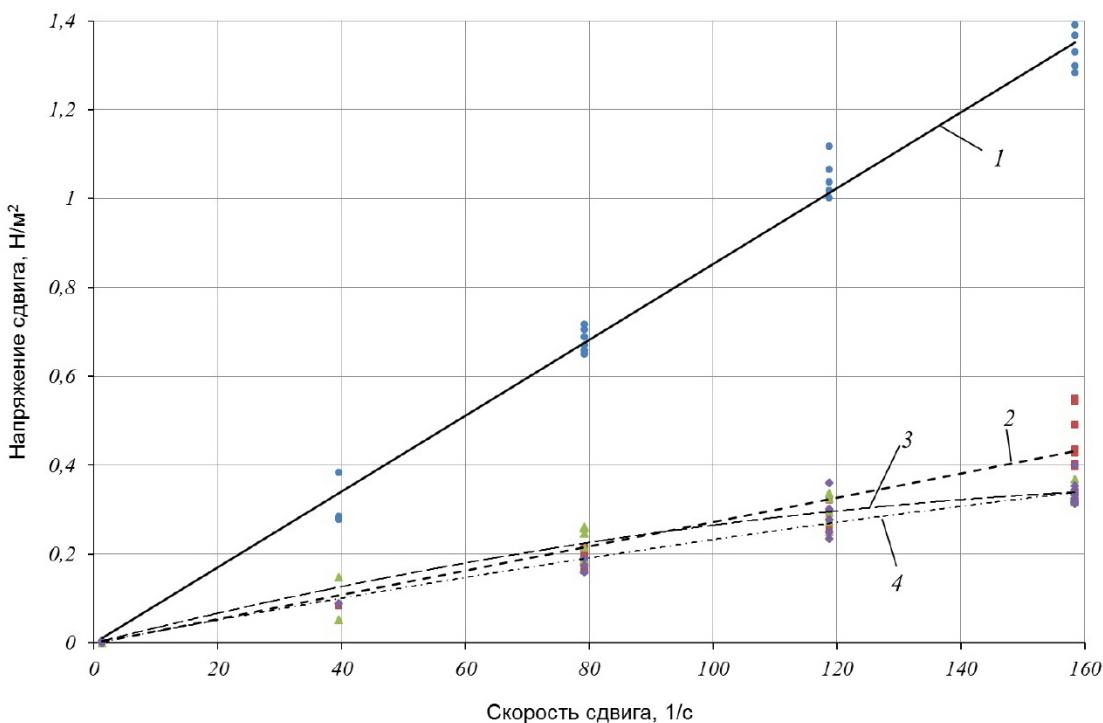


Рис. 2. Зависимость напряжения сдвига τ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ для раствора концентрации $T:B=1:1$ при различном количестве золы гидроотвала: 1 – без золы; 2 – 20 %; 3 – 50 %; 4 – 80 %

Из графиков видно, что для растворов с концентрацией сухой золы-уноса от 0 до 50 % (рис. 1, кривые 1-3) реологические характеристики определяются главным образом цементом – значения эффективной вязкости этих растворов практически совпадают. Однако растворы с концентрацией золы 80 % и более (рис. 1, кривые 4, 5) 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.

Аналогичные экспериментальные исследования выполнены для цементных растворов с добавкой золы гидроотвала.

Результаты экспериментов приведены на рис.

2 и в табл. 2. При этом для лучшего сопоставления и оценки влияния добавки в виде золы приведены также результаты эксперимента для растворов без добавок в виде реологической кривой, взятой из рис. 1.

На графике видно, что зола гидроотвала уменьшает эффективную вязкость раствора, как бы «разжижая» его. Такое влияние обусловлено высокой влажностью золы (20-30 % от массы).

Результаты экспериментальной оценки влияния золы сжигания водоугольного топлива на реологические свойства тампонажного раствора приведены на рис. 3 и в табл. 3.

Наибольшее влияние на реологические свойства растворов оказывает зола сжигания водоугольного топлива, приготовленного из промпродукта (рис. 3, кривые 2-5). Общая закономерность

Таблица 3. Реологические свойства тампонажных растворов на основе цемента с добавлением золы сжигания водоугольного топлива из промпродукта

Состав раствора, %		T:B	Коэффициент эффективной вязкости $\eta_{\phi} \cdot 10^3$, Па·с, при скорости сдвига $\dot{\gamma}$, 1/с					
Цемент	Зола		1,32	13,2	39,6	79,2	118,8	158,4
100	–	1:1	0	-	7,59	8,59	8,82	8,72
80	20	1:1	17,99	-	24,44	17,84	13,78	11,15
50	50	1:2	0	-	1,49	1,65	2,02	2,94
20	80	1:2	0	-	8,73	7,95	6,74	5,88
–	100	1:2	0	-	20,79	15,69	11,96	9,42

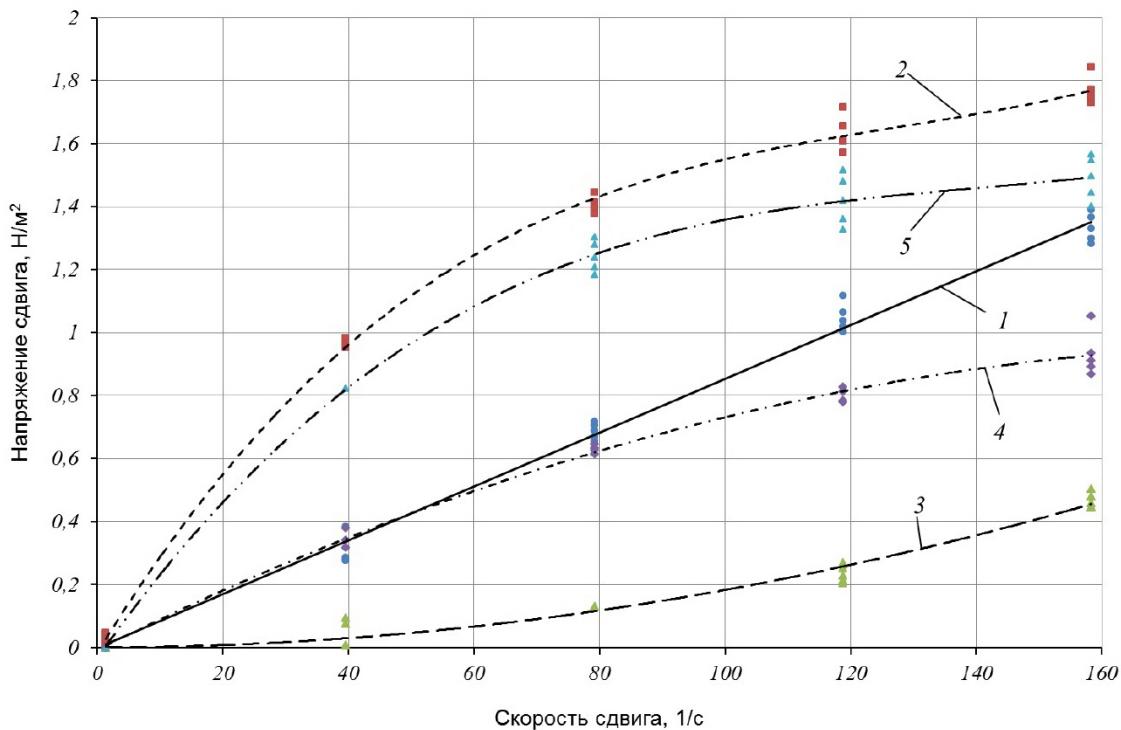


Рис. 3. Зависимость напряжения сдвига τ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ для раствора концентрации $T:B=1:1$ (1), $2)$ и $T:B=1:2$ (3-5) при различном количестве золы сжижания водоугольного топлива из промпродукта: 1 – без золы; 2 – 20%; 3 – 50%; 4 – 80%; 5 – 100% (без цемента)

для таких растворов – резкое возрастание эффективной вязкости (рис. 3, кривая 2). Из-за этой особенности данной золы эксперименты для концентраций 50 % и более проводили с растворами с $T:B=1:2$, т.к. при $T:B=1:1$ вязкость достигает 400 мПа·с и более, вплоть до 30000 мПа·с. Следует

отметить, что у раствора с концентрацией золы 50 % (рис. 3, кривая 3) наблюдается отличный от остальных дилатантный характер течения – рост вязкости при увеличении скорости сдвига.

Результаты экспериментальной оценки влияния добавок хлористого кальция и жидкого стекла

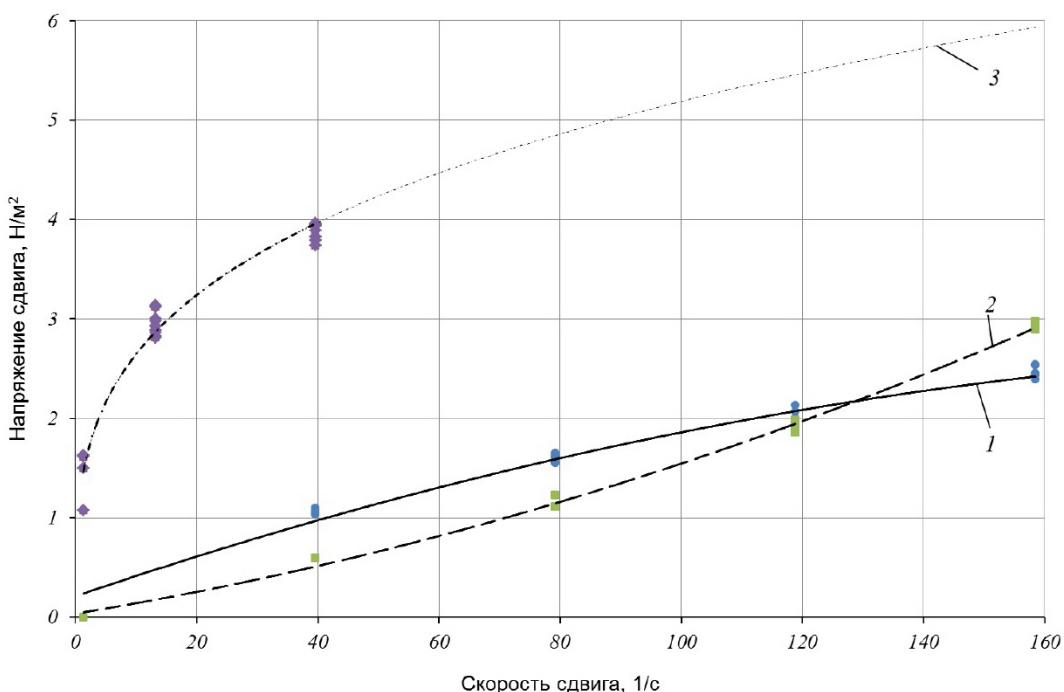


Рис. 4. Зависимость напряжения сдвига τ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ для раствора концентрации $T:B=1:1$ при различных добавках: 1 – без добавок; 2 – 3% $CaCl_2$; 3 – 5% жидкого стекла

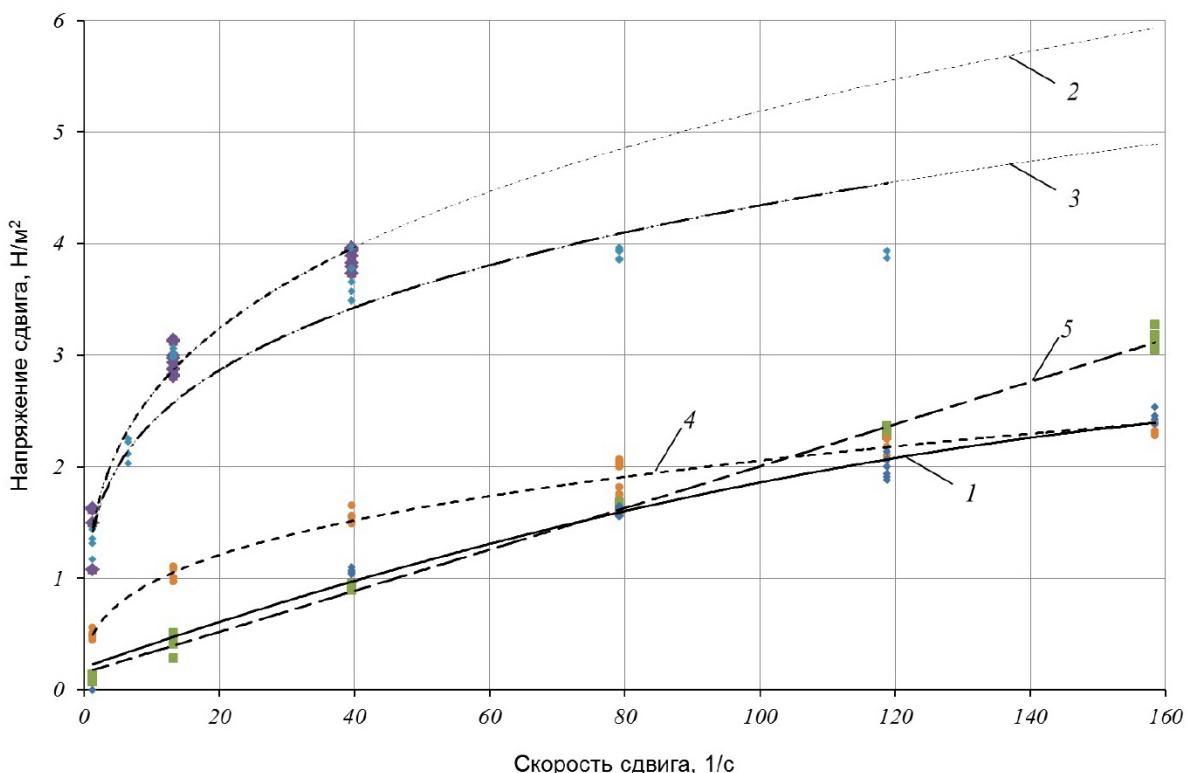


Рис. 5. Зависимость напряжения сдвига τ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ для раствора концентрации $T:B=1:1$ при различном количестве сухой золы-уноса и добавки жидкого стекла: 1 — без добавок; 2 — 5 % жидкого стекла (без золы); 3 — 20 % золы + 5 % жидкого стекла; 4 — 50 % золы + 5 % жидкого стекла; 5 — 100 % золы + 5 % жидкого стекла (без цемента)

на реологические свойства тампонажного раствора на основе цемента приведены на рис. 4 и в табл. 4.

Из графиков видно, что для раствора без добавок (рис. 4, 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. 4, кривая 2).

Раствор с добавкой жидкого стекла имеет выраженные псевдопластичные свойства (рис. 4, кривая 3) и гораздо более высокое значение коэффициента эффективной вязкости. При скорости сдвига выше $39,6 \text{ с}^{-1}$ измерить вязкость данного

раствора оказалось технически невозможно (данной измерительной системой при данных условиях) и на графике аппроксимирующая кривая в этом диапазоне показана тонкой пунктирной линией.

Аналогичные экспериментальные исследования выполнены для цементных растворов с добавкой жидкого стекла. Результаты экспериментов приведены на рис. 5 и в табл. 5. При этом приведены также результаты эксперимента для растворов без добавок и с добавлением 5 % жидкого стекла в виде реологических кривых, взятых из рис. 4.

Как было показано ранее, добавление жидкого стекла к цементному раствору приводит к возрас-

Таблица 4. Реологические свойства тампонажных растворов на основе цемента

Состав раствора		Коэффициент эффективной вязкости $\eta_{\text{эфф}} \cdot 10^3$, Па·с, при скорости сдвига $\dot{\gamma}$, $1/\text{с}$					
Ц:В	Добавка, % массы цемента	1,32	13,2	39,6	79,2	118,8	158,4
1:1	—	175,46	54,21	26,73	20,16	16,74	15,59
1:1	3 % CaCl_2	38,22	13,39	14,99	15,49	16,07	19,09
1:1	5 % жидкого стекла	1102,26	246,77	96,99	-	-	-

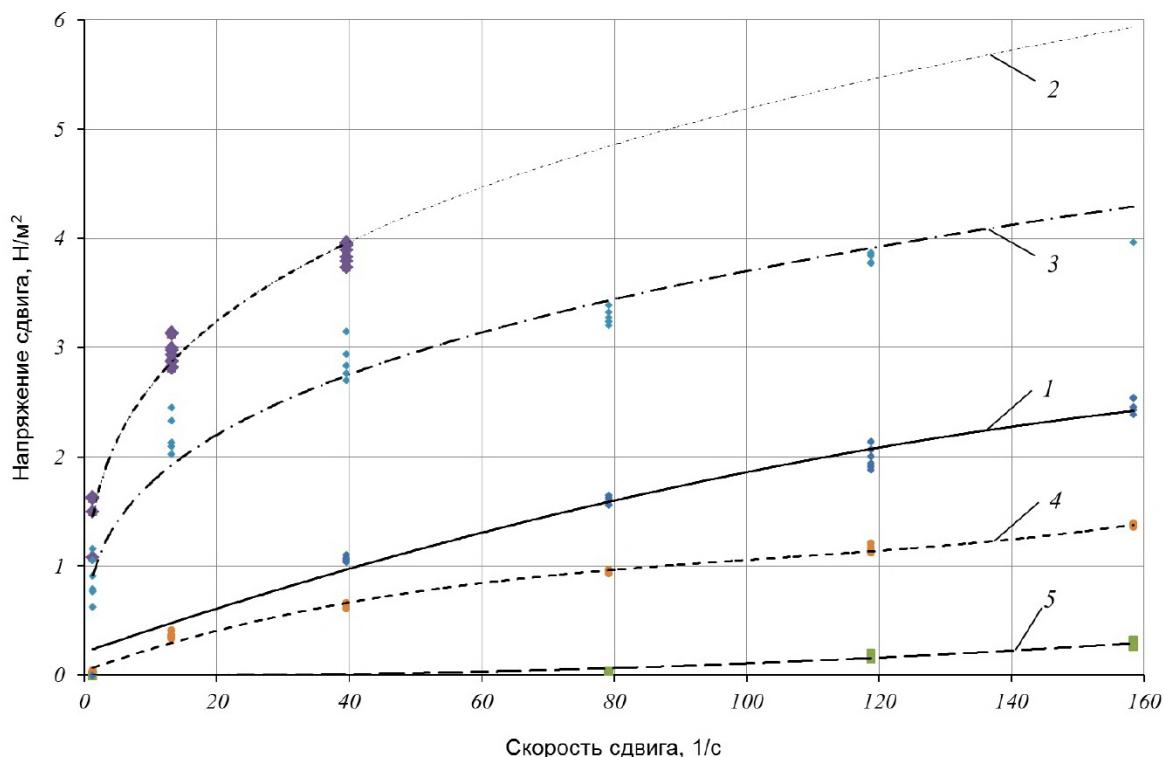


Рис. 6. Зависимость напряжения сдвига τ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ для раствора концентрации $T:B=1:1$ при различном количестве золы гидроотвала и добавки жидкого стекла: 1 — без добавок; 2 — 5 % жидкого стекла (без золы); 3 — 20 % золы + 5 % жидкого стекла; 4 — 50 % золы + 5 % жидкого стекла; 5 — 100 % золы + 5 % жидкого стекла (без цемента)

танию его эффективной вязкости и проявлению псевдопластичного характера течения (рис. 5, кривые 2, 3). Как видно из графиков (рис. 5, кривые 4, 5) жидкое стекло слабо реагирует с сухой золой-уносом 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.

Результаты экспериментальной оценки влияния золы гидроотвала с добавкой жидкого стекла на реологические свойства тампонажного раствора приведены на рис. 6 и в табл. 6.

Зола гидроотвала так же слабо реагирует с жидким стеклом (рис. 6, кривые 4, 5). 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.

Результаты исследования свойств тампонажных камней с золошлаковыми отходами, приведены в табл. 7.

Результаты испытаний позволяют сделать следующие обобщения.

Для раствора без добавок зависимость напря-

жения сдвига от скорости сдвига близка к линейной. Добавка хлористого кальция незначительно влияет на величину вязкости, однако у такого раствора наблюдается рост вязкости при увеличении скорости сдвига. Раствор с добавкой жидкого стекла имеет выраженные псевдопластичные свойства и гораздо более высокое значение коэффициента эффективной вязкости.

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, добавка которой приводит к резкому возрастанию эффективной вязкости и значительному отличию характера течения такого раствора от характера течения раствора без добавок.

Так раствор с концентрацией золы 20 % с $T:B=1:1$ при скорости сдвига 39,6 с^{-1} имеет значение коэффициента эффективной вязкости в три раза выше, чем у раствора без добавки. Зола гидроотвала наоборот — даже при высоких концентрациях уменьшает вязкость растворов. Наименьшее влияние на реологические свойства оказывает сухая зола-унос. Раствор с концентрацией сухой золы до 50 % практически не отличается по сво-

Таблица 5. Реологические свойства тампонажных растворов на основе цемента с добавлением сухой золы-уноса и жидкого стекла

Состав раствора, %		Т:В	Коэффициент эффективной вязкости $\eta_{\phi} \cdot 10^3$, Па·с, при скорости сдвига $\dot{\gamma}$, 1/с					
			1,32	13,2	39,6	79,2	118,8	158,4
100	—	1:1	175,46	54,21	26,73	20,16	16,74	15,59
100	5 % жидк. ст.	1:1	1102,26	246,77	96,99	-	-	-
80	20 % золы + 5 % жидк. ст.	1:1	998,79	228,65	92,35	49,42	32,84	-
50	50% золы + 5 % жидк. ст.	1:1	373,72	79,03	39,17	24,61	18,09	14,76
—	100 % золы + 5 % жидк. ст.	1:1	79,98	32,51	23,22	20,53	19,41	19,83

им характеристикам от чистого цементного раствора.

Жидкое стекло увеличивает вязкость растворов, причем степень влияния различна и зависит от вида и количества добавленной золы.

тампонажного камня, то есть повышает седиментационную устойчивость растворов.

Добавка хлористого кальция к цементному раствору без золы увеличивает прочность на 30 %. С увеличением содержания золы эффект снижается.

Таблица 6. Реологические свойства тампонажных растворов на основе цемента с добавлением золы гидроотвала и жидкого стекла

Состав раствора, %		Т:В	Коэффициент эффективной вязкости $\eta_{\phi} \cdot 10^3$, Па·с, при скорости сдвига $\dot{\gamma}$, 1/с					
Цемент	Добавка		1,32	13,2	39,6	79,2	118,8	158,4
100	—	1:1	175,46	54,21	26,73	20,16	16,74	15,59
100	5 % жидк. ст.	1:1	1102,26	246,77	96,99	-	-	-
80	20 % золы + 5 % жидк. ст.	1:1	666,86	166,82	72,61	41,46	32,22	24,99
50	50% золы + 5 % жидк. ст.	1:1	22,19	27,47	15,99	12,01	9,66	8,67
—	100 % золы + 5 % жидк. ст.	1:1	0	-	-	-	1,39	1,83

Общим для таких растворов является псевдопластичный характер течения. Жидкое стекло практически не реагирует с сухой золой-уносом и золой гидроотвала, поэтому вязкость таких растворов определяется количеством цемента. Реологические свойства растворов с концентрацией золы-уноса 50 % и более практически не отличаются от свойств этих же растворов без добавки жидкого стекла и близки со свойствами чистого цементного раствора.

Добавление золы в тампонажный раствор приводит к снижению прочности цементного камня, полученного из такого раствора. Так добавка 50 % сухой золы-уноса снижает прочность камня в 2 раза, так же как и добавка 20 % золы гидроотвала.

Такое влияние золы гидроотвала можно объяснить высоким содержанием влаги, что приводит к увеличению водоцементного отношения. Помимо этого сухая зола-уносом увеличивает выход

ся, однако камни из таких растворов имеют прочность выше, чем камни из таких же растворов без хлористого кальция..

Добавка жидкого стекла наиболее эффективно действует на повышение стабильности растворов. Но при этом происходит значительное снижение прочности тампонажного камня как по сравнению с образцами из раствора без добавок, так и с образцами из растворов с добавкой золы.

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 перспектив-

Таблица 7. 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	20	80	-	-	1328	91	1,20
7.	1:1	-	100	-	-	1360	83	0,06
8.	1:1	80	20	3	-	-	-	8,49
9.	1:1	50	50	3	-	-	-	3,18
10.	1:1	80	20	-	5	-	97	2,10
11.	1:1	50	50	-	5	-	96	1,43
С добавкой золы гидроотвала								
12.	1:1	80	20	-	-	1465	64	3,55
13.	1:1	50	50	-	-	1413	70	3,13
14.	1:1	20	80	-	-	1323	76	0,78
15.	1:1	-	100	-	-	1244	72	0,05
16.	1:1	80	20	3	-	-	-	7,74
17.	1:1	50	50	3	-	-	-	4,32
18.	1:1	80	20	-	5	-	93	1,74
19.	1:1	50	50	-	5	-	90	1,10
С добавкой золы сжигания водоугольного топлива из промпродукта								
20.	1:1	50	50	-	-	1378	79	2,94

ности применения таких растворов.

При этом особое внимание следует обратить на перспективность безотходной технологии приготовления и сжигания водоугольного топлива из отходов углеобогащения с последующим исполь-

зованием отходов сжигания при приготовлении тампонажных растворов.

Работа выполнена по гранту ФЦП Минобрнауки №14.B37.21.0581 от 20.08.2012г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Хямяляйнен, В.А. Формирование цементационных завес вокруг капитальных горных выработок / В.А. Хямяляйнен, Ю.В. Бурков, П.С. Сыркин. – М.: Недра, 1994. – 400 с.
- Мурко, В.И. Физико-технические основы водоугольного топлива / В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.А. Хямяляйнен; под общ. ред. В.И. Мурко; РАЕН; ГУ КузГТУ. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2009. – 195 с.
- Влияние золы сжигания отходов углеобогащения на реологические свойства тампонажных растворов / М.А. Баёв, К.Г. Дятлов, А.Г. Шевцов, В.А. Хямяляйнен // 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.

□ Авторы статьи

Хямяляйнен
Вениамин Анатольевич,
докт.техн.наук, профессор,
зав.каф.теоретической и геотех-
нической механики КузГТУ,
E-mail:
vah@kuzstu.ru

Баёв
Михаил Алексеевич,
ассистент каф. теорети-
ческой и геотехнической меха-
ники КузГТУ,
E-mail:
bma.gdk@gmail.com