

DOI: 10.26730/1999-4125-2018-4-56-64

УДК 622.455, 622.822.3, 624.136.6

## РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ЦЕМЕНТНЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

### RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SPECIALIZED CEMENT MIXTURES FOR INTEGRATED ISOLATION OF MINE WORKINGS

Нургалиев Евгений Илдарович<sup>1</sup>,  
горный инженер, e-mail: ugm\_kuz@mail.ru  
Eugene I. Nurgaliev<sup>1</sup>,  
Mining engineer

Майоров Александр Евгеньевич<sup>2</sup>,  
доктор технических наук, профессор РАН, e-mail: majorov-ae@mail.ru  
Alexander E. Mayorov<sup>2</sup>,  
Dr.Sc., RAS Professor

<sup>1</sup>Научно-производственная компания ООО «УГМ-Сервис», 650014, Россия, г. Кемерово, ул. Вахрушева, 10

<sup>1</sup>Scientific research and production company LLC "UGM-Service", 10, Vakhrushev street, Kemerovo, 650014, Russian Federation

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, 650065, Россия, г. Кемерово, пр. Ленинградский, 10

<sup>2</sup>The Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 28, Leningradskiy Avenue, Kemerovo, 650065, Russian Federation

**Аннотация:** Рассмотрены эффективные способы возведения изоляционных сооружений горных выработок угольных шахт в условиях нарушенных вмещающих пород. Наиболее перспективен комбинированный способ, основанный на технологическом совмещении возведения тела перемычки и тампонажной упрочняюще-уплотняющей завесы с качественным изменением физико-механических характеристик нарушенных пород и созданием несущих структурных связей с приконтурной зоной массива, что дает синергетический эффект повышения качества и скорости изоляции выработанного пространства. В статье представлен анализ реологических характеристик новых специализированных цементных смесей УГМ и УГМ-П, дана оценка их влияния на качество и эффективность технологии изоляции горных выработок системой «монолитная перемычка-тампонажная завеса», разрабатываемой и внедряемой в настоящее время на угольных шахтах Кузбасса. Обоснована эффективность консолидирующих изоляционных систем, конструктивно интегрированных в нарушенный вмещающий массив и управляющих его физико-механическим состоянием. Приведены результаты масштабных испытаний в течение 2012-2018 гг. Определяющим при выборе рациональных параметров технологии является учет типа реологических моделей течения, качественно влияющего на различающиеся режимы и процессы, учет нелинейной зависимости прочности образцов на одноосное сжатие и изгиб от водо-твердого соотношения смесей, основу которых составляет цемент ПЦ-500, твердые техногенные отходы ТЭЦ и металлургических предприятий Кузбасса.

**Ключевые слова:** цементные смеси, изоляция, перемычка, приконтурный массив, инъекция, тампонажная завеса, упрочнение, уплотнение.

**Abstract:** Efficient methods were reviewed for construction of isolating structures for underground coal mine workings in the conditions of broken enclosing rock. One of the promising methods is a combined method based on the technological combination of the construction of the stopping body and the consolidating and compacting grout curtain with changing of physical and mechanical properties of the broken rock and creation of

*structural bonds with border area of rock. This article presents the analysis of rheological properties of new specialized cement mixtures UGM and UGM-P. The evaluation is given of their influence on the quality and efficiency of the technology of coalmine isolation by the monolithic stopping – grout curtain system, which has been developed and applied in Kuzbass coalmines. The study gives justification of the efficiency of consolidating isolating systems, which have been constructively integrated in the destroyed enclosing rock strata and controlled its physical and mechanical state. The results of large-scale studies performed in the period from 2012 till 2018 are presented. In choosing rational parameters of the technology, it is important to take into consideration the type of rheological flow models which has a certain influence on different modes and processes, and the nonlinear dependence of uniaxial compression strength and bend strength on water-solid ratio of the grouts which is based on PC-500 cement, solid industrial waste of heat electric plants and metallurgical companies of Kuzbass.*

**Key words:** cement mixtures, isolation, stopping, border rock massif, injection, grout curtain, consolidation, compaction.

### **Актуальность работы (The urgency of the discussed issue):**

Как уже было отмечено в первой части исследований, качество и эффективность технологии изоляции горных выработок системой «монолитная перемычка – тампонажная завеса», разрабатываемой и внедряемой в настоящее время ООО «УГМ-Сервис» на шахтах Кузбасса, напрямую зависит от физических характеристик специализированных цементных смесей (ЦС), используемых в трех взаимодополняющих циклах: непрерывное наливное опалубочное возведение монолитного тела изоляционной перемычки без создания вруба; пропиточный тампонаж крупных трещин почвы и бортов, проходящий под влиянием давления высоты столба подвижной ЦС в наполняемой опалубке; инъекционный тампонаж, проходящий при нагнетании ЦС в приконтурную зону трещиноватых пород вокруг перемычки через веер шпуров. В свою очередь, указанные циклы накладывают уникальные ограничения на разрабатываемые составы в области их физико-механических и реологических параметров для решения общей научно-технической задачи эффективного управления физическим состоянием трещиноватых пород, способствуя их консолидации (упрочнению и уплотнению) и интеграции сооружения в прилегающую приконтурную зону массива [1-14].

Таким образом, определен основной объект исследований, выходящий за рамки данной статьи, – процессы фильтрации ЦС в трещиноватых породах вокруг изоляционной безврубовой перемычки при пропиточном и инъекционном тампонаже приконтурной зоны. Предметом исследований настоящей, второй части работы, являются реологические модели течения ЦС различного состава в зависимости от изменяемого водотвердого (В/Т) соотношения.

Практическая значимость исследования обусловлена необходимостью понимания условий изменения у созданных ЦС с заданными физико-механическими характеристиками реологических параметров, которые влияют на ограничение применения смесительно-нагнетательного оборудования, режимы нагнетания, дальность перекачива-

ния по нагнетательным шлангам, проникающую способность в трещины горных пород и размеры создаваемой тампонажной завесы вокруг изоляционного подземного сооружения.

### **Цель работы (The main aim of the study):**

Во второй части исследования, представленного в настоящей статье, основной целью является реологическое обоснование выбора состава ЦС, регламентирующего их применение при комплексной изоляции горной выработки системой «монолитная перемычка-тампонажная завеса».

### **Методы исследования (The methods used in the study):**

Учитывая ограничения в условиях импортозамещения и ведения конкурентной ценовой политики на рынке ЦС в Кузбассе, в качестве основного сырья состава ЦС приняты: портландцемент, твердые техногенные отходы ТЭЦ и металлургических предприятий Кузбасса. Используя предшествующий опыт, в том числе [1-17], и данные, полученные в первой части работы, составы ЦС для лабораторных исследований подобраны по мере усложнения рецептуры (здесь, и далее по тексту, использованы массовые соотношения):

- образец 1) цемент марки ПЦ-500 – 100%;
- образец 2) цемент марки ПЦ-500 – 50%, золо-шлаковые отходы – 50 %;
- образец 3) (УГМ-П) цемент марки ПЦ-500 – до 45%, золо-шлаковые отходы – до 50 %, добавки (ускорители, стабилизаторы, наполнители) в остатке;
- образец 4) (УГМ) цемент марки ПЦ-500 – до 45%, золо-шлаковые отходы – до 50 %, добавки полимеризирующие – до 1%; добавки (ускорители, стабилизаторы, наполнители) в остатке.

ЦС в данной работе рассматриваются как водотвердые суспензии, представленные в виде микрогетерогенной системы, предрасположенной к развитию коагуляционных структур и агрегированию дисперсных частиц. Непосредственно движение суспензии в потоке, в соответствии с представлениями А. Камбефора и проф. В.А. Хмяляйна, рассматривается как гидротранспорт дисперсных частиц [1].

Для ЦС, затворенных водой (структурирован-

Таблица 1. Зависимости напряжения сдвига и эффективной вязкости от скорости сдвига образца 1)  
Table 1. Dependence of shear stress and effective viscosity on the speed of sample shear 1)

$\gamma, c^{-1}$	В/Т = 0,3		В/Т = 0,35		В/Т = 0,4		В/Т = 0,45	
	$\tau, Па$	$\mu_{эфф}, Па \cdot с$	$\tau, Па$	$\mu_{эфф}, Па \cdot с$	$\tau, Па$	$\mu_{эфф}, Па \cdot с$	$\tau, Па$	$\mu_{эфф}, Па \cdot с$
1,8	13,2	7,33	—	—	—	—	—	—
3,0	14,4	4,80	—	—	—	—	—	—
5,4	14,4	2,67	—	—	—	—	—	—
9,0	15,6	1,73	13,2	1,47	—	—	—	—
16,2	18,0	1,11	16,8	1,04	—	—	—	—
27,0	26,4	0,98	20,4	0,76	12,0	0,44	10,8	0,40
48,6	32,4	0,67	27,6	0,57	16,8	0,35	15,6	0,32
81,0	44,4	0,55	37,2	0,46	24,0	0,30	20,4	0,25
145,8	55,2	0,38	54,0	0,37	32,4	0,22	25,2	0,17
243,0	70,8	0,29	68,4	0,28	40,8	0,17	31,2	0,13
437,4	93,6	0,21	82,8	0,19	51,6	0,12	39,6	0,09

ных, седиментационно-неустойчивых суспензий), важнейшими характеристиками, регламентирующими область и технологию применения, являются реологические. Соответственно, для каждого образца ЦС проведено построение «кривой течения», учитывающей соотношение между напряжением сдвига  $\tau, Па$ , и скоростью сдвига  $\gamma, c^{-1}$ .

Для получения каждой экспериментальной точки было проведено по три испытания. Всего проведено 357 испытаний на лабораторном оборудовании и при помощи сотрудников ЗАО НПП «Сибзотехника» (Кемерово). В качестве основного прибора использован ротационный вискозиметр Rheotest RV 2.1 с регистрацией скорости вращения двигателя и усилия вращения.

В лабораторных условиях затворение образцов ЦС водой осуществляли лабораторной мешалкой объемом 0,5 л с низкой угловой скоростью вращения – 450 об/мин., что подходит для перемешивания растворов с низкой и средней вязкостью (до 1,00 Па·с). Использована единая методика процесса: а) взвешивали опытную навеску смеси в количестве 100 г (масса навески в опытах постоянная); б) одномоментно всю массу опытной навески высыпали в емкость с водой. Количество воды рассчитали предварительно в соответствии с массовым В/Т соотношением: 0,2; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,50; ... 1; в) опытную навеску сразу перемешивали в течение 1 минуты, исключая турбулентный режим; г) затворенную смесь из мерной чашечки заливали в стакан вискозиметра до начала вращения его ротора; д) включали двигатель вискозиметра и проводили реологические измерения в соответствии с инструкцией.

В процессе исследований были решены следующие промежуточные задачи:

- уточнение режимов приготовления образцов ЦС при заданных В/Т соотношениях;
- измерение реологических параметров образцов ЦС на ротационном вискозиметре «Rheotest RV 2.1», определение коэффициентов реоло-

гических уравнений и построение кривых течения; – оценка реологических характеристик образцов ЦС.

#### Результаты (The results):

##### Образец 1)

Массовое В/Т соотношение в опытах составило: 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5. При В/Т соотношении равном 0,25, раствора из смеси не получили, так как воды было недостаточно, чтобы полностью смочить поверхность минеральных частиц. По мере увеличения В/Т соотношения соответственно менялась консистенция приготовленных растворов. Реологические измерения надежно проводили при соотношении В/Т в пределах 0,3; 0,35; 0,4; 0,45. При увеличении В/Т соотношения до 0,5 смесь стала жидкой настолько, что показания сняли только на 12 ступени скорости сдвига. Зависимости напряжения сдвига и эффективной вязкости от скорости сдвига для разных В/Т соотношений представлены в таблице 1.

##### Образец 2)

Массовое В/Т соотношение в опытах составило: 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5. При соотношении равном 0,25 раствора из смеси №2 не получили, также как из смеси №1. По мере увеличения В/Т соотношения менялась консистенция приготовленных из смеси №2 растворов. Наибольшую пластичность проявила проба, приготовленная при В/Т соотношении равном 0,4. При соотношении В/Т равном 0,45 раствор по текучести почти соответствовал воде. В итоге, фактические реологические измерения, как и для смеси №1, провели при В/Т соотношениях, равных 0,3; 0,35; 0,4; 0,45. При В/Т соотношении равном 0,5, реологические измерения возможно было произвести только на 11 и 12 ступенях скоростей сдвига. Зависимости напряжения сдвига и эффективной вязкости от скорости сдвига для разных В/Т соотношений представлены в таблице 2.

##### Образец 3)

С учетом малого времени (5 минут) схватыва-

Таблица 2. Зависимости напряжения сдвига и эффективной вязкости от скорости сдвига образца 2)  
Table 2. Dependence of shear stress and effective viscosity on the shear speed of sample 2)

$\dot{\gamma}$ , $\text{с}^{-1}$	В/Т = 0,3		В/Т = 0,35		В/Т = 0,4		В/Т = 0,45	
	$\tau$ , Па	$\mu_{\text{эфф}}$ , Па·с	$\tau$ , Па	$\mu_{\text{эфф}}$ , Па·с	$\tau$ , Па	$\mu_{\text{эфф}}$ , Па·с	$\tau$ , Па	$\mu_{\text{эфф}}$ , Па·с
1,8	13,2	7,33	—	—	—	—	—	—
3,0	14,4	4,80	—	—	—	—	—	—
5,4	14,4	2,67	—	—	—	—	—	—
9,0	15,6	1,73	10,8	1,20	—	—	—	—
16,2	18,0	1,11	12,0	0,74	—	—	—	—
27,0	26,4	0,98	14,4	0,53	12,0	0,44	—	—
48,6	40,8	0,84	20,4	0,42	18,0	0,37	—	—
81,0	56,4	0,70	30,0	0,37	26,4	0,33	9,6	0,12
145,8	75,6	0,52	46,8	0,32	39,6	0,27	13,2	0,09
243,0	110,4	0,45	72,0	0,30	54,0	0,22	18,0	0,07
437,4	150,0	0,34	114,0	0,26	81,6	0,19	26,4	0,06

Таблица 3. Зависимости напряжения сдвига и эффективной вязкости от скорости сдвига образца 3)  
Table 3. Dependence of shear stress and effective viscosity on the shear speed of sample 3)

$\dot{\gamma}$ , $\text{с}^{-1}$	В/Т = 0,25		В/Т = 0,3		В/Т = 0,35		В/Т = 0,4		В/Т = 0,45	
	$\tau$ , Па	$\mu_{\text{эфф}}$ , Па·с	$\tau$ , Па	$\mu_{\text{эфф}}$ , Па·с	$\tau$ , Па	$\mu_{\text{эфф}}$ , Па·с	$\tau$ , Па	$\mu_{\text{эфф}}$ , Па·с	$\tau$ , Па	$\mu_{\text{эфф}}$ , Па·с
1,8	38,4	21,33	14,4	8,00	—	—	—	—	—	—
3,0	39,6	13,20	15,6	5,20	—	—	—	—	—	—
5,4	39,6	7,33	15,6	2,89	—	—	—	—	—	—
9,0	42,0	4,67	18,0	2,00	—	—	—	—	—	—
16,2	49,2	3,04	25,2	1,56	14,4	0,89	—	—	—	—
27,0	54,0	2,00	39,6	1,47	20,4	0,76	18,0	0,67	13,2	0,49
48,6	64,8	1,33	43,2	0,89	34,8	0,72	27,6	0,57	18,0	0,37
81,0	84,0	1,04	55,2	0,68	43,2	0,53	36,0	0,44	20,4	0,25
145,8	103,2	0,71	75,6	0,52	54,0	0,37	45,6	0,31	26,4	0,18
243,0	127,2	0,52	105,6	0,43	66,0	0,27	55,2	0,23	31,2	0,13
437,4	181,2	0,41	151,2	0,35	94,8	0,22	69,6	0,16	39,6	0,09

ния, для реологических исследований эти растворы готовили очень быстро. В опытах немного скорректировали условия проведения замеров во избежание поломки оборудования. Замеры проводились до наступления схватывания раствора, т.е. не более чем через 3 минуты с момента приготовления. В исследованиях смесь поочередно затворяли водой, меняя массовое В/Т соотношение от 0,20 до 0,5. При соотношении, равном 0,2, раствора из смеси №3 не получили. В отличие от смеси №1 и №2 получили раствор при В/Т соотношении, равном 0,25. По мере увеличения водоцементного соотношения улучшалась текучесть раствора, что характеризовалось снижением эффективной вязкости. Наилучшими по реологии были растворы, приготовленные при В/Т соотношении, равном 0,3; 0,4; 0,45. При увеличении В/Т соотношения до 0,5 раствор потерял пластичность (реологические показания с вискозиметра сняли только на 10, 11 и 12 ступенях скоростей сдвига). Зависимости напряжения сдвига и эффективной вязкости от скорости сдвига для разных В/Т соотношений

представлены в таблице 3.

Образец 4)

Учитывая особенность того, что приготовленные из данной смеси растворы сначала густеют, а после перемешивания становятся более жидкими, реологические замеры для таких растворов проводили через промежуток времени, необходимый для растворения, входящего в их состав полимера (т.е. около через 7 минут с момента приготовления раствора). При соотношении, равном 0,2, раствор был очень вязкий – мешалка останавливалась (перемешивания не было); вискозиметр не измерял (внутренний цилиндр не вращался). В отличие от смеси №1 и №2, из смеси №4, как и из смеси №3, получили раствор при В/Т соотношении равном 0,25. Вязкость такого раствора была высокая, но показатели с вискозиметра сняли. Массовое В/Т соотношение в опытах составило: 0,25; 0,3; 0,4. Лучшими, с точки зрения реологии, были растворы с В/Т соотношением равном 0,3 и 0,35. При увеличении в растворе В/Т соотношения до 0,4, реологические показания смогли снять только на



Таблица 4. Зависимости напряжения сдвига и эффективной вязкости от скорости сдвига образца 4)  
Table 4. Dependence of shear stress and effective viscosity on the shear speed of sample 4)

$\gamma, c^{-1}$	В/Т = 0,25		В/Т = 0,3		В/Т = 0,35	
	$\tau, \text{Па}$	$\mu_{\text{эфф}}, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\tau, \text{Па}$	$\mu_{\text{эфф}}, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\tau, \text{Па}$	$\mu_{\text{эфф}}, \text{Па}\cdot\text{с}$
1,8	–	–	–	–	–	–
3,0	–	–	–	–	–	–
5,4	–	–	–	–	–	–
9,0	–	–	–	–	–	–
16,2	20	1,26	–	–	–	–
27,0	40	1,47	13	0,49	–	–
48,6	78	1,60	31	0,64	12	0,25
81,0	145	1,79	60	0,74	24	0,30
145,8	265	1,82	114	0,78	48	0,33
243,0	426	1,76	181	0,74	83	0,34
437,4	603	1,38	295	0,67	133	0,30

10, 11 и 12 ступенях скоростей сдвига. Зависимости напряжения сдвига и эффективной вязкости от скорости сдвига для разных В/Т соотношений представлены в таблице 4.

После измерения реологических параметров образцов приготовленных растворов, выполнены вычисления коэффициентов для определения и построения различных вариантов реологических моделей их течения. На первом этапе оценивались только линейная и степенные модели. Выбраны оптимальные уравнения, которые в итоге наилучшим образом описывают полученные экспериментальные данные при различных В/Т соотношениях:

- образец 1) В/Т 0,3 и 0,4 – степенная модель; В/Т 0,35 и 0,45 – линейная модель;
- образец 2) В/Т 0,3 и 0,4 – степенная мо-

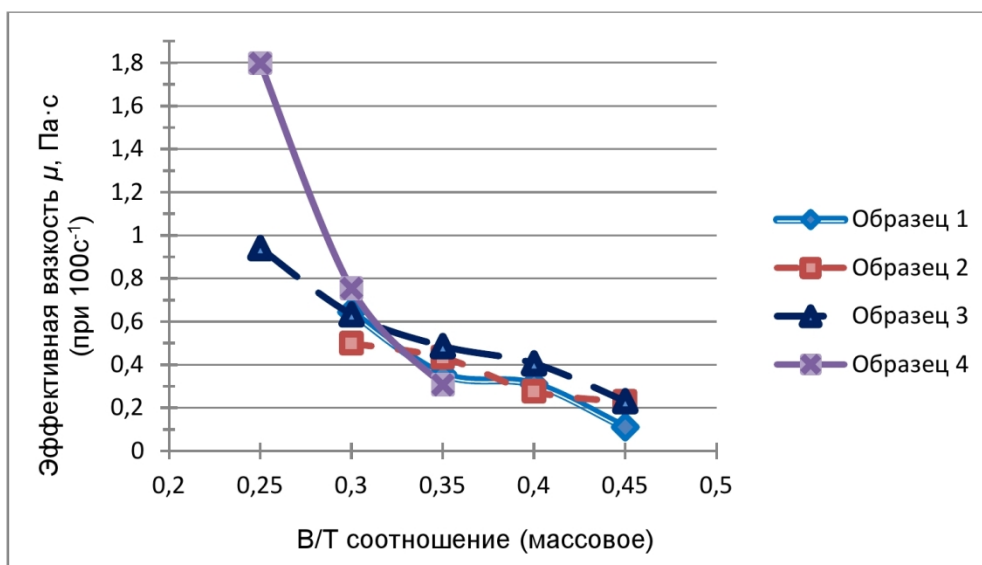
дель; В/Т 0,35 и 0,45 – линейная модель;

– образец 3) В/Т 0,25 – линейная модель; В/Т 0,3 и 0,35 – степенная модель; В/Т 0,4 и 0,45 – линейная модель;

– образец 4) В/Т 0,25 и 0,3 – степенная модель; В/Т 0,35 – линейная модель.

Для заданного значения скорости сдвига  $j$ , равного  $100 \text{ c}^{-1}$ , дополнительно определена эффективная динамическая вязкость  $\mu_{\text{эфф}}, \text{Па}\cdot\text{с}$ , каждого образца ЦС, зависимость которой от различных В/Т соотношений для выбранных моделей представлена на рисунке 1.

При первичном анализе полученных кривых течения ЦС очевидно, что выделяются образцы 1, 2 и 3, у которых в основном проявлены вязкопластические свойства, а при повышении доли жидкой фазы и снижении плотности, больше прояв-

Рис. 1. Зависимость эффективной динамической вязкости  $\mu_{\text{эфф}}, \text{Па}\cdot\text{с}$ , от В/Т соотношения (при скорости сдвига  $100 \text{ c}^{-1}$ )Fig. 1. Dependence of effective dynamic viscosity  $\mu_{\text{эфф}}, \text{Pa}\cdot\text{s}$ , on W/S relation (with shear speed  $100 \text{ s}^{-1}$ )

ляют ньютоновские свойства.

Для дальнейшей, более глубокой обработки результатов, важным является значение динамического (предельного) напряжения сдвига  $\tau_0$ , Па, зависимость которого от различных В/Т соотношений для выбранных моделей представлена на рисунке 2а (получены путем экстраполяции на нулевое значение концентрации – В/Т) и на рисунке 2б (получены в виде коэффициентов аппроксимации).

Рассматривая зависимости экстраполированных  $\tau_0$  (рис. 2а), которые наиболее приближены к

реальному поведению образцов ЦС, у УГМ-П (образец 3) отмечено относительно резкое увеличение значений при максимальном В/Т от 0,25 до 0,3, что может быть объяснено ее большей активностью за счет введения добавок, проявляющих структурные характеристики. Достигнутый эффект положительно влияет на технологические процессы пропиточного тампонажа, где практически нет возможности регулировать режим нагнетания УГМ-П в трещины пород приконтурной зоны. Для исключения потерь важно ограничить зону распространения ЦС. Активное отфильтро-

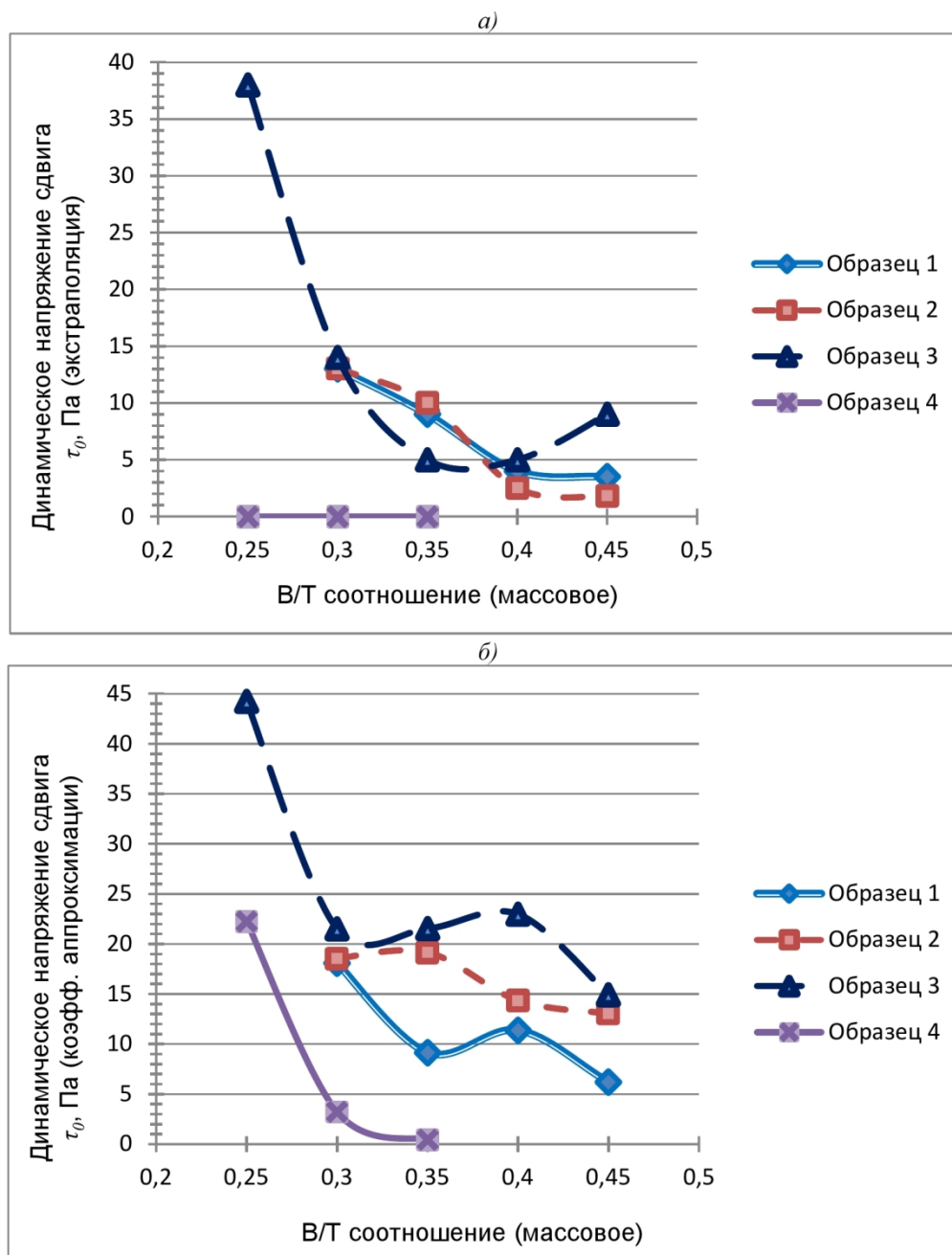


Рис. 2. Зависимость динамического напряжения сдвига  $\tau_0$ , Па, от В/Т соотношения (а) – при экстраполяции данных, б) – в виде коэффициентов аппроксимации)

Fig. 2. Dependence of dynamic stress of shear  $\tau_0$ , Pa on W/S relation (а) – extrapolation, б) – approximation

вывание жидкой фазы в микротрещины и поры пород снижает В/Т соотношение у потока смеси, способствуя при низком давлении нагнетания и расходе, формированию более плотной структуры и остановке потока ЦС в трещинах на определенном расстоянии.

У ЦС УГМ (образец 4) экстраполированные значения  $\tau_0$  вышли в отрицательную зону, т.е. фактически равны нулю. Добавка полимеров практически исключила процессы структурирования ЦС в потоке. При этом отмечен значительный рост значений эффективной вязкости при максимальном В/Т от 0,25 до 0,3. Данный комплекс реологических свойств ЦС позволит более эффективно управлять процессом инъекционного тампонажа массива пород, регулируя соотношение ее расхода и давления нагнетания в инъекционные скважины (шпуры).

Таким образом, в результате первичного анализа полученных данных, сделаны следующие выводы и заключения:

- в итоге подбора комбинаций компонентов создана уникальная рецептура составов с фиксированным временем потери текучести и схватывания на базе цемента марки ПЦ-500 – до 45%, твердых техногенных отходов ТЭЦ и металлургических предприятий Кузбасса – до 50%. Технологическими требованиями, учитывающими время потери текучести и набора прочности ЦС, возможность механизации работ по их приготовлению и транспортированию по трубопроводам, непрерывному заполнению опалубки большого объема, обеспечение фильтрации по трещинам прилегающих горных пород, и т.д., обусловлено применение различных добавок-ускорителей и стабилизаторов, добавок-наполнителей (инертных и активных) – до 4%;
- определена область применения ЦС УГМ – предназначена для инъекционного упрочнения и уплотнения (гидроизоляции) массива нарушенных горных пород и подземных сооружений;
- введение полимеров в базовую рецептуру

ЦС, и при предельно низких В/Т соотношениях – около 0,25, возможно локальное проявление дилатантных свойств (вязкость возрастает при увеличении скорости деформации сдвига);

- отмечена общая тенденция уменьшения значений динамического (предельного) напряжения сдвига  $\tau_0$  при повышении В/Т соотношения ЦС. При всех значениях В/Т соотношений максимальные значения  $\tau_0$  проявлены у УГМ-П, а минимальные у УГМ, что является важным отличием реологических свойств, положительно влияющего на различающиеся режимы и процессы управления потоком ЦС по трещинам горных пород при возведении системы «монолитная перемычка – тампонажная завеса»;

- у разработанных ЦС УГМ и УГМ-П путем введения специализированных добавок снижено предельное В/Т соотношение с 0,3 до 0,25 (относительно базового состава) при сохранении подвижности структуры. Также, повышение концентрации при снижении В/Т соотношения ЦС обеспечивает нелинейный рост значений динамического (предельного) напряжения сдвига у смеси УГМ-П и нелинейный рост значений эффективной динамической вязкости смеси УГМ, что должно положительно влиять на качество заполнения трещин горных пород и применение технологии управляемого тампонажа при возведении системы «монолитная перемычка – тампонажная завеса»;

- из анализа литературы известно, что для неньютоновских суспензий наилучшую аппроксимацию полученных экспериментальных данных дает трехпараметрическая реологическая модель, обобщающая степенной закон течения и реологическую модель тела Шведова–Бингама. Данный подход сформулирован в параметрических уравнениях Гершеля–Балкли и В.А. Хямяляйнена, применение которых в дальнейшем позволит построить более точные модели реологических кривых исследуемых ЦС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хямяляйнен, В.А. Формирование цементационных завес вокруг капитальных горных выработок / В.А. Хямяляйнен, Ю.В. Бурков, П.С. Сыркин. – М.: Недра, 1994. – 400 с.
2. Хямяляйнен, В.А. Физико-химическое укрепление пород при сооружении выработок / В.А. Хямяляйнен, В.И. Митраков, П.С. Сыркин. – М.: Недра, 1996. – 352 с.
3. Майоров, А.Е. Консолидирующее крепление горных выработок / А.Е. Майоров, В.А. Хямяляйнен; науч. ред. В.А. Хямяляйнен; Сиб. отд-ние РАН, КеМНЦ. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – 260 с.
4. Хямяляйнен, В.А. Возведение противотрещинных завес вокруг водоупорных перемычек / В.А. Хямяляйнен, Г.С. Франкевич, В.А. Жеребцов, и др. РАЕН; Кузбас. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 2000. – 119 с.
5. Майоров, А.Е. Фильтрационное течение и приливы плотности дисперсной фазы при заполнении трещин горных пород цементным раствором / А.Е. Майоров, В.А. Хямяляйнен // Изв. вузов. Горный журнал. – 2010. – № 4. – С. 105–110.

6. Хямяляйнен, В. А. Развитие инъекционных способов уплотнения массивов горных пород в Кузбассе // Вестник КузГТУ. – 2015. – №. 5 (111). – С. 25-32.
7. Заславский, Ю.З. Инъекционное упрочнение горных пород / Ю.З. Заславский, Б.А. Лопухин, Е.Б. Дружко. – М.: Недра, 1984. – 176 с.
8. Хямяляйнен, В.А. Оценка влияния отходов углеобогащения на физико-механические свойства тампонажных растворов и параметры технологии цементации / В.А. Хямяляйнен, М.А. Баев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – №. 4. – С. 247-253.
9. Кипко, Э.Я. Комплексный метод тампонажа при строительстве шахт / Э.Я. Кипко, Ю.А. Полозов, О.Ю. Лушникова, В.А. Лагунов. – М.: Недра, 1984. – 280 с.
10. Хямяляйнен, В.А. Экспериментальные исследования физико-механических свойств тампонажных растворов на основе цемента и отходов углеобогащения / В.А. Хямяляйнен, М.А. Баев // Вестник КузГТУ. – 2013. – № 6. – С. 12-19.
11. Углиница А.В., Першин В.В. Цементация трещиноватых пород в условиях подготовительных горных выработок / Кузбас. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 1998. – 220 с.
12. Хямяляйнен, В.А. Разрушение и тампонаж пород в сейсмически активных условиях метаноугольных месторождений / В.А. Хямяляйнен, В.В. Иванов, В.И. Мурко и др.; под общ. ред. В.А. Хямяляйнена; КузГТУ. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2014. – 256 с.
13. Парфенов, А.П. Строительство гидроизоляционных перемычек в калийных рудниках Прикарпатья // Шахтное стр-во. – 1989. – № 7. – С. 24-25.
14. Нургалиев, Е.И. Технология скоростного возведения высокопрочных безврубовых перемычек с использованием специализированных цементных смесей / Е.И. Нургалиев, А.Е. Майоров, Г.Н. Роут // Журнал Уголь. – 2014. – №6. – С 20-23.
15. Инструкция по предупреждению и тушению подземных эндогенных пожаров в шахтах Кузбасса // ФГУП РосНИИГД, ФГУП НЦ ВостНИИ. – Кемерово, 2007. – 77 с.
16. Глузберг, Е.И. Теоретические основы прогноза и профилактики шахтных эндогенных пожаров. – М.: Недра, 1989. – 160 с.
17. Егшин, В.В. Предупреждение и тушение эндогенных пожаров на шахтах Кузбасса / В.В. Егшин, Е.В. Кухаренко, И.Ф. Александрович. – Кемерово: Кемеров. кн. изд-во, 1994. – 355 с.
18. Бирик, Е.Е. Реология дисперсных систем [Текст] / Е.Е. Бирик. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1981. – 172 с.
19. Уилкинсон, У.Л. Неньютоновские жидкости. Гидромеханика, перемешивание и теплообмен [Текст] / У.Л. Уилкинсон. – М.: Мир, 1964. – 194 с.
20. Шрам, Г. Основы практической реологии и реометрии / Г. Шрам; пер. с англ. И.А. Лавыгина; под ред. В.Г. В.Г. Куличихина. – М.: КолосС, 2003. – 312 с.
21. Малкин, А.Я. Реология: концепции, методы, приложения / А.Я. Малкин, А.И. Исаев; пер. с англ. – СПб.: Профессия, 2007. – 560 с.

## REFERENCES

1. Khyamyalyainen, V.A. Cement-grout screen formation around permanent mine excavations / V.A. Khyamyalyainen, Y.V. Burkov, P.S. Syrkin. – M.: Nedra, 1994. – 400 p.
2. Khyamyalyainen, V.A. Physical and chemical rocks hardening with excavation construction / V.A. Khyamyalyainen, V.I. Mitrov, P.S. Syrkin. – M.: Nedra, 1996. – 352 p.
3. Mayorov, A.E. Consolidating bracing of mining excavations / A.E. Mayorov, V.A. Khyamyalyainen; Sib. branch RAS, KemSC. – Novosibirsk: SB RAS publishing, 2009. – 260 p.
4. Khyamyalyainen, V.A. Antifiltration screens creation around water-resistant bridges / V.A. Khyamyalyainen, G.S. Frankevich, V.A., Zherebtsov, etc. RANS; Kuzbass state tech. univ. – Kemerovo, 2000. – 119 p.
5. Mayorov, A.E. Filtering flow and density increasing in dispersed phase with rock fractures filling by cement grout / A.E. Mayorov, V.A. Khyamyalyainen // Mining journal. – 2010. – No.4. – P. 105-110
6. Khyamyalyainen, V.A. Development of injection methods of compacting of rock massif in Kuzbass // Vestnik KuzSTU. – 2015. – №.5 (111). – P. 25-32.
7. Zaslavskiy, Y.Z. Rock massif injection hardening / Y.Z. Zaslavskiy, B.A. Lopukhin, E.B. Druzhko. – M.: Nedra, 1984. – 176 p.
8. Khyamyalyainen, V.A. Evaluating of influence of coal preparation wastes on physical and mechanical properties of plugging grouts and parameters of cementation technology / V.A. Khyamyalyainen, M.A. Baev // Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). – 2014. – №. 4. – P. 247-253.
9. Kipko, E.Y. Complex method of plugging in mine building / E.Y. Kipko, Y.A. Polozov, O.Y. Lushnikova, V.A. Lagunov. – M.: Nedra, 1984. – 280 p.
10. Khyamyalyainen, V.A. Experimental researches of physical and mechanical properties of plugging

grouts based on cement and coal preparation wastes / V.A. Khyamyalyainen, M.A. Baev // Vestnik KuzSTU. – 2013. – №6. – P. 12-19.

11. Uglyanitsa, A.V. Fractured rocks grouting in conditions of pre-excavations / A.V. Uglyanitsa, V.V. Pershin. Kuzbass state tech. univ. – Kemerovo, 1998. – 220 p.

12. Khyamyalyainen, V.A. Destruction and plugging of rock at seismic active conditions of methane-coal fields / V.A. Khyamyalyainen, V.V. Ivanov, V.I. Murko, etc.; KuzSTU. – Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 2014. – 256 p.

13. Parfenov, A.P. Hydroisolating bridges constructing in potassium mines of Prikarpatye // Mining construction. – 1989. No.7. – P. 24-25.

14. Nurgaliev, E.I. The technology of fast construction of extra strength bridges with using of special cement mixtures / E.I. Nurgaliev, A.E. Mayorov, G.N. Rout // Coal journal. – 2014. – No.6. – P 20-23.

15. Instruction for prevention and firefighting of underground breeding fire on Kuzbass coal mines // FSUC RusSRIMD, FSUC EastSRI. – Kemerovo, 2007. – 77 p.

16. Glauzberg, E.I. Theoretical basics of prognosis and prevention of breeding fire. – M.: Nedra, 1989. – 160 p.

17. Egoshin, V.V. Prevention and firefighting of underground breeding fire on Kuzbass coal mines / V.V. Egoshin, E.V. Kukharenskiy, I.F. Alexandrovich. – Kemerovo: Kemerovo book publishing, 1994. – 355 p.

18. Bibik E.E. Rheology of dispersion systems [Text] / E.E. Bibik. – L.: Leningrad university publishing, 1981. – 172 p.

19. Wilkinson, U.L. Non-Newtonian liquids. Hydromechanics, mixing and heat transfer [Text] / U.L. Wilkinson. – M.: Mir, 1964. – 194 p.

20. Shramm, G. Practical rheology and rheometry bases / G. Shramm; rus. translation I.A. Lavigyna; edited by V.G. Culichikhin. – M.: KolosS, 2003. – 312 p.

21. Malkin, A.Y. Rheology: concepts, methods, applications / A.Y. Malkin, A.I. Isaev; rus. translation. – SPb.: Profession, 2007. – 560 p.

Поступило в редакцию 08.10.2018

Received 08 October 2018