

УДК 622.868.42:[691.5+669.181.28+662.613.11]
© Г.И. Пештибай, 2018

Г.И. ПЕШТИБАЙ

начальник отдела

НИИГД «Респиратор», г. Донецк

e-mail: niigd.osmas@mail.ru



МАЛОКОМПОНЕНТНЫЕ БЫСТРОТВЕРДЕЮЩИЕ ЦЕМЕНТНЫЕ СМЕСИ ДЛЯ ВОЗВЕДЕНИЯ ВЗРЫВОУСТОЙЧИВЫХ ПЕРЕМЫЧЕК

Приведены результаты экспериментальных исследований по определению механической прочности составов малокомпонентных цементных смесей с наполнителями из промышленных отходов для взрывоустойчивых перемычек в зависимости от концентрации ускорителей твердения.

Ключевые слова: ШАХТНАЯ ПЕРЕМЫЧКА, ВЗРЫВОУСТОЙЧИВОСТЬ, ЦЕМЕНТНЫЕ СМЕСИ, ВРЕМЯ ТВЕРДЕНИЯ, УСКОРИТЕЛИ ТВЕРДЕНИЯ, МЕХАНИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ.

К наиболее опасным видам аварий, которые приводят к существенным материальным потерям, относятся подземные пожары. Локализацию взрывов горючих газов в изолированном пространстве осуществляют путем сооружения взрывоустойчивых перемычек. Наиболее эффективным способом их возведения является гидромеханический дистанционный способ, результат применения которого — создание специальных монолитных изолирующих сооружений.

Простая технология возведения массивных литых сооружений, высокие изолирующие свойства, несгораемость и технологичность предопределили широкое распространение гипсового вяжущего при сооружении взрывоустойчивых перемычек [1]. Наряду с неоспоримыми преимуществами гипсовый материал имеет недостатки, основными из которых является малая продолжительность транспортирования по трубопроводу, ввиду быстрого процесса перехода в твердое состояние (около 3–5 мин), низкая водостойкость и ползучесть. При ув-

лажнении конструкции прочность гипсобетона значительно снижается по сравнению с прочностью в сухом состоянии, а ползучесть возникает под действием постоянного собственного веса, что может привести к разгерметизации изолированного участка.

Материалам на основе цементного вяжущего указанные недостатки не присущи, однако они обладают большим временем твердения и усадкой монолитного тела перемычки. Так, согласно [2], усадка материала цементной смеси типа «Текбленд» в верхней части перемычки в выработке сечением 10 м² составляет 40–80 мм. В работе [3] детально изучен наиболее популярный быстротвердеющий материал «Текбленд» с использованием рентгенофазового и комплексного термического анализа и определен его состав. Испытания в подземных условиях угольных шахт показали нестабильность прочностных свойств материала и отклонение от заявленных в сертификате в сторону меньших значений. Кроме того, в шахтных условиях «Текбленд» имеет повышенную влажность и водопоглощение,

в результате чего может находиться даже в пластическом состоянии. Учитывая его высокую стоимость, нестабильность прочностных характеристик и усадочные явления, авторы [3] относят «Текбленд» к материалам с ограниченными условиями применения.

В работе [4] предложен минеральный композиционный состав на основе микроцементного вяжущего — УГМ-П, который может быть использован для возведения взрывоустойчивых перемычек. Состав быстротвердеющей смеси не приводится, однако, по-видимому, активация цемента достигается за счет дополнительного помола обычного цемента до удельной поверхности 3500–4000 см²/г (вместо 2600–3000 см²/г для обычного портландцемента). Дополнительная подготовка цементного вяжущего вызывает более интенсивное твердение в первые трое суток. Домол цемента увеличивает затраты энергии и повышает стоимость быстротвердеющей смеси.

Целью работы является определение максимальных значений пределов прочности на сжатие при минимальном времени их достижения для материалов взрывоустойчивого сооружения, состоящих из относительно недорогих цементных быстротвердеющих смесей с использованием наполнителей из промышленных отходов.

Основные задачи — установление концентрации химических ускорителей твердения цементно-шлаковых и цементно-зольных смесей и определение минимального време-

ни достижения необходимой механической прочности взрывоустойчивого сооружения.

Работу проводили с учетом результатов ранее выполненных экспериментов [5]. Исходным сырьем для разработки быстротвердеющих смесей выбраны доступные материалы — портландцемент марки ПЦ-I-500, доменный отвальный шлак Донецкого металлургического завода, зола-унос с электрофильтров Зуевской ТЭС. В качестве ускорителей твердения выбраны наиболее дешевые и доступные традиционные материалы — жидкое натриевое стекло и хлористый кальций. Для получения мелкозернистой структуры бетона использовали просеянный доменный шлак через сито с ячейкой 2 мм.

Испытания по определению предела прочности на сжатие при одноосном состоянии проводили по стандартной методике на образцах размером 40x40x160 мм.

Критерием набора минимальной механической прочности твердеющего цементного материала является достижение значения предела прочности материала на одноосное сжатие не менее 3,0 МПа, аналогичное для строительного гипса.

На первом этапе экспериментальных работ проведены испытания минерально-цементных смесей с ускорителем твердения в виде жидкого стекла. Составы смесей с жидким стеклом и результаты испытаний механической прочности представлены в таблице 1.

Таблица 1

Составы смесей с жидким натриевым стеклом и результаты испытаний механической прочности при 24-часовом твердении

Формула смеси	Предел прочности на сжатие, МПа
Ц : Ш : ВД (6 : 4 : 0,35) — базовый состав	5,95
Ц : Ш : СТ : ВД (6 : 4 : 0,02 : 0,35)	2,50
Ц : Ш : СТ : ВД (6 : 4 : 0,03 : 0,35)	3,50
Ц : Ш : СТ : ВД (6 : 4 : 0,04 : 0,35)	3,70
Ц : Ш : СТ : ВД (6 : 4 : 0,05 : 0,35)	4,20
Ц : Ш : СТ : ВД (6 : 4 : 0,07 : 0,35)	3,80
Ц : Ш : ВД (6 : 4 : 0,3) — базовый состав	6,50
Ц : Ш : СТ : ВД (6 : 4 : 0,05 : 0,3)	5,20

Здесь формула смеси представлена в виде буквенного обозначения, дающего качественный состав — Ц : Ш : СТ : ВД, где Ц — цемент, Ш — шлак, СТ — жидкое стекло, ВД — вода. В скобках дано количественное отношение компонентов.

Результаты, представленные в таблице 1, свидетельствуют о неэффективности добавок жидкого стекла в цементно-шлаковые смеси с соотношением компонент 6 : 4. Все испытываемые образцы снижают прочность на сжатие по сравнению с базовыми образцами без добавок жидкого стекла. Из-за этого было увеличено цементно-минеральное отношение до 7 : 3 и повторно проведены опыты с добавками жидкого стекла.

Результаты исследований зависимости предела прочности на сжатие образца из цементно-шлаковой смеси от массовой доли жидкого стекла приведены на рис. 1.

Анализ кривой показывает, что максимум предела прочности, равный 6,8 МПа, достигается при 5-процентной концентрации жидкого стекла при 24-часовом твердении. Повышение прочности материала с добавками жидкого стекла по сравнению с материалом без добавок составляет около 21 %.

Таким образом, экспериментально установлено, что повышение прочности материала с добавками жидкого стекла в цементно-шлаковой смеси наблюдается только в таких составах, в которых отношение Ц : Ш \geq 7 : 3.

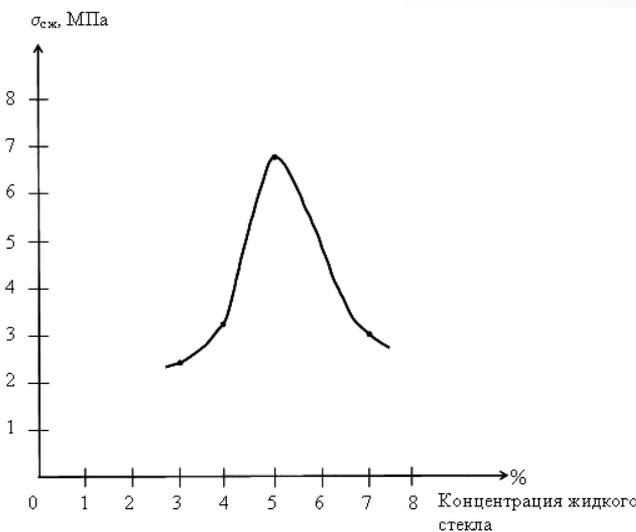


Рис. 1. Зависимость предела прочности на сжатие цементно-шлаковой смеси от массовой доли жидкого стекла Ц : Ш : СТ : ВД (7 : 3 : СТ : 0,35) при 24 часовом твердении

На следующем этапе экспериментальных работ определялось минимальное время набора прочности, равной 3,0 МПа, при оптимальной (5 %) добавке жидкого стекла. На рисунке 2 показана кинетика набора ранней прочности разработанной смеси.

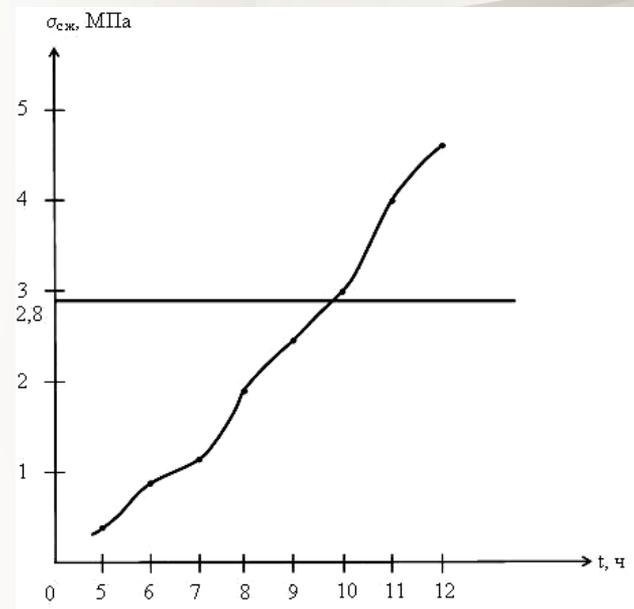


Рис. 2. Зависимость предела прочности цементно-шлаковой смеси

Из рисунка следует, что предел прочности $\sigma_{сж} = 3,0$ МПа обеспечивается при времени $t = 10$ ч. Поскольку тело перемычки представляет массивный моноблок, в котором происходит тепловыделение за счет гидратации цемента, то найденное время можно считать гарантированным.

Математическая обработка данных показала, что в интервале исследуемого отрезка времени (от пяти до двенадцати часов) эмпирическая зависимость $\sigma_{сж}(t)$ может быть представлена формулой $\sigma_{сж} = -3,96 + 0,72 t$, которая позволяет определить время достижения начально заданной прочности моноблока перемычки.

Исследование влияния хлористого кальция на прочность образцов проводили на трех составах: Ц : Ш = 7 : 3; Ц : Ш = 6 : 4 и Ц : Ш = 7 : 3, где Ш — массовая доля золы-уноса.

Зависимости прочности сжатия от концентрации хлористого кальция при 24-часовом твердении представлены на рис. 3.

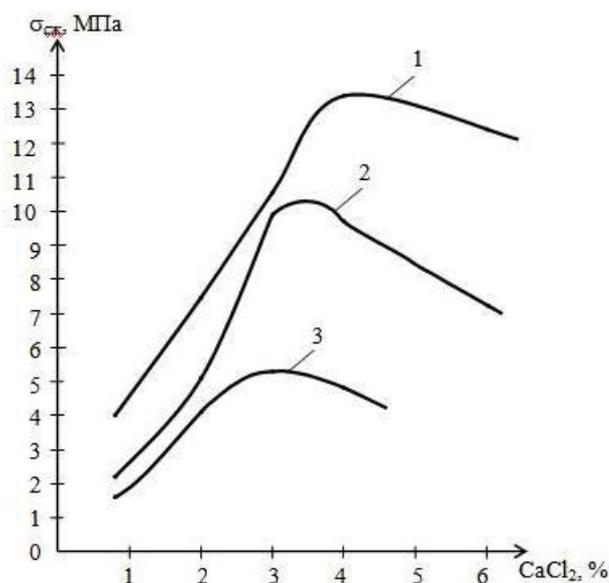


Рис. 3. Зависимость прочности сжатия от массовой доли хлористого кальция при 24-часовом твердении:
1 — отношение Ц : Ш = 7 : 3; 2 — отношение Ц : Ш = 6 : 4; 3 — отношение Ц : Ш = 7 : 3

Анализ экспериментальных кривых показывает, что они имеют экстремум, при котором достигается максимальная прочность, то есть массовая доля хлористого кальция в данной точке является также максимальной, а поэтому может быть обоснованно выбрана для проведения дальнейших экспериментов по определению прочностных характеристик образцов в интервале времени до 24 ч твердения.

Для состава цементно-шлаковой смеси Ц : Ш = 7 : 3 максимальная массовая доля хлористого кальция составляет 4 % от массы цемента, для состава Ц : Ш = 6 : 4 — 3 %. Для цементно-зольной смеси Ц : З = 7 : 3 максимум прочности достигается при добавке 3 % хлористого кальция. Исследования по определению предела прочности на сжатие с максимальным содержанием ускорителя твердения проводили в интервале времени от 6 до 24 ч. Результаты исследований представлены на рис. 4.

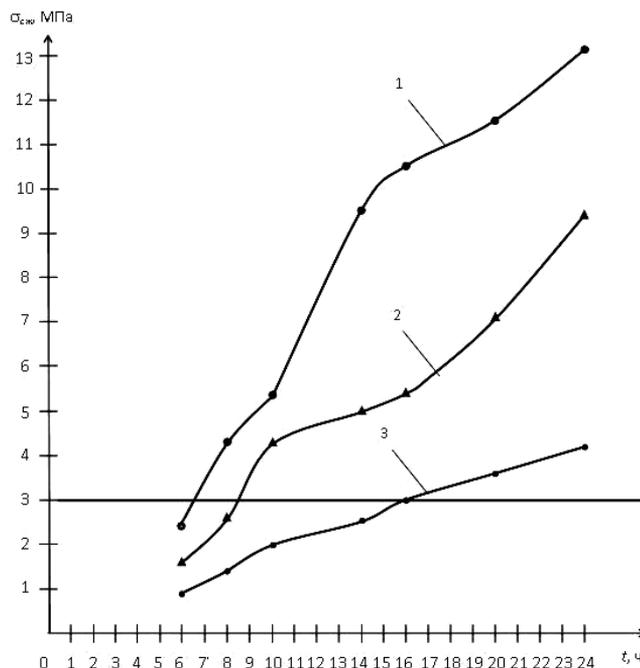


Рис. 4. Зависимости пределов прочности на сжатие:
1. ● — состав Ц : Ш : ХК : ВД (7 : 3 : 0,04 : 0,3);
2. ▲ — состав Ц : Ш : ХК : ВД (6 : 4 : 0,03 : 0,3);
3. ● — состав Ц : З : ХК : ВД (7 : 3 : 0,03 : 0,4)

Математическая обработка экспериментальных данных позволила получить следующие аппроксимирующие уравнения:

1. $\sigma_{сжк} = -0,025t^2 + 1,37t - 5,27, R = 0,994,$
2. $\sigma_{сжк} = 0,394t - 0,448, R = 0,985,$
3. $\sigma_{сжк} = 0,181t - 0,05, R = 0,992.$

Анализ полученных кривых показывает, что наименьшее время набора требуемой прочности (3,0 МПа) составляет около 6,5–7,0 ч и достигается составом с формулой Ц : Ш : ХК : ВД (7 : 3 : 0,04 : 0,3), где ХК — массовая доля хлористого кальция. Аналогичную прочность состав с меньшей массовой долей цементного вяжущего Ц : Ш : ХК : ВД (6 : 4 : 0,03 : 0,3) достигает за 8,5–9,0 ч твердения, а цементно-зольный состав Ц : З : ХК : ВД (7 : 3 : 0,03 : 0,4) — за 16 ч.

Из вышеизложенного следует, что хлористый кальций в отличие от жидкого стекла эффективен не только в растворах с соотношением Ц : Ш = 7 : 3, но и в растворах с более низкой массовой долей цемента Ц : Ш = 6 : 4 и в цементно-зольных растворах. Так, например, цементно-шлаковый состав Ц : Ш = 7 : 3 с ускорителем твердения в виде хлористого

кальция набирает прочность 3 МПа на 30 % быстрее, чем с ускорителем твердения в виде жидкого стекла, а поэтому более эффективен. Дальнейшее существенное сокращение времени для достижения необходимой прочности с помощью простых добавок-ускорителей проблематично, т. к. согласно работе [6] эффективность хлористого кальция является одной из самых высоких. Дополнительное воздействие на скорость твердения цементно-шлакового раствора можно получить за счет добавок быстротвердеющего гипсового вяжущего. Однако добавление в цемент гипса приводит к образованию гидросульфата алюмината кальция — этtringита. В присутствии повышенных дозировок гипса этtringит значительно увеличивается в объеме и разрывает цементный камень.

В то же время следует отметить, что существуют факторы, допускающие увеличение количества добавленного гипса. К таким факторам относится наличие в доменном шлаке и золе-уносе извести. В этой связи выполнены исследования по определению минимальной концентрации добавок гипса в цементно-шлаковую смесь совместно с ускорителем твердения — хлористым кальцием.

Результаты этих исследований представлены на рис. 5, где показано влияние добавок гипсового вяжущего на прочность цементно-шлаковой смеси составом с формулой Ц : Ш : ХК : ВД (7 : 3 : 0,04 : 0,3) при 5-часовом твердении.

Кривая имеет максимум, соответствующий 3 % массовой доли гипса относительно массы цемента. В итоге были получены результаты, позволяющие утверждать, что добавка незначительного количества гипса в цементно-шлаковую смесь дает возможность сократить время достижения необходимой прочности 3 МПа до 5,5–6,0 ч, что на 1 ч меньше по сравнению со смесью без гипсовой добавки. В проведенных опытах добавка гипса проводилась таким образом, чтобы суммарная масса вяжущего (цемента и гипса) оставалась неизменной и равной массе вяжущего (цемента) в образцах без добавки гипса.

Следует отметить, что проведенные экспериментальные исследования по определению

прочности на стандартных образцах-балочках не в полной мере соответствуют реальным условиям твердения цементной смеси в шахтных условиях. В зависимости от расположения горной выработки температура окружающей среды может быть значительно выше температуры проведения экспериментальных работ (20 ± 2 °С). С другой стороны, изолирующая взрывоустойчивая перемышка представляет собой массивное сооружение, в моноблоке которого происходят реакции гидратации, гидролиза и обменного взаимодействия, протекающие в жидкой фазе или на поверхности твердых частиц цемента. Ввиду низкой теплопроводности бетона внутри моноблока перемышки температура поднимается до 50 °С и выше [7]. Поскольку повышенная температура является одним из важнейших факторов, положительно влияющих на скорость твердения цементного материала, то полученные экспериментальные данные по прочности твердения можно считать нижним гарантированным порогом.

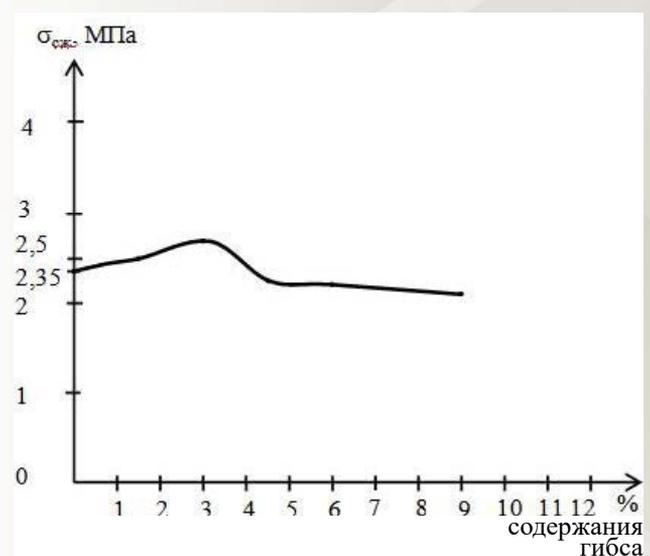


Рис. 5. Зависимость влияния добавок гипсового вяжущего на прочность цементно-шлаковой смеси при 5-часовом твердении

Дальнейшее улучшение механических показателей цементно-шлаковых и цементно-зольных смесей (повышение ударной прочности в несколько раз, уменьшение или полное устранение усадки, повышение водостойкости) может быть достигнуто с помощью

объемного армирования тела перемычки фиброволокном, например, полипропиленовой фиброй, что требует дополнительной экспериментальной проверки.

Выводы

В результате проведения экспериментальных исследований по определению материала для возведения взрывоустойчивых перемычек гидромеханическим способом установлено следующее:

1. Добавка ускорителя твердения, жидкого натриевого стекла, неэффективна в цементно-шлаковых составах с массовым отношением 6 : 4. Влияние жидкого стекла на увеличение предела прочности на сжатие смесей начинает проявляться при повышении

концентрации цемента до соотношения 7 : 3.

2. Максимальные массовые доли хлористого кальция для цементно-шлаковых смесей составляют 4 и 3 % для отношений вяжущего к наполнителю 7 : 3 и 6 : 4 соответственно, его массовая доля в цементно-зольной смеси с отношением компонентов 7 : 3 составляет 3 %.

3. Время начала безопасной эксплуатации для сооружений, возведенных из цементно-шлакового материала с отношением компонентов 7 : 3, составляет 6,5–7,0 ч. Добавка количества гипса, примерно равного 3 % от массы цементного вяжущего, позволяет сократить время достижения предела прочности цементно-шлаковой смеси на сжатие, равного 3,0 МПа (как и для строительного гипса), на 12 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гипсовые вяжущие вещества / Г.И. Пефтибай, Э.Г. Чайковская, А.М. Луганский, Н.А. Выпирайло // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / Горноспасательное дело (Научный вестник НИИГД «Респиратор»). — Донецк, 2010. — Вып. 47. — С. 63–68.
2. Технология возведения изолирующих, водоупорных и взрывоустойчивых перемычек на шахтах ОАО «Южный Кузбасс» / И.А. Шундулиди, А.В. Чубриков, В.А. Пуртов, И.Б. Коржов // Уголь. — 2005. — № 6. — С. 33–35.
3. Булат А.Ф. К выбору строительных смесей для горных технологий / А.Ф. Булат, Б.М. Усаченко, Л.В. Левченко // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / Ин-т геотехнической механики НАНУ. — Днепрпетровск, 2005. — Вып. 61. — С. 28–40.
4. Нургалиев Е.И. Технология возведения монолитных взрывоустойчивых перемычек с применением минеральной смеси «УГМ» // Ежегодная молодежная конференция ИУ СО РАН: сб. тр. конф., Кемерово, 16–17 апреля 2015 г. / Ин-т угля Сибирского отделения РАН. — Электрон. текстовые дан. — Кемерово: Институт угля СО РАН, 2015. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). — С. 59–70.
5. Пефтибай Г.И. Быстротвердеющие зольно-цементные и шлакоцементные смеси для возведения взрывоустойчивых перемычек / Г.И. Пефтибай, Н.А. Галухин, Е.В. Курбацкий // Научный вестник НИИГД «Респиратор». — 2017. — № 4 (54). — С. 70–81.
6. Ружинский С.И. Ускорители схватывания и твердения в технологии бетонов // Популярное бетоноведение. — 2005. — № 1. — С. 2–76.
7. Ледяйкин Е.С., Трошков Н.Ю., Ярош А.С. О нагревании изоляционных взрывоустойчивых перемычек // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2016. — № 4. — С. 56–61.

UDC 622.868.42:[691.5+669.181.28+662.613.11]

© G.I. Peftibaj, 2018

G.I. Peftibaj

Head of Department

NIIGD «Respirator» EMERCOM

Donetsk People's Republic, Donetsk

e-mail: niigd.osmas@mail.ru

LOW-COMPOUND RAPID-SETTING CEMENT MIXTURES FOR EXPLOSION-PROOF STOPPINGS INSTALLATION

The article shows the results of experimental researches on the determination of the mechanical strength of compositions of low-compound cement mixtures with fillers from industrial wastes for explosion-proof stoppings, depending on the concentration of hardeners.

Key words: STOPPING, EXPLOSION STABILITY, CEMENT MIXTURE, CURING TIME, HARDENER, MECHANICAL STRENGTH.

REFERENCES

1. Peftibaj G.I., Chaykovskaya E.G., Luganskiy A.M., Vypiraylo N.A. Gipsovye vyazhushchie veshchestva (Gypsum binder agent). Gornospasatelnoe delo: sb. nauch. tr. Gornospasatelnoe delo = Nauchnyy vestnik NIIGD «Respirator». Donetsk. 2010. Iss. 47. pp. 63–68.
2. Shundulidi I.A., Chubrikov A.V., Purtov V.A., Korzhov I.B. Tekhnologiya vozvedeniya izoliruyushchikh, vodoupornykh i vzryvoustoychivyykh peremychek na shakhtakh OAO «Yuzhnyy Kuzbass» (Technology of installation isolating, waterproof and explosion-proof wall stoppings in Company «Yugnij Kuzbass» mines). Ugol'. 2005. № 6. pp. 33–35.
3. Bulat A.F., Usachenko B.M., Levchenko L.V. K vyboru stroitelnykh smesey dlya gornykh tekhnologiy (The choice of building mix for mining technology). Geotekhnicheskaya mekhanika: mezhved. sb. nauch. tr. In-t geotekhnicheskoy mekhaniki NANU. Dnepropetrovsk. 2005. Iss. 61. pp. 28–40.
4. Nurgaliev E.I. Tekhnologiya vozvedeniya monolitnykh vzryvoustoychivyykh peremychek s primeneniem mineralnoy smesi «UGM» (Technology of installation of monolithic explosion-proof wall stoppings with the use of mineral mix «UGM»). Ezhegodnaya molodezhnaya konferentsiya IU SO RAN: sb. tr. konf., Kemerovo, 16–17 aprelya 2015 g. In-t uglya Sibirskogo otdeleniya RAN. Elektron. tekstovye dan. Kemerovo: Institut uglya SO RAN, 2015. 1 elektron. opt. disk (CD-ROM). pp. 59–70.
5. Peftibaj G.I., Galukhin N.A., Kurbatskiy E.V. Bystrotverdeyushchie zolno-tsementnye i shlakotsementnye smesi dlya vozvedeniya vzryvoustoychivyykh peremychek (Rapid-hardening ash-cement and slag-cement mixtures for erection of explosion-stable stoppings). Nauchnyy vestnik NIIGD «Respirator» = Scientific bulletin of the NIIGD «Respirator». 2017. № 4 (54). pp. 70–81.
6. Ruzhinskiy S.I. Uskoriteli skhvatyvaniya i tverdeniya v tekhnologii betonov (Accelerators for setting and hardening in concrete technology). Populyarnoe betonovedenie. 2005. № 1. pp. 2–76.
7. Ledyaykin E.S., Troshkov N.Yu., Yarosh A.S. O nagrevanii izolyatsionnykh vzryvoustoychivyykh peremychek (On heating of explosion-proof insulating stoppings). Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti = Industrial Safety. 2016. № 4. pp. 56–61.