

- Путь развития разряда имеет различный вид в зависимости от материала композиции. Для большинства композиций развитие разряда сопровождается пробоем исследуемого материала и выходом его на поверхность с образованием треков. Для композиций ПММА – изофлекс, ПММА – слюдопласт развитие разряда сопро-

вождается заглублением канала разряда в толщу исследуемых материалов и образованием треков в их толще.

- Вариации значений диэлектрической проницаемости исследуемых материалов не оказывают существенного влияния на среднее время развития разряда и величину разрядного напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Меркулов В.И., Почивалова А.В. Особенности разряда на границе раздела твердых слоистых диэлектриков // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – № 2. – С. 91–94.
- Лысенко А.Н. Электрическая прочность границы раздела полимерной композиционной изоляции: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1986. – 168 с.
- Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия, 1979. – 223 с.
- Гэфле О.С., Лебедев С.М., Похолков Ю.П. Барьерный эффект в диэлектриках. – Томск: Изд-во «ТМЛ-Пресс», 2007. – 172 с.
- Резвых К.А. Расчет электростатических полей. – М.: Энергия, 1967. – 120 с.
- Воробьев Г.А., Похолков Ю.П., Королев Ю.Д., Меркулов В.И. Физика диэлектриков (область сильных полей). – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 244 с.
- Койков С.Н., Цикин А.Н. Электрическое старение твердых диэлектриков и надежность диэлектрических деталей. – М.-Л.: Энергия, 1968. – 287 с.
- Электроизоляционные материалы // Каталог группы компаний по поставке электроизоляционных материалов, 2010. URL: <http://www.electroelmika.ru/catalog> (дата обращения: 25.01.2011).
- Электроизоляционные материалы // Каталог электроизоляционных материалов компании «Миг Сервис», 2010. URL: <http://mig-service-spb.ru/index.php?id=197> (дата обращения: 25.01.2011).

Поступила 25.01.2011 г.

УДК 622

ЗАВИСИМОСТЬ КОМПРЕССИОННЫХ СВОЙСТВ ЗОЛОШЛАКО-ИЗВЕСТКОВЫХ АВТОКЛАВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ОТ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПОДЪЕМА ДАВЛЕНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА

А.В. Исаенко, М.Ф. Рифель

Кузбасский государственный технический университет, г. Кемерово
E-mail: iav.tsp@kuzstu.ru

Проанализированы способы закладки вертикальных горных выработок и экологические последствия их некачественной закладки. Обоснована необходимость разработки технологии закладки вертикальных горных выработок твердеющими бетонными смесями на основе отходов топливно-энергетического комплекса. Приведены результаты тестовых испытаний по определению компрессионных свойств автоклавных материалов, состоящих из молотой золошлаковой смеси ТЭЦ, извести и воды. Представлены зависимости компрессии золошлако-известковых закладочных материалов от продолжительности подъема водяного пара.

Ключевые слова:

Автоклавные материалы, вертикальные горные выработки, закладка, зола и шлак топливных предприятий.

Key words:

Autoclave materials, vertical mine workings, backfill, ash and slag of fuel companies.

Закрытие шахты – очень сложный процесс, при котором возникает ряд геоэкологических проблем. Одна из таких проблем, которая возникает также и при реконструкции шахт – ликвидация вертикальных вскрывающих горных выработок [1].

При закрытии и реконструкции угольных шахт согласно требованиям нормативных документов [2, 3] необходимо производить закладку ликвидируемых вертикальных вскрывающих горных выработок водоупорным беззасадочным материалом для предотвращения фильтрации воды между водоносными горизонтами, выхода рудничного газа из выработанного пространства на поверхность горного предприятия и просадки земной поверхности на участке, прилегающем к вертикальной выработке.

В ходе реструктуризации угольной промышленности РФ в Кузбассе было закрыто 43 шахты и ликвидировано 157 вертикальных стволов, при этом требования действующих нормативных документов не соблюдались – стволы были либо просто перекрыты изолирующей перемычкой в устьевой части, либо засыпаны горелой породой или глиной. Основной причиной несоблюдения требований нормативных документов при закладке стволов послужило отсутствие недорогого и эффективного способа закладки вертикальных выработок беззасадочным и водоупорным материалом.

В последние годы в Российской Федерации проводится большая работа по разработке эффективных технических и технологических решений

по ликвидации и реконструкции угольных шахт. Однако на сегодняшний день ни один из известных способов закладки выработанного пространства применительно к условиям вертикальных вскрывающих горных выработок научно не обоснован, отсутствуют методики определения рациональных параметров закладки, способы закладки характеризуются высокой трудоемкостью и стоимостью за счет использования дорогостоящих закладочных материалов и технологических приемов.

Применяемый по настоящее время в качестве основного способ ликвидации вертикальных выработок путем их засыпки перегоревшей породой, как показывает практический опыт, не позволяет создавать в выработке беззасадочный и водоупорный закладочный массив и, как следствие, приводит к возникновению гидрогеологических и экологических проблем [4].

В местах ликвидации шахт только в Кузнецком и Донецком бассейнах количество зон по выделению вредных газов превысило 1270; количество провалоопасных зон – 4800; гидрохимические анализы сточных вод выявили настоятельную необходимость проведения работ по строительству и реконструкции очистных сооружений практически во всех зонах ликвидации шахт.

Наиболее эффективным способом ликвидации вертикальной горной выработки является ее закладка беззасадочной и водоупорной твердеющей бетонной смесью.

Основные требования, предъявляемые к таким бетонным смесям: коэффициент фильтрации менее 0,001 м/сут и компрессия закладочного массива в наиболее нагруженной нижней части ствола 0,00 % [2, 3, 5]. Таким требованиям по компрессионным и фильтрационным свойствам соответствуют марочные бетоны на основе цемента, песка и щебня. Однако они имеют высокую стоимость, поэтому для закладки применять их экономически нецелесообразно.

На практике для закладки горных выработок целесообразно использовать значительно более дешевые бетонные смеси на основе отходов топливно-энергетической промышленности и альтернативного, например, известкового вяжущего.

Золошлаковые смеси (ЗШС) ТЭЦ являются трудно утилизируемым отходом. Гидроотвалы ЗШС ТЭЦ занимают значительные площади по всей территории РФ, только на территории Кемеровской области они превышают 1200 га, а заполненный объем превосходит 100 млн м³. Так как ЗШС ТЭЦ практически не утилизируются, все эти гидроотвалы необходимо рекультивировать. Рекультивация больших территорий требует больших трудовых и материальных затрат, поэтому целесообразно использование ЗШС ТЭЦ в любых отраслях промышленности, в том числе для закладки горных выработок. Утилизация ЗШС будет благотворно отражаться на экологии многих территорий.

Выполненный в КузГТУ анализ способов закладки выработанного пространства [6] показал, что все они разработаны для закладки горизонтальных и наклонных горных выработок, характеризуются высокой трудоемкостью и стоимостью за счет использования дорогостоящих закладочных материалов и технологических приемов и для закладки вертикальных выработок не пригодны.

Поэтому для закладки вертикальных выработок актуальным является разработка дешевого закладочного водоупорного и беззасадочного бетона на основе отходов топливно-энергетической промышленности и нецементного вяжущего.

Известно, что при автоклавной обработке бетонных золошлако-известковых смесей значительно улучшаются физико-механические свойства бетона. Себестоимость автоклавных материалов оказывается на 15...35 % ниже цементного бетона обычного способа твердения с аналогичными физико-механическими свойствами [7].

Настоящее исследование выполнялось с целью изучения компрессионных свойств автоклавного материала на основе дешевого вяжущего из молотой ЗШС ТЭЦ Кузбасса и извести и установления возможности его применения для закладки вертикальных горных выработок.

Химический состав ЗШС электростанций Кузбасса представлен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав золошлаковых смесей электростанций Кузбасса

Компонент	Химический состав золошлаковых смесей, %							
	Томусинская ГРЭС	Беловская ГРЭС	Южно-Кузбасская ГРЭС	Западно-Сибирская ГРЭС	Кузнецкая ТЭЦ	Кемеровская ГРЭС	Новокузнецкая ГРЭС	Кемеровская ТЭЦ
SiO ₂	57,40	55,90	59,30	59,90	54,50	49,10	58,40	55,80
Al ₂ O ₃	22,10	20,00	22,10	23,00	24,60	18,60	20,90	18,10
Fe ₂ O ₃	5,40	5,60	7,80	4,90	4,60	12,80	8,00	15,00
CaO	4,30	4,50	2,70	4,40	4,00	5,70	3,30	3,00
FeO	3,40	3,10	1,70	0,70	0,20	1,50	0,89	1,40
MgO	2,60	2,90	2,00	1,90	2,90	2,80	0,40	1,30
K ₂ O	2,60	2,80	0,30	2,30	0,00	0,20	0,00	0,00
SO ₃	1,03	0,89	0,44	0,62	2,06	1,05	1,56	1,05
Другие компоненты	1,17	4,31	3,66	2,28	7,14	8,25	6,55	4,35
Сумма	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Из приведенной таблицы видно, что химический состав ЗШС может существенно отличаться в зависимости от места их получения. Соответственно, при составлении рецептуры смеси нельзя оперировать абсолютными весовыми или объемными компонентами смеси. Для этого целесообразно использовать коэффициент основности $K_{осн}$, который характеризует способность смеси связываться в моносилкат кальция и рассчитывается по формуле

$$K_{\text{осн}} = \frac{\left((\text{CaO} + 0,93\text{MgO} + 0,6\text{R}_2\text{O}) - \right. \\ \left. - (0,55\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,35\text{Fe}_2\text{O}_3 + 0,7\text{SO}_3) \right)}{0,93\text{SiO}_2},$$

где $K_{\text{осн}}$ – коэффициент основности; $\text{CaO} + 0,93\text{MgO} + 0,6\text{R}_2\text{O}$ – общее (валовое) содержание «условной» CaO , %; $0,55\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,35\text{Fe}_2\text{O}_3 + 0,7\text{SO}_3$ – количество CaO , связываемой соответствующими окислами и не участвующей в образовании силикатов, %; $0,93\text{SiO}_2$ – количество CaO для связывания SiO_2 в моносилкат кальция, % [7].

В настоящее время кальциевая известь является основным сырьем для производства автоклавных материалов. Негашенная известь более активна по сравнению с гашеной. В процессе твердения происходит реакция гашения с выделением тепла, что снижает затраты на разогрев закладочного материала. В то же время при хранении и использовании негашенной извести необходимо соблюдать целый комплекс мероприятий по технике безопасности, срок хранения негашенной извести не превышает нескольких дней, для перемалывания негашенной извести требуются дополнительные затраты. В свою очередь, гашеная известь, обладая меньшей активностью, поскольку химически связанная вода значительно снижает механические свойства материала, требует большего расхода для получения материала с заданными свойствами. Известно, чем больше в извести свободного CaO , тем энергичнее идет процесс синтеза новообразований [7]. Предварительные исследования показали, что использование кальциевой извести второго и третьего сортов не обеспечивает необходимых компрессионных свойств автоклавного материала, при этом компрессионные свойства одинаковых образцов изменялись в значительных пределах. Результаты тестирования образцов по компрессии при давлении 12,5 МПа представлены в табл. 2.

Для проведения основных испытаний ЗШС из гидроотвала Кемеровской ТЭЦ и негашеную кальциевую известь первого сорта измельчали в шаровой мельнице так, чтобы крупность частиц не превышала 0,16 мм. Химический состав ЗШС принимали согласно табл. 2. Состав используемой негашенной извести первого сорта: CaO – 94,00 %, MgO – 1,99 %, SiO_2 – 1,00 %, Al_2O_3 – 1,05 %, Fe_2O_3 – 1,07 %, SO_3 – 0,5 %, другие компоненты – 0,39 %.

Известно, что на физико-механические свойства автоклавных материалов оказывает влияние продолжительность подъема давления водяного пара, однако ее влияние на компрессионные свойства автоклавных материалов изучено слабо.

Максимальную продолжительность подъема давления водяного пара принимали 4,5 ч. Шаг изменения продолжительности подъема давления составлял 1,5 ч, кроме минимального значения. Минимальное значение продолжительности подъема давления составляло 0,75 ч. Это связано с тем, что на разогрев большого массива требуются значительные временные ресурсы. Пропаривание закладоч-

ного материала будет производиться через инъекторы, расположенные внутри этого материала. Увеличение расстояния между инъекторами, и соответственно снижение их стоимости приведет к увеличению продолжительности подъема давления водяного пара. Так как для закладки вертикальных горных выработок используют материалы с низким комплексом эксплуатационных свойств, то любое даже незначительное их понижение может сделать эти материалы непригодными для закладки. Следовательно, необходимо провести комплекс исследований по изучению влияния продолжительности подъема давления водяного пара на компрессионные свойства закладочного материала. Минимальная продолжительность подъема давления связана с необходимостью разогрева массива паром.

Таблица 2. Результаты тестирования образцов различной основности по компрессии (%) при давлении 12,5 МПа

$K_{\text{осн}}$	Сорт извести		
	III	II	I
0,7	5,34	10,15	0,00
0,7	16,92	8,69	0,00
0,7	10,18	20,33	0,00
0,8	10,5	17,43	0,00
0,8	12,36	12,91	0,00
0,8	16,41	7,16	0,00
0,9	12,4	7,46	0,00
0,9	15,22	5,24	0,00
0,9	11,77	14,23	0,00
1,0	7,53	10,3	0,00
1,0	6,52	7,46	0,00
1,0	0,14	4,15	0,00
1,1	3,12	5,12	0,00
1,1	4,78	2,11	0,00
1,1	7,14	2,45	0,00

На физико-механические свойства автоклавных материалов оказывают влияние и другие параметры их автоклавной обработки: продолжительность предавтоклавной выдержки (принимали 4 ч), продолжительность выдержки при максимальном давлении (принимали 6 ч), продолжительность спуска давления (принимали 5 ч), максимальное давление водяного пара (0,9 МПа), а также параметры смеси, которые при исследовании принимали следующими: тип извести (негашенная кальциевая известь первого сорта); степень дисперсности составляющих вяжущего (фракция «–0,16»); водовяжущее отношение – 0,5. Один из важных параметров смеси – коэффициент основности $K_{\text{осн}}$ – первоначально принимали по результатам предварительных исследований $K_{\text{осн}}=0,7$ и изменяли в дальнейшем для выявления зависимостей.

Максимальное давление водяного пара – 0,9 МПа обусловлено тем, что при меньшем давлении автоклавный синтез не происходит, а создание в вертикальной горной выработке большего давления затруднительно.

При проведении лабораторных испытаний образцы изготавливали в лабораторном автоклаве АЛ, предназначенном для проведения физико-химических обработок различных веществ и материалов нейтральными, кислыми и щелочными растворами при повышенной температуре и под давлением.

Автоклав АЛ представляет собой замкнутый цилиндрический сосуд с крышкой, обеспечивающей герметичность аппарата в рабочем состоянии, изготовленный из кислотоупорной стали. Под наружным металлическим кожухом автоклава уложена электрическая обмотка, изолированная асбестом, концы ее выведены наружу к клеммам для подключения к сети. Нагревательный элемент автоклава через реостат подключается к сети 220 В.

Крышка автоклава съемная, крепится к фланцу корпуса автоклава болтами. Между крышкой и фланцем корпуса проложена паронитовая прокладка. В крышку вмонтированы карман для термометра, колонка, на которой установлен манометр, и сдвучный вентиль.

Обработку вели по заданному температурному графику. Подъем и снижение температуры регулировали с помощью реостата. Давление контролировали с помощью манометра, установленного на автоклаве.

Для определения относительной деформации испытание автоклавного материала производили методом компрессионного сжатия в соответствии с ГОСТ 12248-96 [8]. Эту характеристику определяли по результатам испытаний образцов в компрессионном приборе (одометре), исключающем возмож-

ность бокового расширения образца при его нагружении вертикальной нагрузкой.

В состав установки для испытания автоклавного материала в условиях компрессионного сжатия входили: компрессионный прибор, состоящий из рабочего кольца с внутренним диаметром 71 мм, перфорированного вкладыша под рабочее кольцо; гидравлический пресс для вертикального нагружения образца; индикатор часового типа с ценой деления 0,01 мм для измерения вертикальных деформаций образца.

Предварительные испытания показали, что средняя плотность золошлако-известковых автоклавных материалов не превышает 1250 кг/м³. При глубине стволов до 1000 м максимальное давление для определения компрессионных свойств автоклавных материалов 12,5 МПа, такой вариант возможен при отсутствии сцепления закладочного массива с крепью ствола.

В соответствии с ГОСТ 12248-96 [8] нагружение производили ступенями. Величину ступени принимали 0,1 МПа. Каждую ступень нагружения прикладывали до условной стабилизации деформации образца, за критерий которой принимали скорость деформации образца, не превышающую 0,01 мм за последние 10 мин наблюдений. Деформацию образца измеряли индикатором часового типа.

С целью определения минимального числа испытаний одинаковых образцов, а также для дальнейшего планирования экспериментальных исследований были выполнены испытания десяти однотипных образцов [9]. Испытания показали, что необходимое количество одинаковых образцов для

Таблица 3. Результаты испытания образцов с коэффициентом основности $K_{осн}=0,6$

Продолжительность подъема давления, ч	Давление, МПа	Компрессия, %										
		Номер образца										Среднее значение
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	7,50	0,75	0,25	0,70	0,40	1,10	0,58	0,55	0,90	0,75	0,80	0,68
	10,00	3,40	3,35	3,35	3,25	4,60	3,30	3,75	4,00	3,85	4,10	3,70
	12,50	7,10	6,45	7,05	6,55	6,95	6,90	6,60	6,65	6,75	6,80	6,78
1,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2,50	0,35	0,25	0,15	0,05	0,05	0,60	0,10	0,15	0,25	0,55	0,25
	5,00	3,80	3,65	3,55	3,10	2,85	4,55	2,60	3,25	3,05	4,30	3,47
	7,50	6,70	7,00	7,25	7,35	6,25	7,95	5,80	6,25	6,50	7,50	6,86
	10,00	9,70	9,40	10,25	10,40	9,25	10,65	9,00	9,00	9,40	10,30	9,74
	12,50	12,90	12,55	13,40	13,50	12,80	13,25	12,90	12,30	12,45	13,00	12,91
3,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	5,00	1,95	2,30	1,50	0,90	1,35	1,65	1,05	1,25	1,10	1,05	1,41
	7,50	6,05	6,75	5,70	5,00	5,55	6,05	6,10	6,15	6,05	5,60	5,90
	10,00	10,60	10,90	10,10	9,65	10,30	11,00	11,15	11,10	11,25	10,20	10,63
	12,50	14,40	14,30	13,85	13,45	14,45	15,05	14,75	14,65	14,95	14,20	14,41
4,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2,50	0,00	0,05	0,00	0,00	0,10	0,00	0,15	0,05	0,00	0,00	0,04
	5,00	6,65	7,00	5,70	6,05	5,85	6,00	7,30	5,95	6,00	6,00	6,25
	7,50	11,85	12,40	11,15	11,40	11,15	12,55	12,55	11,00	11,00	11,15	11,62
	10,00	15,55	16,70	14,80	15,20	14,75	16,88	16,50	14,50	14,70	15,20	15,48
	12,50	18,80	19,65	18,30	18,85	18,40	19,65	19,55	18,05	18,00	18,75	18,80

точности полученного результата, равной 10 %, составляет $n=6,78 \pm 2,87$. В дальнейшем в каждой серии экспериментов ограничивались десятью образцами [9].

Если не обнаруживалась деформация сжатия образцов, то состав смеси изменяли таким образом, чтобы значение коэффициента основности снижалось с шагом 0,1. После получения безусадочного материала или при определении минимального значения коэффициента основности, при котором образцы не сжимались, изменяли исследуемый параметр автоклавной обработки.

Фрагмент результатов испытаний представлен в табл. 3. Компрессия образцов, испытанных при давлении 12,5 МПа, представлена в табл. 4.

Таблица 4. Компрессия образцов, испытанных при давлении 12,5 МПа

Продолжительность подъема давления, ч	$K_{осн}$	Компрессия, %
0,75	0,7	0,00
0,75	0,6	6,78
1,50	0,7	0,00
1,50	0,6	12,91
3,00	0,7	0,00
3,00	0,6	14,41
4,50	0,7	0,00
4,50	0,6	18,80

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Исаенко А.В. Проблема ликвидации вертикальных вскрывающих выработок // Проблемы геологии и освоения недр: Труды VI Междунар. симпозиума студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященного 100-летию со дня рождения Засл. деятеля науки РСФСР Л.Л. Халфина и 30-летию проведения научных конференций им. акад. М.А. Усова. – Томск: Изд-во НЛТ, 2002. – С. 383–384.
- РД 07-291-99. Инструкция о порядке ведения работ по ликвидации и консервации опасных производственных объектов, связанных с использованием недр. – М.: ГУП «НТЦ "Промышленная безопасность"», 2002. – 17 с.
- Отраслевая инструкция о порядке ликвидации и консервации предприятий по добыче угля (сланца) / И.Ф. Петров, В.С. Зимич, А.М. Навитный и др. – М.: ИПКОН РАН, 1997. – 27 с.
- Лудзиш В.С. Гидрогеологические проблемы ликвидации шахт Кузбасса и пути их решения / ЭКО-бюллетень ИнЭКА № 6 (137), ноябрь 2009/январь 2010 г. – Новокузнецк: ООО «ИнЭКА-консалтинг», 2010. – С. 44–47.
- Бронников Д.М. и др. Закладочные работы в шахтах / под ред. Д.М. Бронникова, М.Н. Цыгало. – М.: Недра, 1989. – 400 с.
- Исаенко А.В. Обоснование и разработка технологии закладки вертикальных горных выработок горелыми породами, упрочненными вяжущим: дис. ... канд. техн. наук. – Кемерово, 2006. – 176 с.
- Боженев П.И. Технология автоклавных материалов. – Л.: Стройиздат, 1978. – 368 с.
- ГОСТ 12248-96. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – Взамен ГОСТ 12248-78, ГОСТ 17245-79, ГОСТ 23908-79, ГОСТ 24586-90, ГОСТ 25585-83, ГОСТ 26518-85; введ. 1991-01-01. – М.: Стройиздат, 1996. – 64 с.
- Ашмарин И.П., Васильев И.Н., Амбросов В.А. Быстрые методы статистической обработки и планирование экспериментов. – Л.: ЛГУ, 1975. – 76 с.

Поступила 17.01.2011 г.