

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akhavan J. The Chemistry of Explosives. – Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2004. – 180 p.
2. Альтшулер Л.В., Трунин Р.Ф., Урлин В.Д., Фортов В.Е., Фунтиков А.И. Развитие в России динамических методов исследований высоких давлений // Успехи физических наук. – 1999. – Т. 169. – № 3. – С. 323–344.
3. Лисицын В.М., Олешко В.И., Журавлев Ю.Н., Федоров Д.Г., Ципилев В.П. Деформационный механизм взрывного разложения азидов тяжелых металлов при импульсном воздействии // Химия высоких энергий. – 2006. – Т. 40. – № 4. – С. 259–264.
4. Лисицын В.М., Журавлев Ю.Н., Федоров Д.Г. Влияние деформаций на электронное строение азидов серебра // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 2. – С. 115–121.
5. Лисицын В.М., Журавлев Ю.Н. Структурные фазы азидов серебра // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 2. – С. 138–143.
6. Журавлев Ю.Н., Лисицын В.М. Ударно-деформационный механизм инициирования взрывного разложения азидов серебра при импульсном электронном и лазерном воздействии // Известия вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 1/2. – С. 259–264.
7. Perdew J.P., Wang Y. Accurate and simple analytic representation of the electron gas correlation energy // Phys. Rev. B. – 1992. – V. 45. – P. 13244.
8. Dovesi R., Saunders V.R., Roetti C., Orlando R., Zicovich-Wilson C.M., Pascale F., Civallezi B., Doll K., Harrison N.M., Buch I.J., D'Arco Ph., Liunell M. CRYSTAL 09 User's Manual. Torino: University of Torino, 2010.
9. Интернет-ресурс. 2011. URL: www.crystal.initio.it/Basic_Set/ptable.html (дата обращения: 28.03.2011).
10. Birch, F. Finite strain isotherm and velocities for single-crystal and polycrystalline NaCl at high pressures and 300 K // J. Geophys. Res. – 1978. – V. 83. – P. 1257–1268.
11. Молодец А.М. Обобщенная функция Грюнайзена для конденсированных сред // Физика горения и взрыва. – 1995. – Т. 31. – № 5. – С. 132–133.
12. Anderson O.L. Equations of State of Solids for Geophysics and Ceramic Science. – N.Y.: Oxford University Press, 1995. – 281 p.
13. Guo G., Wang Q., Mak T.C.W. Structure refinement and Raman spectrum of silver azide. // J. Chem. Crystal. – 1999. – V. 29. – № 5. – P. 561–564.
14. Bryant J., Brooks R. Vibrational spectrum and analysis. Silver Azides crystals // J. Chem. Phys. – 1971. – V. 54. – № 2. – P. 5315–5323.
15. Zhu W., Xiao H. First-principles study of structural and vibrational properties of crystalline silver azide under high pressure // J. Solid State Chem. – 2007. – V. 180. – P. 3521–3528.

Поступила 28.03.2011 г.

УДК 621.315.61

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ РАЗРЯДА НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ТВЕРДЫХ СЛОИСТЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПРИЛОЖЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В.И. Меркулов, О.В. Карпицкий

Томский политехнический университет
E-mail: mir742@enin.tpu.ru

Исследовано развитие разряда на границе раздела твердых слоистых композиционных диэлектриков от времени воздействия приложенного переменного напряжения в системе электродов, создающих неравномерное электрическое поле. Установлено наличие трех этапов в развитии разряда на границе раздела исследуемых слоистых композиционных диэлектриков в зависимости от времени приложения напряжения.

Ключевые слова:

Композиционные материалы, слоистые диэлектрики, пробой.

Key words:

Composite materials, layered dielectrics, breakdown.

В настоящее время в качестве электрической изоляции высоковольтных конструкций (вводов, трансформаторов, электрических машин и др.) широко применение находят композиционные материалы, имеющие слоистую структуру. Это различные стекло и лакоткани, синтофлекс, изофлекс, стекломиканит, текстолит, гетинакс и многие другие. Под воздействием электрического поля в таких материалах, наряду с нормальной составляющей напряженности электрического поля будет значительная тангенциальная составляющая. В случае неоднородного электрического поля за счет наличия тангенциальной составляющей напряженности развитие разряда может происходить вдоль слоев такой изоляции или на границе раздела их с другим диэлектриком [1, 2].

В работе [1] было показано, что при кратковременном (непрерывно возрастающем) напряжении развитие разряда на границе раздела таких слоистых композиционных материалов могло протекать по трем возможным направлениям. В первом случае, при толщине исследуемого материала не более 50 мкм, наблюдался пробой исследуемого материала и выход канала разряда на его поверхность. В других случаях, при толщине исследуемого материала порядка 100 мкм и более, развитие разряда могло происходить на границе раздела исследуемых материалов с подложкой или с эффектом заглубления канала разряда в исследуемый диэлектрик. При испытании на постоянном токе развитие разряда также происходило на границе раздела отдельных слоев композиции, но сопровождалось

разогревом клеящего лака и расслоением диэлектрика.

В данной работе проводилось исследование развития разряда на границе раздела различных композиционных материалов при длительном воздействии приложенного переменного напряжения частотой 50 Гц. Испытания проводились в системе электродов игла – игла, создающих резконебалансное электрическое поле. В качестве образцов использовалась комбинация из различных диэлектрических материалов (стеклотекстолит, стекломиканит, стеклолакоткань, изофлекс, синтофлекс, Votastop 2235, Votafix® E 2102, полиэтилентерефталатная пленка (ПЭТФ) и др.), наклеиваемых на подложку из полиметилметакрилата (ПММА) толщиной 3 мм с помощью эпоксидного компаунда холодного отверждения на основе смолы ЭД6 и отвердителя – полиэтиленполиамин. Количество образцов на точку составляло не менее 5. В промежутке между пластинками разных материалов размером $50 \times 100 \text{ мм}^2$ (на границе их раздела с подложкой) располагались электроды игла – игла на расстоянии 20 мм. Чтобы исключить образование воздушных прослоек и обеспечить ровную склеиваемую поверхность материала с подложкой в ней делались специальные проточки, в которые утапливались иглы. В качестве игл использовались швейные иглы RTB 14539, имеющие радиус закругления порядка 50...70 мкм. Радиус закругления игл определялся с помощью горизонтального компаратора ИЗА-2 с точностью $\pm 0,5 \text{ мкм}$. На подготовленные, таким образом, образцы подавалось возрастающее ступенчато переменное напряжение частотой 50 Гц с шагом 1 кВ каждый час. Начальное приложенное напряжение составляло 10 кВ, что соответствовало значению $0,5 U_{\text{разр}}$.

В результате проведенных исследований установлено, что после приложения к образцам напряжения начало развития разряда имеет локальный характер и, как правило, наблюдается в области расположения острия игл, т. е. в области с наибольшей напряженностью электрического поля (рис. 1). Как видно из рис. 1, развитие разряда сопровождается образованием дендритов шарообразной формы, наибольший размер которых имеет место у острия с меньшим радиусом кривизны.

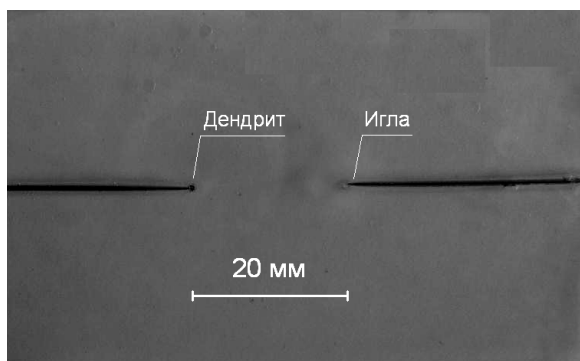


Рис. 1. Начальный этап развития разряда после приложения напряжения к образцу композиции ПММА – ПЭТФ

Нами было предположено, что образование дендритов шарообразной формы связано с развитием ионизации в области расположения острия игл. Для проверки данного предположения проводилось измерение напряжения начала ионизации перед испытаниями. Измерение характеристик частичных разрядов проводилось по методике [3] с помощью электронно-счетного частотомера и осциллографа с чувствительностью 0,01 В/мм. Измерения показали, что напряжение начала ионизации для исследуемых образцов составляло порядка 3...5 кВ, что соответствовало напряженности электрического поля у острия игл порядка $(4,8...8,0) \cdot 10^7 \text{ В/м}$ при радиусе иглы 40 мкм. Расчет напряженности электрического поля на острие иглы производился по уравнению [4, 5]

$$E = \frac{Uc}{(c^2 - x^2) \operatorname{arctg}\left(\frac{d}{c}\right)},$$

где $c=d+r$, а расстояние от острия иглы $x=d$. Здесь d – расстояние между иглами; r – радиус острия игл; U – приложенное напряжение.

При увеличении времени воздействия приложенного напряжения дальнейшее развитие разряда практически прекращается. Можно предположить, что образование разрядных структур в виде шарообразных дендритов приводит к уменьшению напряженности электрического поля в местах их расположения и замедлению дальнейшего развития разряда при неизменном значении приложенного напряжения.

Следует отметить, что в ряде случаев начало развития разряда и образование дендритов шарообразной формы могло наблюдаться на некотором расстоянии от острия иглы (рис. 2). По-видимому, это связано с неровностью поверхности самих игл или с наличием каких-то загрязнений в составе клеящего лака композиции.

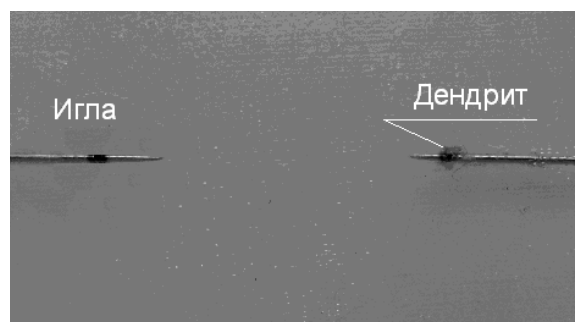


Рис. 2. Начальный этап развития разряда после приложения напряжения к образцу композиции ПММА – стеклолакоткань

Заторженное состояние разряда могло длиться достаточно долго и только при постоянном (ступенчато) подъеме напряжения наблюдался дальнейший рост каналов разряда. При этом характер развития разряда в зависимости от материала композиции может протекать по-разному. Так в композиции ПММА – стеклолакоткань развитие раз-

ряда сопровождалось увеличением размеров дендритов шарообразной формы в области острия игл (рис. 3). Такая же картина чаще всего имела место и в композициях ПММА – синтофлекс 828, ПММА – синтофлекс 616 и ПММА – Votafix® E 2102.

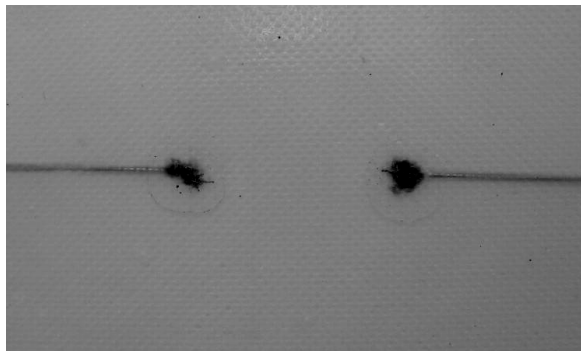


Рис. 3. Развитие разряда в композиции ПММА – стеклолакоткань при увеличении уровня воздействующего напряжения

В композиции ПММА – слюдопласт развитие разряда сопровождалось образованием ветвистых каналов дендрита на границе раздела (а), которые при дальнейшем увеличении напряжения приобретали древовидную форму (б), рис. 4.

Анализ скорости развития каналов дендрита в данной работе не рассматривался, т. к. данный

вопрос достаточно хорошо изучен и описан в литературе [6, 7].

Увеличение времени воздействия и уровня приложенного напряжения приводит к дальнейшему развитию разряда на границе раздела, характер которого по-прежнему может протекать по-разному в разных композициях. Так в композиции ПММА – стеклолакоткань, разряд развивается в форме шарообразного дендрита (а), который сопровождается образованием трекового канала с последующим выходом канала разряда на поверхность материала или трековых каналов (б),двигающихся навстречу друг другу от одной иглы к другой (рис. 5).

В композициях ПММА – синтофлекс 828, ПММА – синтофлекс 616, ПММА – Votafix® E 2102, ПММА – ПЭТФ, ПММА – имидофлекс, ПММА – Votastop 2235 после образования шарообразного дендрита наиболее часто происходит пробой исследуемого материала и выход канала разряда на его поверхность (рис. 6).

Другим примером является развитие разряда в композиции ПММА – изофлекс, когда после образования шарообразного дендрита практически всегда наблюдается развитие трекового канала в толще исследуемого материала на границе раздела полиимидных пленок и клеящего лака или наблюдается пробой пленок и выход канала разряда на поверхность при дальнейшем повышении уровня приложенного напряжения (рис. 7).

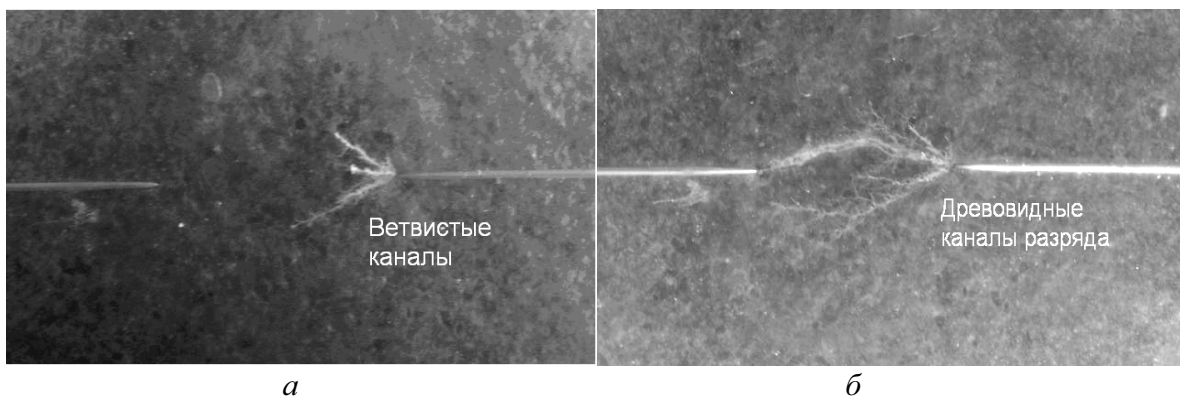


Рис. 4. Ветвистые (а) и древовидные (б) каналы разряда в композиции ПММА – слюдопласт

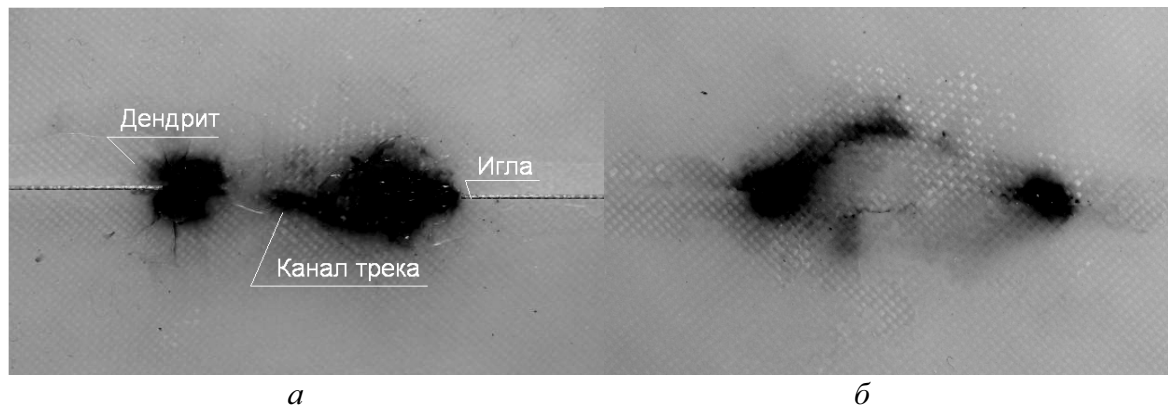


Рис. 5. Рост шарообразного дендрита (а) и образование канала трека (б) на границе раздела слоев в композиции ПММА – стеклолакоткань

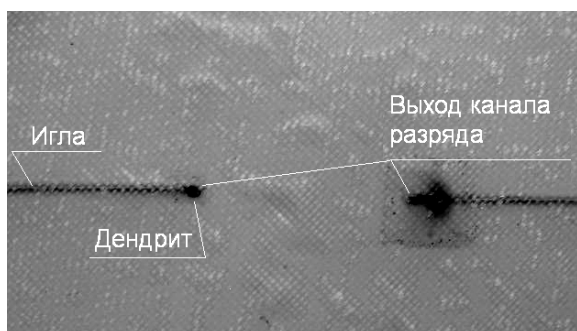


Рис. 6. Пробой исследуемого материала и выход канала разряда на его поверхность в композиции ПММА – синтофлекс 616

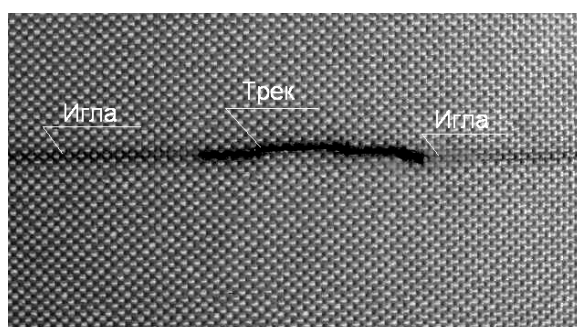


Рис. 7. Развитие трекового канала на границе раздела слоев в композиции ПММА – изофлекс

Характеристики исследуемых композиционных материалов [8, 9] и результаты их испытаний по оценке времени развития разряда и величины

разрядного напряжения приведены в табл. Из таблицы видно, что наименьшее разрядное напряжение наблюдалось в образцах композиции из стеклолакоткани. В остальных исследуемых материалах величина разрядного напряжения изменяется в пределах 21...28 кВ. Корреляции между величиной разрядного напряжения, временем развития разряда и диэлектрическими характеристиками исследуемых материалов не прослеживается. Можно предположить, что это обстоятельство связано с применением в исследуемых материалах в качестве связующего эпоксидной или фенолформальдегидной смол, которые близки по диэлектрическим характеристикам.

Учитывая постоянство и неизменность разрядного расстояния в образцах, можно предположить, что наблюдаемый разброс значений разрядного напряжения и времени развития разряда связан с различием толщин исследуемых материалов и радиусов острий игл.

Выводы

1. Развитие разряда в слоистых композиционных материалах в резконеоднородном электрическом поле при длительном воздействии приложенного напряжения происходит в три этапа: образование дендритов шарообразной формы у острия игл при напряжении порядка половины разрядного; промежуточное состояние, когда развитие разряда приостанавливается; дальнейшее развитие разряда при достижении напряжения, близкого к разрядному.

Таблица. Характеристики исследуемых композиционных материалов [8, 9] и результаты их испытаний

Исследуемый материал	Состав	Среднее разрядное напряжение, кВ	Среднее время до развития разряда, мин	Толщина, мкм	Диэлектрическая проницаемость
Стеклолакоткань	Стеклоткань с эпоксидно-фенолформальдегидным связующим	14,17	1473	175...200	5,16
Стеклолакоткань	Стеклоткань с эпоксидно-фенолформальдегидным связующим	15,35	1228	200...210	5,15
Полиэтилен-рефталат (лавсан)	Пленка полиэтиленрефталата без связующего	21,83	1210	75...80	3,55
Синтофлекс 616	Трехслойная композиция из полиэфирной пленки, оклеенной с двух сторон полиэфирно-арамидной бумагой	21,2	1299	450...500	2,95
Votafix® E 2102	Тонкая стеклоткань с высоким содержанием эпоксидной смолы в качестве связующего	22,0	975	150...180	5,09
Синтофлекс 828	Трехслойная композиция из полиимидной плёнки, оклеенной с двух сторон арамидной бумагой	22,25	1046	250...280	2,62
Слюдопласт (ГИП 2)	Гибкий прессованный материал из стеклоткани и нескольких слоев слюдопластовой бумаги, оклеенных с двух сторон полиэфирной пленкой с использованием термореактивного связующего	28,85	1301	450...500	4,07
Изофлекс 191	Композиционный материал из стеклоткани, оклеенной с двух сторон полиэфирной пленкой с использованием термореактивного связующего	25,15	1076	270...300	3,10
Votastop 2235	Слюдяная бумага на основе мусковита, пропитанная термореактивной эпоксидной смолой	26,8	1531	280...300	4,95
Имидофлекс 292	Композиционный материал из стеклоткани, оклеенной с двух сторон полиимидной пленкой с использованием эпоксидно-каучукового связующего	27,0	1286	175...200	3,92

- 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 сопровождается заглуплением 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.
- Гефле 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