

Поиск надежных диэлектрических материалов для электродных систем установок электроразрядного шпурового разрушения

А. Р. Ризун, Т. Д. Денисюк, А. Н. Рачков

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина
e-mail: iipt@iipt.com.ua

Исследованы физико-механические и диэлектрические свойства изоляторов для электрогидроимпульсных электродных систем с целью повышения устойчивости их элементов, находящихся в зоне плазменного канала разряда, при электроразрядах с высоким энергетическим потенциалом.

Ключевые слова: электродная система, механическая прочность и температурная устойчивость изоляционных материалов, импульсная электрическая прочность диэлектриков, напряженность поля.

УДК 621.3.03:537.5:622.236

Электроразрядная импульсная технология разрушения (ЭРИТР) относится к новым перспективным разработкам, обеспечивающим высокую чистоту производства и производительность со сравнительно низкими затратами энергии. Особенно востребованным является использование электроразрядов для разрушения неметаллических материалов высокой прочности, в том числе железобетона, кирпичных фундаментов, скал, донных грунтов и др. [1, 2]. Для обеспечения эффективности ЭРИТР возникла необходимость в разработке надежных электродных систем (ЭС), которые состоят из анода, катода и разделяющего их изолятора. Электроразрядное разрушение крупных объектов выполняется по схеме шпурового разрушения. В этом случае ЭС находятся в закрытом объеме шпура, заполненного водой, и испытывают действия высокой температуры и давления, генерируемых в канале разряда (рис. 1).

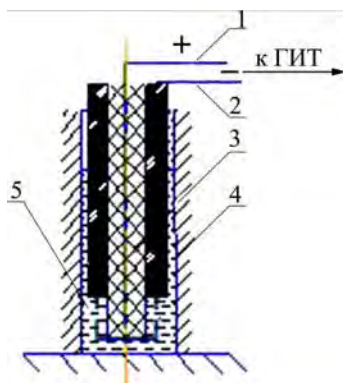


Рис. 1. Электродная система в шпуре. 1 – анод; 2 – катод; 3 – изолятор; 4 – шпур; 5 – канал разряда.

Средний статистический ресурс ЭС используемого электроразрядного оборудования шпуро-

вого разрушения с напряжением накопительного блока 6 и 10 кВ составляет не более 200 разрядов, что является сдерживающим фактором его широкого внедрения [3–5].

Кроме того, с целью расширения возможностей повышения мобильности и эффективности оборудования возникла потребность значительного снижения его массогабаритов за счет уменьшения количества емкостных накопителей, увеличения напряжения до 25 кВ и использования инициирования разрядов высокоэнергетическими смесями (ВЭС). Такие преобразования потребовали поиска надежных диэлектриков, определяющих надежность не только ЭС, но и всего оборудования.

Цель настоящей работы – поиск материалов с высокими показателями физико-механических и диэлектрических свойств для ЭС, обеспечивающих высокую надежность элементов при воздействии высоких температур и давлений, генерируемых электроразрядами в замкнутом объеме шпурового разрушения.

Объем экспериментов в поисках надежных изоляционных материалов для ЭС разделен на три части: испытания изоляционных материалов на воздействие высоких температур и динамические нагрузки; испытания диэлектриков на пробой; испытания изоляции ЭС в работе с инициированием разрядов ВЭС.

ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯТОРОВ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР И ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Для проведения исследований разработан экспериментальный стенд, состоящий из генера-

Таблица 1. Техническая характеристика экспериментального стенда

Наименование параметра	Значения
Емкость, мкФ	от 2,0 до 20,0
Рабочее напряжение, кВ	от 25,0 до 50,0
Частота следования импульсов, Гц	2,0
Индуктивность, Гн	$4 \cdot 10^{-6}$

Таблица 2. Физико-механические и электрические свойства образцов

Образцы	Плотность, кг/м ³	Твердость по Бринеллю, МПа	Температура плавления, °С	Электрическая прочность, кВ/мм	Тепловое сопротивление, Ом·м	Относительная диэлектрическая проницаемость
Полиэтилен	900,0÷930,0	14,0÷25,0	105,0÷108,0	30,0÷60,0	3,0÷4,0	2,28÷2,33
Кремний органическая резина	962,0	12,0÷15,0	108,0	15,0÷40,0	5,0÷7,0	3,0÷3,5
Фторопласт-4	2150,0÷2240,0	30,0÷40,0	327,0	20,0÷100,0	5,0÷8,0	2,02÷2,1
Полипропилен	910,0	40,0÷70,0	164,0÷170,0	40,0÷60,0	9,0	3,25
Кремний органический полимер – силикон	970,0	10,0÷14,0	103,0	20,0÷50,0	5,0÷6,0	2,8÷3,0

тора импульсных токов (ГИТ) с параметрами, представленными в табл. 1, и технологического узла, включающего разрядную камеру и оснастку для укладки испытательных образцов материалов (рис. 2).

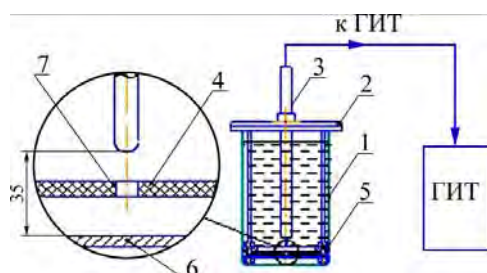


Рис. 2. Экспериментальный стенд. 1 – корпус камеры; 2 – крышка камеры; 3 – электрод; 4 – испытуемый образец; 5 – оснастка; 6 – противоэлектрод; 7 – отверстие в образце.



Рис. 3. Образцы для испытаний. 1 – отверстие для крепления; 2 – технологическое отверстие.

В качестве объектов исследований отобраны полимеры с наиболее высокими физико-механическими и электрическими характеристиками (табл. 2) [6], из которых изготовлены диски диаметром 100 мм и толщиной 1 мм с центральным отверстием диаметром 9 мм (рис. 3). Образцы поочередно устанавливались на дно разрядной камеры и закреплялись таким образом, чтобы канал разряда проходил сквозь отверстие,

обеспечивающее проходную зону первоначального расширения канала разряда.

Каждый образец испытывался при одинаковых параметрах ГИТ. Камера заполнялась водой и закрывалась крышкой, создавая таким образом замкнутый объем. Электрод подключался к ГИТ и производились разряды от активной части токоведущего стержня электрода на пластинчатый противоэлектрод. Канал разряда, проходя через центральное отверстие, оказывал быстродействующее температурное и динамическое воздействия на образец. После каждого пяти импульсов оснастка извлекалась, производился визуальный осмотр образцов с использованием оптических инструментов. При обнаружении на поверхности образца трещин, отколов или оплавления краев отверстия на величину свыше 3 мм испытания прекращались. При отсутствии появления дефектов испытания производились до 100 импульсов. Результаты исследований занесены в табл. 3.

Образцы из полиэтилена разрушились в самом начале испытаний ввиду высокой хрупкости. Фторопласт оказался более устойчивым к динамическим нагрузкам и воздействию высокой температуры, чем полиэтилен. Разрушение образцов из фторопласта произошло с образованием радиальных трещин по периметру отверстия. Образцы из силикона, имеющие более высокую вязкость, выдержали динамическую нагрузку, но произошло оплавление по периметру отверстия в результате более низкой температуры плавления материала. Лучшие показатели по механической прочности и температурной устойчивости имеет полипропилен.

Таблица 3. Результаты термодинамических испытаний образцов пластмасс

Материал	Параметры разрядного контура		Результаты визуального осмотра
	U, кВ	n, имп.	
Полиэтилен	50	20	Материал полностью разрушился
Кремний органическая резина	50	10	Материал не разрушен, оплавление кромок по контуру отверстия на глубину до 5 мм
Фторопласт-4	50	100	В материале образовались две трещины размерами 40 и 20 мм
Полипропилен	50	100	Материал не разрушен, оплавление кромок по контуру отверстия на глубину не более 1 мм
Кремний органический полимер – силикон	50	100	Материал оплавился в области краев до 150 мм

ИСПЫТАНИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ НА ПРОБОЙ

Для проверки электрической прочности на пробой диэлектрических материалов в условиях рабочего напряжения 25 кВ и импульсных нагрузок электроразрядов, инициированных ВЭС, проведены исследования на том же экспериментальном стенде (рис. 2). Для испытаний использованы такие же образцы, что и в первой части, но без центрального отверстия. Величина подаваемого электрического напряжения составляла до 50 кВ, что почти в два раза превышает рабочее напряжение электроразрядных установок по разрушению. Пробой фиксировался прибором АИИ-70М. Проверка диэлектрических материалов на пробой проводилась электроразрядами с разрядным промежутком от 0,035 до 0,07 м и напряженностью электрического поля активной зоны $7,2 \cdot 10^5$ кВ/мм.

Результаты испытаний представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты испытаний исследуемых диэлектриков на пробой

Материал (образцы)	Электрическая прочность, кВ/мм
Полиэтилен	40,0
Кремнийорганическая резина	32,0
Фторопласт-4	46,0
Полипропилен	48,0
Кремнийорганический полимер – силикон	35,0

Исходя из экспериментально полученных результатов исследований электрической прочности, в качестве диэлектрика можно использовать любой из пяти материалов, но по испытаниям на динамическую прочность и воздействию высоких температур для производства электродных систем в качестве изоляторов предпочтительнее использование полипропилена.

ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭС В РАБОТЕ С ИНИЦИИРОВАНИЕМ РАЗРЯДОВ ВЭС

На практике для разрушений прочных грунтов требуется энергия разрядов 100 кДж и более.

Такую энергию без изменения рабочего напряжения 25 кВ можно получить двумя способами: за счет увеличения емкости (количества емкостных накопителей) или посредством инициирования разрядов ВЭС. Первый способ ведет к увеличению массы оборудования, его себестоимости. Второй способ обеспечивает мобильность оборудования за счет небольших массогабаритов и характеризуется значительно меньшими удельными затратами энергии.

В качестве ВЭС использована смесь порошка Al – 40% и селитры – 60%. В работах [7, 8] установлена зависимость величины энергии, необходимой для разрушения, от прочности материалов и количества ВЭС для генерации энергии (табл. 5).

Таблица 5. Зависимость величины энергии, необходимой для разрушения, от количества ВЭС и прочности материалов

Прочность материала, МПа	Требуемая энергия, кДж	Масса ВЭС, кг · 10 ⁻³
20,0	20,0	1,6
30,0	62,0	6,0
40,0	100,0	8,0
50,0	150,0	16,0
70,0	220,0	24,0
100,0	500,0	32,0

С увеличением энергии разряда, инициированного ВЭС, при неизменной напряженности поля $7,2 \cdot 10^5$ В/м увеличиваются термодинамические нагрузки на изолятор ЭС.

Для исследований надежности изоляции ЭС из полипропилена установлено начальное расчетное значение его сечения δ . Исходя из электрической прочности диэлектрика 48 кВ/мм, величины энергии накопителей 6 кДж и напряжения 25 кВ, его величина равна 0,52 мм. Для разрушения высокопрочного материала, например грунта прочностью 40 МПа, требуется энергия 100 кДж (табл. 5), что в 16,7 раза превышает энергию накопителей. Таким образом, сечение изолятора δ для этого случая составляет 8,7 мм.

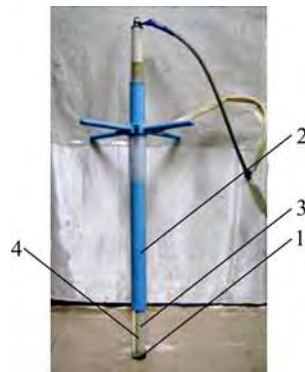


Рис. 4. Электрод. 1 – анод; 2 – катод; 3 – изолятор; 4 – капсула с ВЭС в канале разряда.



(а)



(б)



(в)

Рис. 5. Испытания ЭС на бетонном блоке. (а) – бетонный модельный блок; (б), (в) – этапы разрушения модельного блока.

На основании полученных результатов разработан образец электрода (рис. 4).

Следует отметить, что ЭС для электроразрядов, инициируемых ВЭС, испытывают большие нагрузки от давлений в процессе горения ВЭС. Активная часть электрода находится в зоне сжатия и при взрывном горении ВЭС, кроме больших давлений, испытывает также температурное воздействие по времени, равное горению ВЭС.

Эффективность и надежность разработанного электрода проверены на бетонном модельном блоке, изготовленном из бетона марки 400 (прочность на сжатие не менее 40 МПа) в виде параллелепипеда с размерами 600х600х700 мм. Шпур диаметром 43 мм располагался в центре образца и имел глубину 500 мм (рис. 5а). Произведенный электроразряд с использованием в капсуле ВЭС массой $8,0 \cdot 10^{-3}$ кг и расчетной энергией 100 кДж обеспечил разрушение образца (рис. 5б,в).



Рис. 6. Испытания ЭС в водной среде с использованием ВЭС массой $32,0 \cdot 10^{-3}$ кг.

Для прогнозирования ресурса работы изготовленного электрода была проведена серия испытаний ЭС в водной среде (рис. 6) с повышенной энергией до 500 кДж и соответствующим увеличением сечения изолятора. После серии из 300 разрядов следов разрушения изолятора не выявлено.

ВЫВОДЫ

Из исследуемых высокопрочных диэлектриков полипропилен оказался наиболее устойчивым к явлениям, характерным для электроразрядных процессов. Высокая стойкость полипропиленовых изоляторов к механическим, температурным и электрическим воздействиям дает возможность значительно повысить надежность ЭС и в целом всего оборудования [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Гулый Г.А. *Научные основы разрядно-импульсных технологий*. Киев: Наукова думка, 1990. 208.
2. Ризун А.Р., Голень Ю.В., Муштатный Г.П. *ЭОМ*. 2006, 42(2), 20–22.
3. Теляшов Л.Л., Поздеев В.А. *Материалы 4 – й Всесоюзной конференции «Электрический разряд в жидкости и его применение в промышленности»* (сентябрь 1988), Николаев, 1988, (1), 99–102.
4. Баранов А.Н. *Разработка высоковольтных электродов для электроимпульсной утилизации железобетона и бурения шпуров*. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. Томск, 1992. 24.
5. *Электровзрывные силовые импульсные системы*. Под ред. В.А. Заварихина. Киев: Наукова думка, 1987. 220.

6. Воробьев Г.А. *Физика диэлектриков*. Томск: Изд-во ТПУ, 2003. 244.
7. Rizun A.R., Golen' Yu.V., Denisyuk T.D. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2007, **43**(2), 116–118.
8. Вовченко А.И., Посохов А.А., Поздеев В.А. *Электродинамические характеристики высоковольтного электрохимического взрыва. Физико-технические аспекты электровзрывного преобразования энергии*. Сб. науч. трудов. Киев: Наукова думка, 1990. 30–41.
9. Ризун А.Р., Голень Ю.В., Денисюк Т.Д. *Наука та інновації*. 2014, (5), 18–23.

Поступила 06.07.15

Summary

The physico-mechanical and dielectric properties of materials for the electrohydropulse electrode systems with a view to improve the sustainability of their elements in the zone of the plasma discharge channel, with electric discharges with a high energy potential.

Keywords: electrode system, mechanical strength and thermal resistance of insulating materials, impulse dielectric strength, field strength.