

УДК 622.236.7.002

И.П. ГОРОШКО, зав. лаб.,
С.С. ПАПКОВ, науч. сотрудник,
Р.А. ПАРХОМЕНКО, мл. науч. сотрудник; *МакНИИ, г. Макеевка*

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАЗРЯДНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОЧИСТКИ ШАХТНЫХ ВОДООТЛИВНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ОТ ОТЛОЖЕНИЙ

Приведены результаты исследований условий, определяющих долговечность электродной системы, а также результаты испытаний, в ходе которых определена оптимальная конструкция электродной системы, обеспечивающая приемлемый ресурс для очистки шахтных водоотливных трубопроводов.

Ключевые слова: исследование, электродная система, шахтный водоотлив, трубопровод, отложения, способы, разрядно-импульсная очистка.

Рабочий орган разрядно-импульсной установки - электродная система - является энергетически наиболее нагруженным узлом во всей системе. Высокая концентрация энергии в зоне его работы (100-500 кДж/м³), обусловленная небольшим рабочим объемом и импульсным характером выделения энергии, создает интенсивные нагрузки на ее узлы и детали. Это связано с небольшими габаритами разрядной камеры - трубопровода (скважины), что не позволяет удалить зону электрического разряда на значительное расстояние от электродной системы. Давление на отдельные поверхности электродной системы во время разряда равно практически давлению в канале разряда и может достигать от 1-1,5 до 10³ МПа, а температура - от 10³ до 10⁴ °С [1]. Ни один из известных в данное время материалов длительно не выдерживает такие нагрузки [2, 3]. Лишь кратковременность действия нагрузок позволяет создавать конструкции электродных систем, которые обладают удовлетворительной долговечностью.

Учитывая вышеприведенное, обеспечить приемлемый для технологии очистки ресурс разрядно-импульсного устройства невозможно без обеспечения соответствующего ресурса электродных систем. В свою оче-

редь применение электродной системы с высоким ресурсом позволит проводить очистку водоотливных трубопроводов с минимальным временем их остановки, обеспечивая гидрологическую безопасность шахты.

Электродная система в общем случае состоит из двух или нескольких металлических электродов и изоляторов, которые их разделяют, потому естественно предположить, что разрушение или износ отдельных ее элементов будет происходить по-разному. Исследования характера разрушения электродных систем показали, что металлические детали в зоне разряда оплавляются, причем в первую очередь оплавляются острые углы и выступающие поверхности, при этом часть оплавленного металла уносится с поверхности электродов, в результате чего изменяются их форма и размеры, а соответственно и величина межэлектродного промежутка. Изоляторы подвергаются объемному и поверхностному воздействиям, таким как: кавитации, термические удары, трекингоизнос и тому подобное, в результате чего ухудшаются их электрические характеристики, в частности, снижается электрическая прочность, а также уменьшается толщина за счет разрушения поверхностного слоя, который ведет к уменьшению электрической прочности изоляторов.

Диапазон условий и параметров разряда, при которых работает электродная система: величина и форма разрядного тока, материалы электродов, геометрия промежутка и др. - весьма широкий. Разнообразие указанных параметров и сложность явлений, которые сопровождают разряд, не позволили создать до настоящего времени единого подхода к обеспечению износостойкости электродной системы. Интенсивность износа электродной системы зависит от ее конструкции, материалов электродов и диэлектрика, мощности разряда, характера энерговыделения. Поэтому целесообразно изучить износ конкретной электродной системы при фиксированных режимах разряда.

Цель статьи – исследование условий эксплуатации электродных систем и разработка их оптимальной, с точки зрения долговечности, конструкции, безопасной для очистки шахтных водоотливных трубопроводов.

Экспериментальные исследования влияния конструкции и материалов электродов и изолятора на ресурс электродной системы, показанной на рис. 1, проводились в металлической замкнутой камере с малым объемом рабочей жидкости для создания в электродной системе жестких условий работы, приближенных к реальным условиям эксплуатации. Электродная система состоит из центрального положительного электрода 1, защитного наконечника 2, изолятора 3 и коаксиального отрицательного электрода 4. К электродной системе подключалась через коммутатор батарея конденсаторов, которая заряжалась до 5 кВ. После установки электродной системы в камеру последняя заполнялась водой и герметизировалась. При осу-

в процессе разряда проводилась регистрация разрядного тока с помощью трансформатора тока и запоминающего осциллографа. После одного или серии разрядов электродная система извлекалась из камеры для визуального определения наличия и характера износа или повреждения элементов электродной системы. При этом определялись количество импульсов до полного износа или разрушения элементов электродной системы. Критериями отказов электродной системы принимались увеличение межэлектродного промежутка до критической величины, которая не обеспечивает формирования стабильных разрядов с заданными параметрами, и разрушение изолятора. Момент разрушения изолятора электродной системы фиксировался по резко изменяющейся форме осциллограммы разрядного тока.

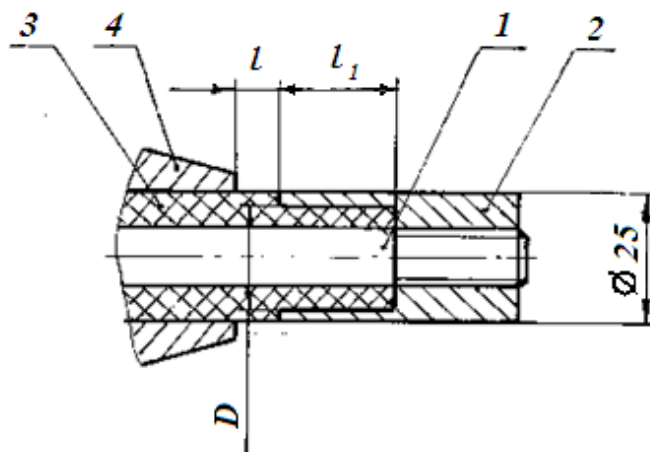


Рис. 1. Электродная система

Особенностью конструкции исследуемой электродной системы является то, что разрядный промежуток образован торцом отрицательного электрода 4 и наконечником 2 по поверхности изолятора 3. При разряде канал проводимости, сформировавшись в разрядном промежутке, начинает быстро расти, переходя на внешнюю поверхность отрицательного электрода 4 и наконечника 2. В этих местах на внешних поверхностях электрода 4 и наконечника 2 остаются следы эрозии металла площадью 1-2 см². После одного или нескольких разрядов в одном месте часть металла из внешней поверхности уносится и за счет этого разрядный промежуток увеличивается. Поэтому при дальнейших разрядах канал проводимости формируется в другом месте на цилиндрической поверхности изолятора 3. Такая конструкция наконечника позволяет увеличить ресурс электродной системы за счет удаления зоны разряда от торца изолятора 3 и равномерного износа последнего. На рис. 2 приведена зависимость ресурса электродной системы от соотношения l_1/D при $D = 20, 22, 23$ мм, где l_1 и D

соответственно длина и диаметр запрессованной в наконечник части изолятора. Так при $D = 20$ мм (кривая 1) изменение межэлектродного расстояния за счет эрозийного износа происходит медленнее, чем при $D = 23$ мм (кривая 3), соответственно и ресурс электродной системы в первом случае более высок, чем во втором. При соотношении $l_1 / D < 0,5$ износ преимущественно торцевой поверхности изолятора приводит к быстрому разрушению электродной системы, при соотношении $0,5 < l_1 / D < 0,9$ износ изолятора происходит как по внешней цилиндрической поверхности, так и из торца, а при $l_1 / D > 0,9$ изолятор изнашивается преимущественно по внешней цилиндрической поверхности, потому ресурс электродной системы в последнем случае выше, чем в предыдущих двух. Дальнейшее увеличение соотношения до 1,5 практически не увеличивает ресурс изолятора.

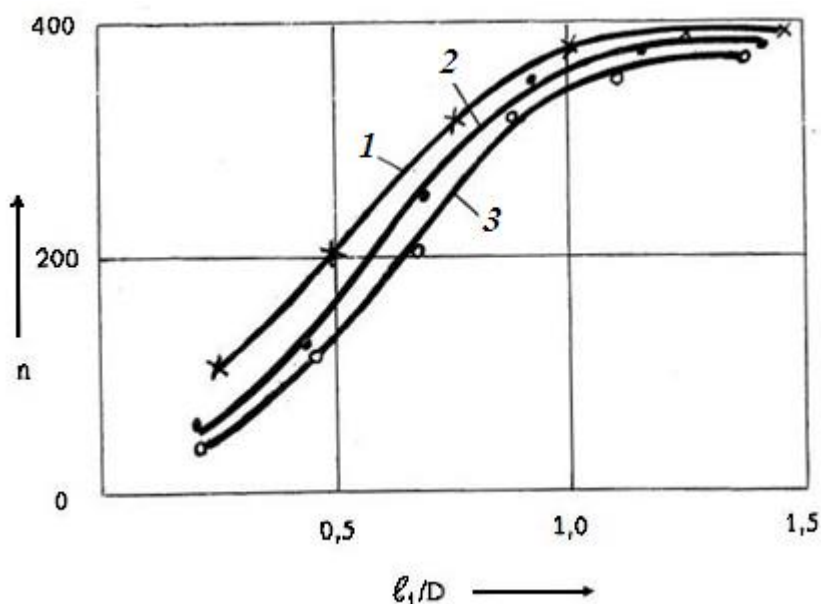


Рис. 2. Зависимость ресурса электродной системы от соотношения l_1/D : 1 - $D = 20$ мм; 2 - $D = 22$ мм; 3 - $D = 23$ мм.

Характер износа металлических элементов электродной системы существенно зависит от материала и термообработки элемента. В частности, наконечники, изготовленные из сталей Ст3, 20, 12Х18Н10Т, склонны к преимущественно эрозийному износу и пластической деформации, те же наконечники, изготовленные из стали 45 с дальнейшей термообработкой НРСэ 28-34, изнашивались, в основном, за счет трещинообразования и окисления на тонкостенных участках, а наконечники из стали 40Х, которые прошли объемную закалку, разрушались. В первом случае ресурс электродной системы составил 350-330 импульсов; во втором - 100-150; в третьем - 20-30.

Изолятор электродной системы является наиболее уязвимым ее элементом, имеющим наименьший ресурс [4], поэтому материал для него выбирался на основе сравнительного анализа физико-механических и электрических свойств полимеров, эластомеров и пластмасс, а также рекомендаций ряда работ [5,6]. Физико-механические характеристики электроизоляционных материалов, которые приведены в справочной литературе, не позволяют судить о применимости того или другого материала для изолятора электродной системы, поскольку условия, при которых они (характеристики) получены, в значительной степени отличаются от реальных условий работы изолятора электродной системы, в частности, механические характеристики получены в результате испытаний образцов статической нагрузкой или динамическими нагрузками при скоростях нагружения на несколько порядков меньших скоростей нагружения изолятора в условиях разрядно–импульсного воздействия.

Для установления связи между основными характеристиками материала изолятора и ресурсом электродной системы на первом этапе были проведены испытания электродных систем с изоляторами из ударопрочного полистирола, фторопласта - 4, и капрона, которые показали, что ресурс электродных систем составил 5, 10 и 12 импульсов соответственно. В таком же порядке растет показатель ударной вязкости этих полимеров. Поскольку для данной группы материалов ресурс хорошо коррелирует с показателем ударной вязкости, то увеличение ресурса следует ожидать при повышении ударостойкости изолятора. Это также подтверждается наличием многих трещин в теле разрушаемого изолятора. За счет дефектов, возникающих при разрядах, снижается электрическая прочность изолятора, что приводит к его электрическому пробое и разрушению.

Следующая партия электродных систем была изготовлена с изоляторами из материалов с ненормируемой ударной вязкостью: полиэтилена, кремнийорганической резины, поливинилхлоридного пластиката, резины 7889, резины 2959 с кордом из полиэфирных нитей. Ресурс электродных систем с этими изоляторами составил 5, 10, 30, 50 и 200 импульсов соответственно.

К недостаткам изоляторов из рассмотренной группы материалов следует отнести их высокую деформационную способность, в результате которой материал изолятора, упруго или пластично деформируясь во время разряда, передавал нагрузку конструкциям и элементам исполнительного органа, удаленным от зоны разряда.

Применение для изолятора таких высокомодульных композиционных материалов как стеклопластики обеспечивает дальнейшее повышение ресурса электродных систем. Для стеклопластиков на основе терморек-

тивных связующих, которые преимущественно используются в электромашиностроении, характерна одновременность изготовления самого материала и изделия, поскольку процесс формирования совмещен с реакцией затвердения - образования трехмерного полимера. Поэтому свойства стеклопластиков зависят от примененных для их изготовления материалов (наполнителя, связующего и отвердителя), а также от конструкции и технологии изготовления конкретных прессуемых, профильных или намоточных изделий.

Как наполнители для стеклопластика широко используются стекловолокно и материалы из них. Их употребление обусловлено существенными преимуществами по сравнению с волокнами из других материалов. Для намоточных изделий, которыми являются изоляторы электродных систем, могут применяться стеклоровинги группы Н, стеклоткань из стекловолокна на замазливателях и термохимически обработанные стеклоткани с применением аппретов [7].

Как связующее нашли широкое употребление фенолоформальдегидные, кремнийорганические и эпоксидные олигомеры. Тип отвердителя определяется типом смолы и необходимыми свойствами клеящего материала [8]. Достоинствами фенолоформальдегидных смол являются: твердость, высокий модуль упругости, химическая стойкость; а недостатками - усадка в процессе затвердения и хрупкость готового изделия. Кремнийорганические смолы применяют, главным образом, для производства стеклопластиков с достаточно высокими диэлектрическими свойствами, стойких к воздействию влаги и температуры. Недостатком этих смол является низкая прочность и невысокая адгезия к стеклу. Эпоксидные смолы обладают высокой смачивающей способностью и адгезией к стеклянным волокнам, сравнительно высокой прочностью, малой усадкой в процессе затвердения, их недостатки относительно изоляторов электродных систем: низкий верхний предел рабочих температур, ограниченная водостойкость.

Каждый из вышеназванных материалов, примененный в определенном сочетании для изготовления изоляторов электродных систем, вносит свой вклад в комплекс их механических и электрических свойств и в конечном итоге в ресурс электродных систем. Отсутствие конкретных рекомендаций по созданию изоляторов электродных систем из стеклопластика вынуждает решать эту задачу экспериментальным путем, то есть последовательным подбором сочетания компонентов, которое обеспечивает наибольший ресурс.

Для испытаний были изготовлены электродные системы с изоляторами, в которых как наполнитель использованы стеклоровинг марки Н по

ГОСТ 17139-79, стеклоткань 33-100 или стеклоткань ЭЗ/1-100-16 по ГОСТ 19907-63, а как связующее - фенолформальдегидная смола, диановая эпоксидная смола ЭД- 16 с отвердителем (полиэтиленполиамин) или кремнийорганический лак КО- 926. Ресурс электродных систем, полученный при их испытаниях приведен в таблице.

Таблица

Ресурс изоляторов электродных систем из стеклопластика
с разными наполнителями и связующими

Связующее	Наполнитель		
	Стеклоровинг, имп.	Стеклоткань ЭЗ-100, имп.	Стеклоткань ЭЗ/1-100-18, имп.
Фенолформальдегидная смола	15	–	–
КО- 926	20	50	60
ЭД - 16+ПЭПА	26	220	280
УП- 643+ЭД - 22+ изо- МТГФА + УП 606-2	–	300	400

Испытания электродных систем показали, что ресурс изоляторов с наполнителем из стеклоровинга, стеклоткани ЭЗ-100 и стеклоткани ЭЗ/1-100-18 повышается от первого типа наполнителя к третьему. Объясняется это разным характером разрушения изоляторов. После серии разрядов на поверхности изоляторов, изготовленных наматыванием на стержень пропитанного связующим стеклоровинга, появлялись трещины, направленные вдоль волокон стеклоровинга. Трещины развивались в тело изолятора между витками стеклониток. В дальнейшем на месте одной из таких трещин происходил электрический пробой изолятора. На поверхности изоляторов, изготовленных наматыванием пропитанной связующим стеклоткани, после серии разрядов также формировались участки разрушенного связующего, однако процесс не распространялся в тело, а ограничивался нарушенным слоем связующего до тех пор, пока не происходило разрушения слоев стеклоткани. Дальше цикл повторялся. При уменьшении локальной толщины изолятора на 35-40 % происходил его электрический пробой. Изоляторы, изготовленные из стеклоткани ЭЗ-100, имели меньший ресурс, чем изоляторы из стеклоткани ЭЗ/1-100-13. Это отличие обусловлено

высшей адгезией связующего к стеклоткани ЕЗ/100-18, чем к стеклоткани ЕЗ-100, а также снижением механических свойств последней при удалении замазливателя в результате термического действия.

Ресурс изоляторов, в которых как связующее применены фенолформальдегидная смола, кремнийорганический лак КО-926 и эпоксидная смола ЭД-16 с отвердителем ПЕПА, повышался от первого типа к третьему. Сравнение механических и электрических свойств стеклопластиков на основе разных связующих [9] и ресурса изоляторов на основе этих связующих (таблица) позволяет сделать вывод, что для данного перечня связующих определяющим фактором, который обеспечивает повышение ресурса изоляторов, является механическая прочность материала изоляторов, в частности прочность на сжатие и ударная вязкость, а также адгезионная прочность в системе связующее - стекловолокно.

Большой перечень эпоксидных смол, которые выпускаются промышленностью, позволяет подобрать связующее для изоляторов с более высокими характеристиками, чем у диановой смолы ЭД-16 с отвердителем ПЕПА. В частности, циклоалифатические эпоксидные смолы обладают повышенными трекингом, - дуго- и атмосферостойкостью, эпоксинолачные смолы обеспечивают более высокую нагревостойкость стеклопластиков. Вид отвердителя также влияет на свойства связующего и стеклопластика, в частности, отвердители горячего затверждения повышают механическую прочность стеклопластиков.

На основании требований к связующему, полученных при анализе результатов экспериментальных исследований, для изготовления изоляторов электродных систем было применено связующее, в состав которого вошли: эпоксидновлажная смола УП-542-75 в.ч., диановая эпоксидная смола ЭД-22-25 в.ч., отвердитель горячего затверждения изометилтетрагидрофталевый ангидрид - 80 в.ч., ускоритель УП 606/2 - 1,5 в.ч. Ресурс изоляторов на основе этого связующего достиг величины (см. табл.), сравнимой с ресурсом металлических элементов электродных систем, потому дальнейшее повышение ресурса электродной системы в целом возможно при одновременном повышении ресурса металлических элементов $n_э$ и ресурса изоляторов $n_{и}$.

Заданный ресурс по первому критерию достигается за счет применения электродной системы с заведомо меньшим межэлектродным промежутком, который в процессе работы за счет эрозионного износа электродов увеличивается до критической величины. В этом случае ресурс металлических элементов, определяющих ресурс электродной системы:

$$n_{\text{Э}} = \frac{l_{\text{кр}} - l_{\text{Н}}}{\Delta}, \quad (1)$$

где $l_{\text{кр}}, l_{\text{Н}}$ - критическая и начальная величина межэлектродного промежутка;

Δ - изменение величины межэлектродного промежутка за счет эрозии электродов за один разряд;

$n_{\text{Э}}$ - ресурс электродной системы (количество импульсов), ограниченный стойкостью электродов.

Заданный ресурс электродной системы по второму критерию достигается за счет применения в электродной системе изолятора, который обладает электрической прочностью в несколько раз больше, чем рабочее напряжение электродной системы. Считая, что после каждого разряда электрическая прочность изолятора уменьшается на некоторую величину ΔE , можно определить ресурс изолятора электродной системы:

$$n_{\text{и}} = \frac{E_{\text{нр}} - U_0}{\Delta E}, \quad (2)$$

где $E_{\text{нр}}$ - электрическая прочность нового изолятора;
 U_0 - рабочее напряжение электродной системы.

Анализ выражений (1) и (2) показывает, что повышение ресурса электродной системы может быть достигнуто за счет:

- расширения диапазона рабочих значений межэлектродного промежутка ($l_{\text{кр}} - l_{\text{Н}}$);
- уменьшения влияния эрозийного износа электродов на величину межэлектродного промежутка;
- повышения начальной электрической прочности изолятора;
- снижения рабочего напряжения, которое действует на изолятор;
- уменьшения влияния нагрузок, которые возникают при электро-разряде, на электрическую и механическую прочность изолятора.

На основании этих рекомендаций была разработана многоэлектродная система с двумя последовательными разрядными промежутками, которая обеспечивает приемлемый ресурс.

Многоэлектродная система (рис. 3) содержит центральный положительный электрод 1, защитный наконечник 2, трубчатый промежуточный электрод 3, изоляторы 4 и 5, изоляционное покрытие центрального электрода 6, внешний отрицательный электрод 7. Промежуточный электрод 3

установлен на изолированный центральный электрод 1, который расположен во внешнем электроде 7. Электродная система имеет два последовательных разрядных промежутка по поверхности изоляторов 4 и 5, которые отделяют промежуточный электрод 3 от наконечника 2 и внешнего электрода 7. При установке электродной системы электрод 1 соединяется с помощью коаксиального кабеля с высоковольтным выходом разрядного контура, а внешний электрод 7 - с заземленным.

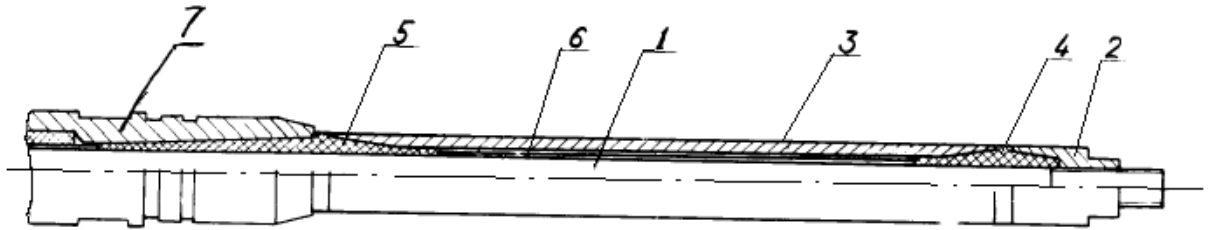


Рис. 3. Электродная система с последовательными разрядными промежутками

Работает электродная система таким образом: при поступлении к электродам 1 и 7 напряжения от накопителя, между промежуточным электродом 3 и наконечником 2, и промежуточным электродом 3 и внешним электродом 7 происходят два квазисинхронных разряда по поверхности изоляторов 4 и 5 в том месте, где напряженность электрического поля максимальна. После одного или нескольких разрядов в одном месте уносится часть металла из поверхности наконечника 2, промежуточного электрода 3 и внешнего электрода 7, изменяется форма электродов и размеры межэлектродного промежутка, а, следовательно, и напряженность электрического поля, в результате чего разряд формируется в другом месте поверхности изоляторов 4 и 5. В этом плане работа многоэлектродной системы не отличается от работы двухэлектродной системы. Отличие заключается в том, что напряжение, прилагаемое к каждому разрядному промежутку многоэлектродной системы, в два раза меньше напряжения разрядного контура U_0 , в то время как напряжение, прилагаемое к разрядному промежутку двухэлектродной системы равно U_0 . Кроме того, при одинаковых энергетических параметрах разряда давление на изолятор многоэлектродной системы на 30 % ниже, чем на изолятор двухэлектродной системы.

Суммарное давление, которое создается двумя каналами квазисинхронных разрядов, достигает своего максимального значения в зоне, расположенной посередине отрезка, который соединяет каналы разрядов там, где изолятор закрыт металлической втулкой.

Таким образом, в разработанной многоэлектродной системе снижены рабочее напряжение и нагрузки, которые действуют на изолятор в опасных сечениях, по сравнению с напряжением и нагрузками, которые действуют в двухэлектродной системе.

ВЫВОДЫ

В результате испытаний установлено, что коаксиальные электродные системы с двумя последовательными разрядными промежутками обеспечивают безотказную работу при более чем 2000 импульсов. Такой ресурс электродной системы является вполне удовлетворительным для использования при очистке протяженных трубопроводов шахт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малюшевский П. П. Основы разрядно-импульсной технологии / П. П. Малюшевский. – К.: Наукова думка, 1983. – 272 с.
2. Гриценко В. В. Расчет параметров нагружения, создаваемого электрогидроимпульсным взрывателем в полости шнура / В. В. Гриценко, С. Ю. Макеев, В. И. Емельяненко. – Днепропетровск, 1987. – 20 с.
3. Атанов Г. А. Об электроимпульсном водомете / Г. А. Атанов, Ю. Н. Головкин, А. М. Криворучко // Изв. ВУЗов СССР. Энергетика.– 1979.– №7.–С.77–82.
4. Головкин Ю. Н. Расчет течения жидкости при электрическом разряде в замкнутом объеме / Ю. Н. Головкин // Гидромеханика. – 1980. – Вып. № 42.– С. 111-115.
5. Шепелева Г. В. Гидродинамические аспекты электровзрыва в жесткой сферической оболочке / Г. В. Шепелева, В. В. Шамко, Г. А. Атанов // Физико-механические процессы при высоковольтном разряде в жидкости: сб. науч. тр. – К.: Наукова думка, 1980. – С. 113-122.
6. Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в горном деле / Л. А. Юткин // Строительные материалы, изделия и конструкции. – 1955. – №9. – С. 13-15.
7. Разрушение порошков синтетических алмазов ударными волнами / Г. И. Трефилов, Ю. В. Мильман, Т. И. Саввакин и др. // Влияние высоких давлений на вещество. – К.: Наукова думка, 1976. – С. 35-38.
8. Использование энергии электрического разряда для дробления, бурения скальных пород и производства строительных материалов: уч. пособие ЛВКУ ЖДВ и ВОСО им. Фрунзе / [Л. Ф. Алимов, Г. Н. Гаврилов, А. Г. Рябинин и др.]. – Л., 1975. – 248 с.

9. Тарасов Б. Г. Прогноз газообильности выработок и дегазации шахт / Б. Г. Тарасов – М.: Недра, 1973. – 208 с.

Получено: 20.04.15

Наведено результати дослідження умов, що визначають тривкість електродної системи, а також результати випробувань, у ході яких визначено оптимальну конструкцію електродної системи, що забезпечує прийнятний ресурс для очищення шахтних водовідливних трубопроводів.

Ключові слова: дослідження, електродна система, шахтний водовідлив, трубопровід, відкладення, способи, розрядно-імпульсне очищення.

The results of the study of conditions which determine the life duration of an electrode system as well as the results of the tests by which the aimed construction of the electrode system has been determined which provides the acceptable endurance for the mine pump discharge line cleaning have been summarized.

Keywords: study, electrode system, mine pumping, pipeline, deposits, ways, electric discharge cleaning.