

С. Г. Поклонов

ВЫБОР РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ ПОГРУЖНЫХ УСТАНОВОК

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43 А, г. Николаев, 54018, Украина, ipt@ipt.com.ua*

Введение

Жидкая рабочая среда является одним из основных элементов любой электроразрядной установки, от которой зависят стабильность и эффективность ее работы и технологии в целом. Поэтому необходим строгий контроль за стабильностью ее параметров. Например, для наземных установок, таких как установки по очистке литья, где в качестве рабочей среды используется вода, повышение удельной электропроводности последней от 0,067 до 0,083 См/м приводит к снижению производительности процесса в 1,5 раза [1]. В приведенном примере увеличение электропроводности воды происходит за счет растворения в ней солей, содержащихся в формовочной смеси, а для восстановления исходной электропроводности жидкости используются ионообменные смолы. В других случаях, когда объект обработки не изменяет электропроводность среды, то сам разряд способствует ее изменению за счет эрозии электродов и образования солей азотной кислоты [2, 3].

Применительно к электроразрядным погружным установкам (ЭПУ) для обработки нефтяных, газовых и водозаборных скважин вопрос о свойствах рабочей среды имеет первостепенное значение [4, 5], поскольку очень часто обеспечить в скважине рабочую среду с оптимальными свойствами для эффективной и стабильной работы ЭПУ вообще не представляется возможным. Поэтому часто приходится довольствоваться технологическими жидкостями, находящимися в скважине в данный момент времени, например в период цементирования колонны – глинистый, цементный раствор [6], в период интенсификации притока нефтяных скважин – водонефтяные эмульсии (ВНЭ) естественного и промышленного происхождения [7].

Многообразие рабочих жидкостей, неопределенность фактических их свойств в условиях глубоких скважин и повышенных температур, изменение их за счет интенсивного растворения отложений, притока флюида из добывающих пластов – все это является препятствием к осуществлению высокоэффективной технологии. Принципиальным выходом из данных обстоятельств служит помещение электродной системы ЭПУ, заполненной жидкой рабочей средой с нужными параметрами, в непроницаемую, акустически прозрачную оболочку [8].

Обоснование и постановка задачи

В этой связи вопрос о выборе сред с такими электрофизическими свойствами, которые обеспечивают стабильный и эффективный пробой, а также малую изменчивость этих свойств по крайней мере в течение осуществления нескольких тысяч разрядов, становится актуальным. Эти жидкости должны также соответствовать условиям доступности, дешевизны, экологической безопасности.

Для решения поставленной задачи ранее были проведены электрофизические исследования, в которых сравнивалось влияние гидростатического давления и температуры в скважине на напряжение зажигания разряда в водных электролитах различной удельной электропроводности, а также в ВНЭ различной обводненности [9, 10]. Исследования, в частности, показали, что зависимость напряжения зажигания разряда от гидростатического давления для ВНЭ (при обводненности от 30 до 50%) менее выражена по сравнению с таковой для водных электролитов, кроме того, величина напряжения зажигания разряда для ВНЭ меньше, чем для водных электролитов. Это послужило основанием для рекомендаций использования ВНЭ в качестве рабочей среды. Однако практика показала, что ВНЭ с течением времени достаточно быстро изменяет свои параметры, что приводит к снижению эффективности и стабильности работы ЭПУ.

Таким образом, возникла необходимость в исследованиях физики явлений и динамики процесса изменения основных величин, характеризующих электрический разряд, под влиянием гидро-

статического давления и воздействия электрических разрядов для водных электролитов и ВНЭ, используемых в качестве рабочей среды в электродных системах ЭПУ.

Методика исследований

Для решения поставленных задач были проведены исследования с использованием методики, изложенной в работе [11]. В основе этой методики лежит регистрация амплитудно-временных значений предразрядных токов и напряжений на межэлектродном промежутке (см. рис. 1).

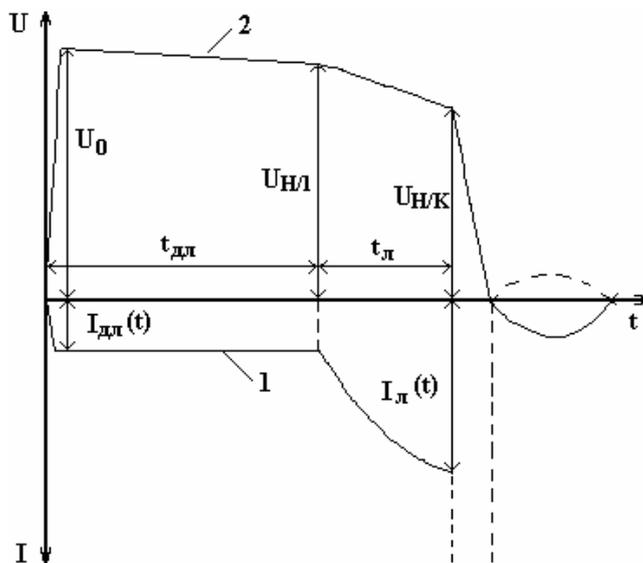


Рис. 1. Осциллограммы тока (1) и напряжения (2) в предпробивной стадии разряда для водных электролитов

Известно, что ток, проходящий через водный межэлектродный промежуток, в стадии формирования разряда имеет характерные участки. Первый участок начинается от момента приложения напряжения к межэлектродному промежутку и на осциллограмме тока (кривая 1) отображается участком длительностью $t_{дл}$ и амплитудой $I_{дл}(t)$. Это так называемая долидерная стадия разряда, в течение которой ток протекает с оголенных частей электродов и формируется первичный лидер на электроде. Второй участок начинается с момента формирования первичного лидера (зажигания разряда), это лидерная стадия длительностью $t_{л}$ и током в цепи $I_{л}(t)$. Также известно, что указанные токи обеспечиваются ионной проводимостью водных электролитов. В конце лидерной стадии происходит перемыкание межэлектродного промежутка лидерным каналом и начинается активная стадия разряда (штриховая линия).

Согласно методике исследования проводились на стержневых электродах при многократных пробойных разрядах при следующих диапазонах изменения параметров: зарядного напряжения U_0 – от 15 до 30 кВ; емкости конденсаторной батареи C – от 0,25 до 2 мкФ; гидростатического давления $P_{ГС}$ – от 0,1 до 50 МПа; температуры рабочей среды T – от 293 до 369 К; радиуса закругления стержневого электрода $r_{эл}$ – от 0,5 до 2,5 мм; длины межэлектродного промежутка $l_{МЭ}$ – от 10 до 18 мм.

Рабочие среды представляли собой: водный электролит с удельной электропроводностью σ_0 в диапазоне от 0,06 до 0,33 См/м и гидрофобно-эмульсионный раствор (ГЭР), моделирующий водонефтяную эмульсию и приготовленный в соответствии с [12].

Для каждого набора исходных данных экспериментальная серия состояла из пяти опытов (по числу выбранных уровней гидростатического давления). Для статистической обработки результатов в каждом опыте регистрировалось от 15 до 20 осциллограмм (n_i).

Поскольку в отличие от методики [11] в данных опытах присутствуют два независимых параметра – гидростатическое давление $P_{ГС}$ и количество предшествующих разрядов $\sum N$, то возникла необходимость для каждой серии исследовать корреляционные зависимости величин ($I_{дл}$, $t_{дл}$, $I_{л}$, $t_{л}$) от указанных параметров.

В основу этого анализа положено свойство сохранения знака корреляционных коэффициентов для зависимых величин при изменении направления варьирования независимого параметра. Напри-

мер в отношении параметра $P_{ГС}$ это состояло в том, что порядок следования опытов производился как в направлении повышения, так и в направлении понижения гидростатического давления. В то время как для параметра ΣN изменения возможны только в одном направлении – в сторону увеличения.

Основная часть

Водные электролиты. Некоторые экспериментальные данные, отражающие общие тенденции развития разряда в водных электролитах, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Экспериментальные данные для водных электролитов

Серия № 1. $U_0=22,5$ кВ; $T=293^0$ К; $\sigma_0=0,33$ См/м; $r_{эл}=1,5$ мм; $l_{МЭ}=13$ мм					
№ опыта	1	2	3	4	5
$P_{ГС}$, МПа	0,1	10	20	37	50
$\Sigma N(+n_i)$, шт.	18	33(+15)	55(+22)	75(+20)	91(+24)
$I_{дл}$, А	250	225	250	250	250
$t_{дл}$, мкс	6,5	5,1	17,4	30,61	37,6
$I_{л}$, А	1477	983	989	897	753
$t_{л}$, мкс	4,9	4,8	4,4	4,8	5,3
Серия № 2. $U_0=22,5$ кВ; $T=293^0$ К; $\sigma_0=0,33$ См/м; $r_{эл}=0,5$ мм; $l_{МЭ}=13$ мм					
№ опыта	1	2	3	4	5
$P_{ГС}$, МПа	50	37	20	10	0,1
$\Sigma N(+n_i)$, шт.	21	41(+20)	59(+18)	74(+15)	102(+18)
$I_{дл}$, А	200	200	200	200	180
$t_{дл}$, мкс	3,55	2,6	1,42	1,15	1,16
$I_{л}$, А	1000	994	894	1075	1442
$t_{л}$, мкс	4,8	4,9	5,8	4,9	5,1

Гидрофобно-эмульсионные растворы. Проведенные исследования показали качественное отличие в характеристиках на стадии предпробоя для ГЭР по сравнению с водными электролитами. Характерные осциллограммы тока и напряжения в предпробивной стадии разряда для ГЭР приведены на рис. 2.

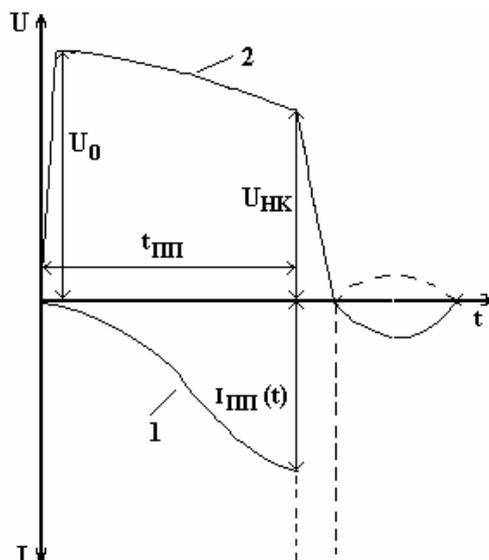


Рис. 2. Осциллограммы тока (1) и напряжения (2) в предпробивной стадии разряда для ГЭР

Особенность заключалась в отсутствие на осциллограмме тока участка, соответствующего долидерной стадии для водных электролитов. Для ГЭР ток начинается с нуля и возрастает подобно току лидерной стадии для водных электролитов, поэтому он первоначально был идентифицирован как лидерный ток, тем более что в конце этой стадии действительно может происходить перемикрытие межэлектродного промежутка каналом сквозной проводимости (активная стадия, отображена штри-

хом). Понижение испытательного напряжения до единиц киловольт приводит лишь к увеличению времени процесса без изменения характерного вида осциллограммы.

Для отличия от характеристик водных электролитов примем обозначение этого тока (максимального значения) как $I_{ПП}$ - предпробойный ток, а длительность стадии $t_{ПП}$ - предпробойное время. Характер изменения напряжения для ГЭР подобен поведению напряжения для водных электролитов на стадии лидерного процесса.

Некоторые экспериментальные данные, отражающие общие тенденции развития разряда в гидрофобно-эмульсионных растворах, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Экспериментальные данные для гидрофобно-эмульсионных растворов

Серия № 1. $U_0=30$ кВ; $T=293^0$ К; $r_{ЭЛ}=1,5$ мм; $l_{МЭ}=10$ мм					
№ опыта	1	2	3	4	5
$P_{ГС}$, МПа	0,1	10	20	37	50
$\Sigma N(+n_i)$, шт.	11	25(+14)	40(+15)	52(+12)	70(+18)
$I_{ПП}$, А	161,7	133,8	112	99,3	76,1
$t_{ПП}$, мкс	30,7	28,5	37,9	32,4	49,1
Серия № 2. $U_0=22,5$ кВ; $T=293^0$ К; $r_{ЭЛ}=0,5$ мм; $l_{МЭ}=13$ мм					
№ опыта	1	2	3	4	5
$P_{ГС}$, МПа	50	37	20	10	0,1
$\Sigma N(+n_i)$, шт.	10	22(+12)	38(+16)	48(+10)	63(+15)
$I_{ПП}$, А	247	256,7	250	247	205,5
$t_{ПП}$, мкс	33	32	31,8	40,4	52,7

Обсуждение результатов

В соответствии с методикой для данных экспериментальных массивов были рассчитаны корреляционные коэффициенты (с помощью программы «Excel»), которые представлены в табл. 3 и 4.

На основании данных табл. 3 можно утверждать, что такие величины, как $I_{дл}$, $t_{дл}$, $I_{л}$, имеют однозначную зависимость от гидростатического давления (данные в столбцах $P_{ГС}$ с черным выделением), так как при изменении направления варьирования $P_{ГС}$ (в серии № 1 – возрастает, в серии № 2 – убывает) корреляционные коэффициенты не поменяли знак. Более того, зависимость эта существенная, поскольку корреляционные коэффициенты имеют значения (по абсолютной величине), близкие к единице (0,98 для $t_{дл}$, и -0,85 для $I_{л}$). Знак «плюс» перед корреляционным коэффициентом означает, что при возрастании параметра исследуемая величина также увеличивается, а знак «минус» – уменьшается. В связи с этим можно утверждать, что повышение гидростатического давления приводит к возрастанию долидерного времени $t_{дл}$ и уменьшению лидерного тока $I_{л}$ (максимального значения), что связано с подавлением лидерной системы, уменьшением ее разветвленности.

Также обнаруживается, хотя и в меньшей мере, зависимость от гидростатического давления величины $I_{дл}$. По-видимому, здесь находит отражение известный факт повышения электропроводности электролита при повышении гидростатического давления [13]. Несколько необычный для понимания результат состоит в том, что величина $t_{л}$ вообще не зависит от гидростатического давления (поскольку коэффициент поменял знак, данные в столбцах $P_{ГС}$ без выделения).

Таблица 3. Корреляционные коэффициенты для данных табл. 1

	Серия № 1					Серия № 2					
	$P_{ГС}$	$I_{дл}$	$t_{дл}$	$I_{л}$	$t_{л}$	$P_{ГС}$	$I_{дл}$	$t_{дл}$	$I_{л}$	$t_{л}$	
ΣN	0,99	0,4	0,97	-0,87	0,38	ΣN	-0,98	-0,77	-0,9	0,76	0,24
$I_{дл}$	0,37	1	0,56	0,07	-0,07	$I_{дл}$	0,65	1	0,43	-0,95	0
$t_{дл}$	0,98	0,56	1	-0,73	0,46	$t_{дл}$	0,96	0,43	1	-0,41	-0,48
$I_{л}$	-0,85	0,07	-0,73	1	-0,21	$I_{л}$	-0,64	-0,95	-0,41	1	-0,26
$t_{л}$	0,48	0,07	0,46	-0,21	1	$t_{л}$	-0,32	0	-0,48	-0,26	1

Относительно параметра ΣN величины $I_{дл}$, $t_{дл}$, $I_{л}$ не проявляют зависимости (данные в строках ΣN без выделения), так как при неизменности направления варьирования ΣN (в серии № 1 и в серии № 2 – возрастают) корреляционные коэффициенты поменяли знак на противоположный. Одна-

ко величина $t_{\text{л}}$ демонстрирует слабую корреляцию относительно параметра ΣN (данные в строках « ΣN » с серым выделением), предположительно это может быть связано с нагревом жидкости в процессе увеличения количества разрядов.

На основании данных табл. 4 можно утверждать, что величины $I_{\text{пп}}$, $t_{\text{пп}}$ однозначно не зависят от гидростатического давления (данные в столбцах $P_{\text{ГС}}$ без выделения), так как при изменении направления варьирования $P_{\text{ГС}}$ (в серии № 1 – возрастает, в серии № 2 – убывает) корреляционные коэффициенты поменяли знак. А относительно параметра ΣN величины $I_{\text{пп}}$ и $t_{\text{пп}}$ проявляют зависимость (данные в строках ΣN с серым выделением), так как при неизменности направления варьирования ΣN (в серии № 1 и в серии № 2 – возрастают) корреляционные коэффициенты не поменяли знак, причем зависимость эта существенная - с коэффициентами до -0,99 и 0,84 соответственно.

Таблица 4. Корреляционные коэффициенты для данных табл. 2

Серия № 1				Серия № 2			
	$P_{\text{ГС}}$	$I_{\text{пп}}$	$t_{\text{пп}}$		$P_{\text{ГС}}$	$I_{\text{пп}}$	$t_{\text{пп}}$
ΣN	0,99	-0,99	0,81	ΣN	-0,99	-0,73	0,84
$I_{\text{пп}}$	-0,97	1	-0,78	$I_{\text{пп}}$	0,66	1	-0,94
$t_{\text{пп}}$	0,78	-0,78	1	$t_{\text{пп}}$	-0,79	-0,94	1

Качественное же поведение состоит в следующем: предпробивное время $t_{\text{пп}}$ возрастает при увеличении количества разрядов; предпробойный ток $I_{\text{пп}}$ уменьшается при увеличении количества разрядов.

Отсутствие зависимости предпробойных характеристик для ГЭР от гидростатического давления указывает на иную физическую картину явлений в межэлектродном промежутке по сравнению с водными электролитами, в частности, что там нет явлений фазового преобразования среды (вскипания), чувствительного к внешнему давлению, и наличия лидерной системы в том понимании (ионизации в парогазовой среде), как это принято в физике пробоя.

Разобраться с процессами, происходящими в ВНЭ при наложении на них электрических полей, нам помогут исследования [14, 15], в которых уточнены механизм и закон протекания тока через межэлектродный промежуток.

Водонефтяные эмульсии представляют собой устойчивые двухфазные системы, состоящие из основной жидкости – среды, являющейся нефтепродуктом, и распределенной в ней фазы – мелких водных капель (глобул). Поскольку удельное сопротивление нефтепродукта составляет от 10^6 до 10^9 Ом·м, а более электропроводные водные капли разобщены в пространстве, то в целом удельное сопротивление эмульсии велико, и поэтому при приложении к межэлектродному промежутку разности потенциалов начальный электрический ток очень мал. То есть первоначально в ВНЭ практически отсутствуют носители тока, тогда как в водных электролитах они всегда присутствуют. Через некоторый отрезок времени, определяемый в основном уровнем приложенного напряжения, через межэлектродный промежуток начинает протекать электрический ток. Этот ток обусловлен перемещением в пространстве множества водных глобул, каждая из которых несет на себе некоторый заряд, появляющийся на них благодаря воздействию полю. Однако в процессе движения глобулы сталкиваются между собой, сливаются, укрупняются и в течение определенного времени осаждаются на дно камеры, не принимая более участия в токопередаче. Таким образом, если приложить к межэлектродному промежутку постоянное напряжение, то ток через промежуток времени сначала нарастает, а потом спадает, имея куполообразную форму. Физическое же состояние среды характеризуется постоянным изменением концентрации глобул, уменьшением ее, то есть изменением свойств эмульсии во времени в направлении уменьшения ее электропроводности.

В сильных электрических полях процесс слияния глобул идет еще интенсивней за счет мощной поляризации глобул. Слившиеся и укрупнившиеся глобулы не успевают уйти из межэлектродного промежутка, вытягиваются и перемикают межэлектродный промежуток, приводя к электрическому пробую.

Действие импульсного электрического поля на эмульсию подобно действию постоянного за короткое время. После окончания действия импульса система сохраняет предыдущее состояние, то есть идет накопление действия электрического поля от импульса к импульсу.

Наблюдаемые в наших экспериментах уменьшение тока $I_{\text{пп}}$ по мере увеличения количества импульсов (времени коагуляции и осаждения), а также увеличение времени $t_{\text{пп}}$ есть результат накоп-

ления состояния уменьшения концентрации глобул в пределе до полного выпадения последних в осадок.

Таким образом, относительно фазового состояния ВНЭ, помещенной в электрическое поле (постоянное, переменное, импульсное), можно сказать, что оно непременно меняется в сторону расщепления эмульсии на нефтяную и водную составляющие.

Более того, в данной ситуации могут реализоваться два случая: а) высоковольтный электрод, находящийся сверху, омывается диэлектрической жидкостью (обезвоженной нефтью), что грозит перенапряжением и пробоем изоляции; б) высоковольтный электрод омывается сильно электропроводной осажденной водой, что приведет к беспробойным разрядам.

Выводы

1. Основные разрядные характеристики в водных электролитах имеют устойчивые корреляционные связи с таким параметром, как гидростатическое давление, и не зависят от времени обработки (в исследованном диапазоне). Это обусловлено внутренней физической взаимосвязью процессов, а потому она устойчива и позволяет прогнозировать поведение некоторых параметров воздействия, используя эмпирические соотношения [16] для осуществления стабильных и высокоэффективных режимов работы ЭПУ.

2. Разрядные характеристики в водонефтяных эмульсиях зависят как от времени и интенсивности воздействия электрического поля, так и от общего времени отстоя эмульсии, что не позволяет прогнозировать ее состояние для реализации стабильных и высокоэффективных режимов работы ЭПУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Приходько В.В., Гуцик В.А., Царенко П.И., Харуженко В.И. Стабилизация удельного сопротивления воды в электрогидравлических установках // Электрический разряд в жидкости и его применение в промышленности. Киев: Наукова думка, 1980. С. 246–247.
2. Малюшевский П.П., Кривицкая З.К., Немировский А.З., Ляпис Д.Н. О влиянии высокоэнергетических разрядов в воде на удельное сопротивление рабочей среды разрядных камер // Электронная обработка материалов. 1978. № 4. С. 40–45.
3. Вишневецкий В.Б., Годованная И.Н. Электрогидравлическое разрушение оксидов. К.: Наукова думка, 1989. 115 с.
4. Малишевский В.Т., Тарабара В.П., Цуркин В.Н., Швец И.С. Регенерация скважин на воду погружным электровзрывным устройством // Водоснабжение и санитарная техника. 1990. № 12. С. 13.
5. Сизоненко О.Н., Хвоцан О.В. К вопросу электроразрядной технологии интенсификации притока нефти в скважины // Электронная обработка материалов. 2003. № 5. С. 80–85.
6. Трофимова Л.П., Поклонов С.Г., Жекул В.Г., Глушенко В.Ж., Ковязин Н.И. Высоковольтный пробой глинистых суспензий в условиях повышенных давлений // Нефтяное хозяйство. 1997. № 7. С. 13–15.
7. Сизоненко О.Н., Тафтай Э.И., Хвоцан О.В. Исследование влияния рабочей среды на амплитуду импульсов давления при высоковольтных импульсных разрядах // Электронная обработка материалов. 2005. № 2. С. 45–49.
8. Алексеев В.С., Гребенников В.Т. Восстановление дебита водозаборных скважин. М.: Агропромиздат, 1987. 239 с.
9. Щерба А.А., Косенков В.М., Жекул В.Г., Поклонов С.Г. Стабилизация режимных параметров высоковольтных систем электрогидроимпульсной обработки жидких неоднородных сред // Технічна електродинаміка. 2004. № 3. С. 23–26.
10. Жекул В.Г., Поклонов С.Г., Трофимова Л.П., Швец И.С. Формирование электрического разряда в водонефтяных эмульсиях при высоких давлениях и температурах // Электронная обработка материалов. 2001. № 1. С. 37–42.
11. Поклонов С.Г. Режимы работы электродной системы электрогидроимпульсного скважинного устройства // Вестник национального технического университета “ХПИ”. Темат. вып. “Электроэнергетика и преобразовательная техника”. Харьков, 2003. Т. 1. № 1. С. 154–162.
12. Инструкция по применению гидрофобно-эмульсионных растворов (ГЭР). Министерство нефтяной промышленности. РД39 -3-444-80. Укрگیпронінефть, 1980. 66 с.
13. Малюшевский П.П., Кривицкая З.К., Поклонов С.Г., Горovenko Г.Г. Изменение свойств рабочих сред электровзрывных камер при высоком внешнем гидростатическом давлении // Электронная обработка материалов. 1982. № 2. С. 36–38.

14. *Поклонов С.Г., Жекул В.Г., Тафтай Э.И., Швец И.С.* Качественная модель поведения коллектива глобул воды в нефтяных эмульсиях при воздействии электрических полей // Вестник национального технического университета “ХПИ”. Темат. вып. “Техника и электрофизика высоких напряжений”. Харьков. 2007. № 34. С. 136–151.
15. *Жекул В.Г., Швец И.С., Поклонов С.Г., Тафтай Э.И., Колмогорова Р.П., Смирнов А.П.* Коагуляция водной фазы в высокоустойчивых нефтяных эмульсиях под воздействием различных электрических полей // Вестник национального технического университета “ХПИ”. Темат. вып. “Техника и электрофизика высоких напряжений”. Харьков, 2007. № 34. С. 119–126.
16. *Поклонов С.Г., Жекул В.Г., Швец И.С.* Электроразрядные погружные установки со стабилизированными рабочими параметрами // Материалы конф. «Электрофизика материалов и установок» / Под ред. С.М. Коробейникова. Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2006. С. 257–266.

Поступила 08.09.08

Summary

The method and results of experimental researches of a high-voltage discharge in water electrolytes and oil emulsions are reduced with the purpose of definition of their fitness to using in the capacity of actuating mediums for the electrode systems of closed type for high-voltage electrodischarge submersible installations.
