

**О.Н.СИЗОНЕНКО**, докт.техн.наук; **Э.И.ТАФТАЙ**; **Р.И.МАЛАЯ**;  
**Р.П.КОЛМОГорова**; **Е.В.ЛИПЯН**; **А.С.ТОРПАКОВ**;

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

## **ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДОВ В РАСТВОРАХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ИХ ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА**

Наведено результати експериментальних досліджень впливу режиму введення енергії високовольтних імпульсних розрядів в розчинах поверхнево-активних речовин на їх поверхневу активність – поверхневе натягнення, кут краєвої смочування, коефіцієнт розтікання і миючу дію.

In report the results of experimental researches of influence of energy input law of high-voltage impulsive discharges in solutions of superficially-active matters on their superficial activity - surface-tension, edge corner of moistening, coefficient of spreading and washing action are represented.

**Постановка задачи.** Наиболее эффективное воздействие на различные дисперсные системы, с целью изменения их свойств, как показал анализ отечественных и зарубежных источников, оказывают физико-химические методы [1-3]. Эти методы сочетают различные виды волновых воздействий (акустическое, гидроакустическое, вибросейсмическое, электромагнитное, гидроимпульсное и электроразрядное) с химическими, которые предусматривают применение различных поверхностно-активных веществ (ПАВ). ПАВ улучшают агрегативную устойчивость и структурно-механические свойства суспензий, вызывают понижение твердости горных пород и облегчают тем самым их разрушение, обеспечивают возможность увеличения механической скорости и проходки долот, создают условия самозатачивания его режущей кромки при бурении скважин и т.д..

В работах [4-6] показано, что при электроразрядном (ЭР) воздействии на пористые среды использование в качестве рабочей среды растворов ПАВ приводит к синергетическому эффекту в увеличении проницаемости этих сред. При этом, в работах [7-9] было установлено, что высоковольтный ЭР в растворах ПАВ усиливает их способность удалять вязко-пластичные отложения с твердых поверхностей и предотвращать их сорбцию. Эти работы показывают, что физико-химическое воздействие высоковольтного ЭР и раствора ПАВ, сочетающее циклическое импульсное нагружение и адсорбционную способность ПАВ позволит управлять поверхностными явлениями в дисперсных системах. Для этого необходимо установить закономерности связи параметров ЭР с основными показателями свойств ПАВ.

**Целью** данной работы является исследование влияния режима ввода энергии высоковольтных ЭР в растворах ПАВ на поверхностные явления и

обменные процессы на межфазных границах многофазных сред.

**Методика эксперимента.** Для исследований были выбраны представители анионных (Сульфонол концентрацией  $4 \text{ г/дм}^3$ ), катионных (Катапин концентрацией  $6 \text{ г/дм}^3$ ), неионогенных (АФ<sub>9</sub> – 12 концентрацией  $1 \text{ г/дм}^3$ ) типов ПАВ и смесь анионных и неионогенных ПАВ (многофункциональная композиция НМК-РХ концентрацией  $3 \text{ г/дм}^3$ ).

Экспериментальные исследования выполнялось на стенде, электрическая схема которого представлена на рис. 1

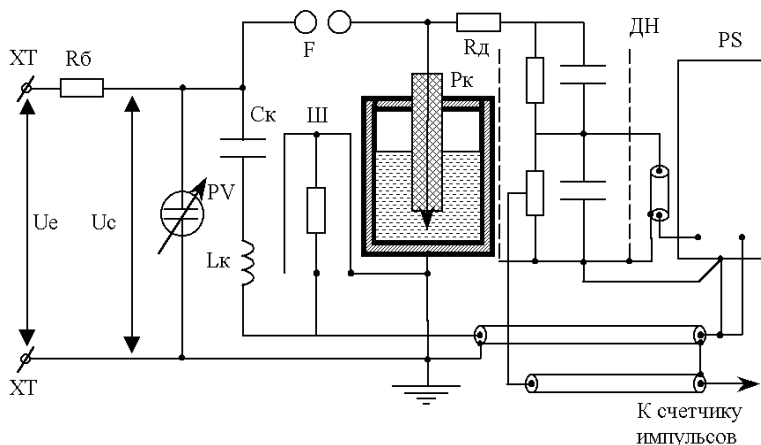


Рисунок 1 – Электрическая схема контура:

$U_e$  – напряжение источника питания;  $R_b$  – балластный резистор;  $C_k$  – рабочая емкость разрядного контура;  $U_c$  – рабочее напряжение;  $PV$  – киловольтметр;  $L_k$  – индуктивность разрядного контура;  $\text{Ш}$  – коаксиальный шунт;  $P_k$  – рабочая камера;  $R_d$  – демпфирующий резистор;  $\text{ДН}$  – делитель напряжения;  $PS$  – запоминающий осциллограф

Исследуемый водный раствор ПАВ с заданной концентрацией, в объеме  $1 \text{ дм}^3$ , заливался в нержавеющую разрядную камеру, которая закрывалась крышкой. Камера была оборудована электродной системой острие – плоскость. Межэлектродный промежуток подбирался с целью обеспечения разрядов близких к критическим. Режим ввода энергии в плазменный канал разряда варьировался параметрами элементов разрядного контура. В диапазоне варьируемых значений элементов разрядного контура неизменными были запасаемая энергия, равная  $1 \text{ кДж}$ , и индуктивность контура, которая составляла  $4 \text{ мкГн}$ . При этом емкость изменялась ступенями в диапазоне от  $1,2$  до  $4,8 \text{ мкФ}$ , а напряжение самопробоя разрядника – от  $21$  до  $41 \text{ кВ}$ . Число разрядов для всех растворов ПАВ было неизменным и составляло  $n = 300$ , при

этом забор проб из разрядной камеры осуществлялся при воздействии 50; 100; 200 и 300 разрядов. В процессе воздействия производилась регистрация разрядных токов и напряжений на запоминающий осциллограф с последующей обработкой данных на компьютере. Варьирование значениями элементов и параметров разрядного контура позволяло изменять скорость нарастания тока от  $4,8 \cdot 10^8$  до  $2,5 \cdot 10^9$  А/с, а длительность первой полуволны тока от 9,2 до  $17 \cdot 10^{-6}$  с, тем самым, изменяя режим ввода энергии в плазменный канал разряда.

Исследование влияния ЭР в растворах ПАВ на поверхностные явления и обменные процессы проводилось методом экспериментального измерения поверхностного натяжения, моющей способности, краевого угла смачивания, а также расчетной оценки коэффициента растекания по Гаркинсу.

Для измерения поверхностного натяжения ( $\sigma$ ) на границе жидкость (раствор ПАВ) – газ (воздух) был выбран метод счета капель с использованием сталагмометра [10]. В основе метода лежит условие отрыва капли под действием собственного веса. Для вычисления поверхностного натяжения использовали стандартную жидкость с известным значением  $\sigma$ . В качестве стандартной жидкости для водорастворимых ПАВ использовали воду. Величину поверхностного натяжения  $\sigma$  рассчитывали по формуле:

$$\sigma = \frac{\sigma_0 \cdot \rho_u \cdot n_0}{\rho_0 \cdot n_u}, \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  – поверхностное натяжение воды при исследуемой температуре, мН/м;

$\rho_u$  – плотность исследуемого раствора, кг/м<sup>3</sup>;

$n_0$  – число капель воды;

$\rho_0$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$n_u$  – число капель исследуемого раствора.

Принимая  $\rho_0$  и  $\rho_u$  близкими по значению, применяли упрощенную формулу:

$$\sigma = \frac{\sigma_0 \cdot n_0}{n_u}, \quad (2)$$

При определении краевого угла смачивания использовали метод измерения линейных размеров капли, нанесенной на поверхность [11]. Суть метода заключается в фотографировании цифровым фотоаппаратом изображения капли, увеличенного с помощью микроскопа МПБ-3. Затем цифровое изображение переносилось в графический редактор с дальнейшим измерением диаметра растекания капли и ее высоты. Расчет значения величины краевого угла смачивания  $\theta$  производился по формуле:

$$\theta = \arccos \left[ \frac{\left( \frac{d}{2} \right)^2 - h^2}{\left( \frac{d}{2} \right)^2 + h^2} \right], \quad (3)$$

где  $d$  – диаметр растекания капли, м;  
 $h$  – высота капли, м.

По экспериментально полученным значениям  $\sigma$  и  $\theta$  определялся коэффициент растекания  $S$  по Гаркинсу – разность между работой адгезии  $W_a$  и работой когезии  $W_k$  [11], который характеризует процесс смачивания

$$S = W_a - W_k = \sigma \cdot (\cos \theta - 1) \quad (4)$$

Коэффициент растекания связан со строением жидкостей и с характером ориентации их молекул на границе раздела фаз, при полном смачивании  $S \rightarrow 0$ . Из уравнения (4) следует, что чем меньше работа когезии жидкости (меньше  $\sigma$  при постоянном  $\cos \theta$ ), тем легче эта жидкость смачивает различные твердые тела. При положительном значении коэффициента жидкость растекается по поверхности, при отрицательном – не растекается.

Моющую способность исследуемых веществ по отношению к асфальто-смоло-парафиновым отложениям нефти определяли по методике "холодного" цилиндра, разработанной во ВНИИнефть г. Москва и изложенной ранее в [7]. Величину эффективности моющей способности  $\mathcal{E}_m$  определяли по формуле:

$$\mathcal{E}_m = \left( \frac{m_2}{m_1} \right) \cdot 100\%, \quad (5)$$

где  $m_2$  – масса отмытого осадка, г;

$m_1$  – масса осадка, образовавшегося на поверхности «холодного» цилиндра, г.

**Основные результаты.** Ранее, в работах [4, 7-9] было установлено, что электрическая энергия, которая выделяется в разрядном промежутке, оказывает влияние на физико-химические свойства раствора, как на стадии формирования канала, так и на стадии выделения энергии в канале разряда. Экспериментально установлено, что в используемой электродной системе острие – плоскость при межэлектродном промежутке от 33 до 36 мм, средний разброс отношения долей энергии, затраченной на каждую из стадий, лежит в пределах от 0,896 до 1,12. При этом удельное электрическое сопротивление исследуемых растворов ПАВ было различным от  $\rho = 5,98 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  (Катапин),  $\rho = 10,2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  (АФ<sub>9</sub>-12),  $\rho = 10,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  (Сульфол) до  $\rho = 38,7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  (НМК-РХ). Хорошая стабильность отношений долей энергии дает возможность производить сравнение электроразрядного воздействия для данной

группы растворов ПАВ при наработке одинакового числа разрядов.

Для всех исследуемых растворов при разных режимах ввода энергии за счет изменения рабочего напряжения и емкости накопителя при постоянной индуктивности контура сохраняется форма и длительность первого импульса мощности, и незначительно (в пределах разброса до 10 %) изменяется амплитуда (см. рис. 1-4). На этих же рисунках приведены данные о влиянии удельной энергии воздействия при изменении режима ввода энергии на изменение поверхностного натяжения растворов ПАВ на границах с воздухом.

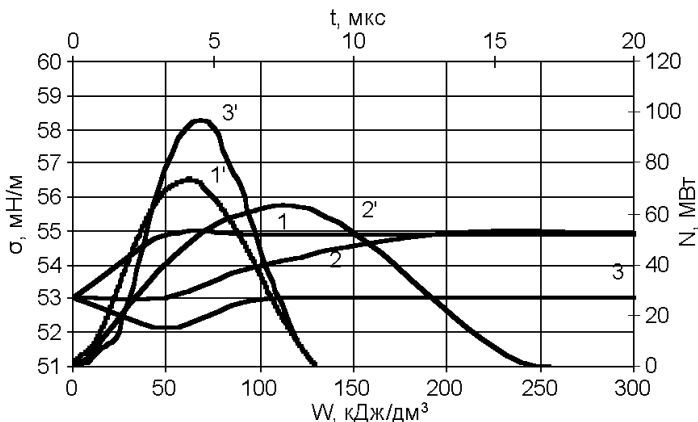


Рисунок 2 – Изменение первого полупериода электрической мощности во времени (1',2',3') и зависимость поверхностного натяжения Катапина от удельной энергии воздействия (1,2,3) при: 1–  $U = 30$  кВ, 2 –  $U = 21$  кВ, 3 –  $U = 41$  кВ

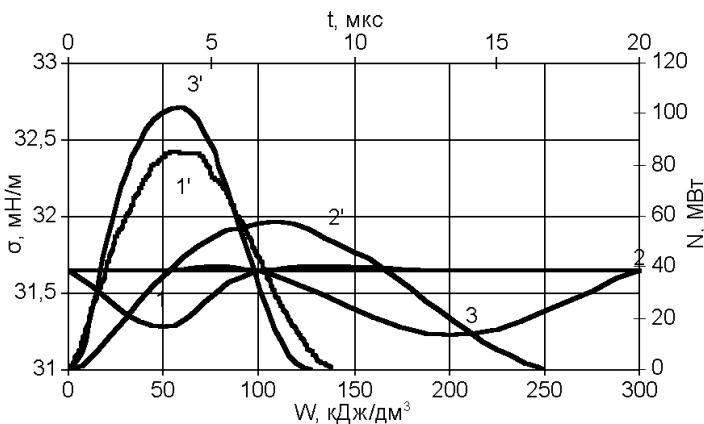


Рисунок 3 – Изменение первого полупериода электрической мощности во времени (1',2',3') и зависимость поверхностного натяжения АФ<sub>9</sub>-12 от удельной энергии воздействия (1,2,3) при: 1–  $U = 30$  кВ, 2 –  $U = 21$  кВ, 3 –  $U = 41$  кВ

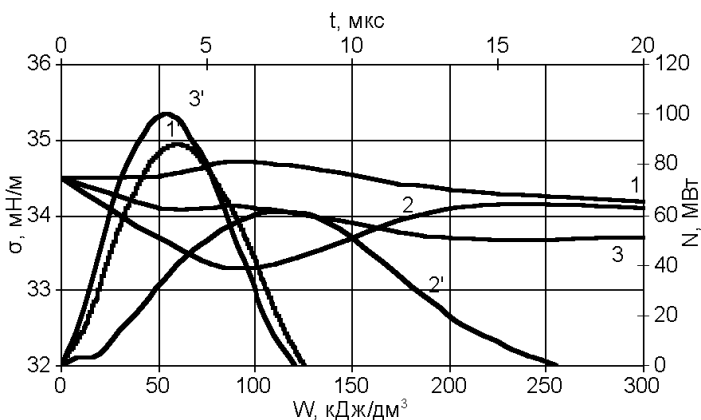


Рисунок 4 – Первый полупериод электрической мощности (1',2',3'), зависимость поверхностного натяжения Сульфанола от удельной энергии воздействия (1,2,3) при: 1–  $U=30$  кВ, 2 –  $U=21$  кВ, 3 –  $U=41$  кВ

Анализ результатов исследований показал, что ЭР воздействие на раствор Катапина (см. рис. 2, кривая 1) при рабочем напряжении 30 кВ ( $C = 2,4$  мкФ) удельной энергией  $50 \text{ кДж/дм}^3$  приводит к увеличению свободной поверхностной энергии системы, что проявляется в возрастании поверхностного натяжения раствора Катапина на границе с воздухом на  $\sim 4\%$ . Дальнейшее увеличение удельной энергии до 100, 200 и  $300 \text{ кДж/дм}^3$  практически не приводит к изменению установившегося поверхностного натяжения.

Изменение режима ввода энергии путем снижения рабочего напряжения до 21 кВ и увеличения емкости накопителя до 4,8 мкФ привело к существенному снижению скорости ввода энергии и увеличению длительности импульса приблизительно в 2 раза, но незначительному снижению амплитуды импульса мощности  $\sim 5\%$ . При этом электроразрядное воздействие на раствор Катапина удельной энергией  $50 \text{ кДж/дм}^3$  не оказывает влияния на свободную поверхностную энергию раствора (рис. 2, кривая 2), система остается устойчивой. Количественные изменения наблюдаются лишь при возрастании удельной энергии воздействия до  $100 \text{ кДж/дм}^3$  и приводят к увеличению поверхностного натяжения на  $\sim 2\%$ , а значит и свободной поверхностной энергии системы, возрастание которой продолжается также при последующем импульсном воздействии до  $200 \text{ кДж/дм}^3$  на  $\sim 4\%$  и сохранении этого показателя при  $300 \text{ кДж/дм}^3$ .

Увеличение свободной поверхностной энергии системы целесообразно для целей торможения процессов смачивания и адсорбционных процессов. Для задач интенсификации этих процессов необходимо снижение поверхностной энергии системы и, следовательно, ее поверхностного натяжения.

Увеличение рабочего напряжения до 41 кВ (рис. 2, кривая 3) при емко-

сти 1,2 мкФ показало возможность снижения поверхностного натяжения на ~ 2 %, при удельной энергии 50 кДж/дм<sup>3</sup>, однако последующее увеличение числа импульсов ведет уже к росту свободной поверхностной энергии системы, наблюдается увеличение поверхностного натяжения на те же ~ 2 %, возвращаясь к исходной величине, наблюдаемой до начала воздействия

При электроразрядном воздействии на раствор АФ<sub>9</sub> – 12 (рис. 3, кривая 1) удельной энергией 50 кДж/дм<sup>3</sup> (при рабочем напряжении 30 кВ) происходит снижение поверхностного натяжения приблизительно на 2 %. Однако дальнейшее повышение удельной энергии воздействия до 100 кДж/дм<sup>3</sup> приводит к росту свободной поверхностной энергии раствора и поверхностное натяжение системы на границе с воздухом повышается до исходного состояния.

Изменение режима ввода энергии путем снижения рабочего напряжения до 21 кВ и увеличения емкости накопителя до 4,8 мкФ не нарушает равновесного состояния системы раствора АФ<sub>9</sub> – 12 во всем диапазоне введенной энергии от 50 до 300 кДж/дм<sup>3</sup> (рис. 3, кривая 2).

Удельная энергия воздействия 50 кДж/дм<sup>3</sup> при увеличении рабочего напряжения до 41 кВ (рис. 3, кривая 3) и снижении емкости до 1,2 мкФ не приводит к изменению состояния поверхностной энергии системы, а при увеличении удельной энергии до 100 кДж/дм<sup>3</sup> начинается сдвиг равновесия в сторону снижения свободной внутренней энергии системы: поверхностное натяжение снижается на ~ 2 %. Однако, это состояние неустойчиво и уже дальнейший рост удельной энергии до 200 кДж/дм<sup>3</sup> вызывает обратный процесс и система начинает наращивание свободной поверхностной энергии, выравнивание поверхностного натяжения к возвращению до исходного равновесного значения.

Влияние ЭР воздействия на поведение анионоактивного ПАВ – Сульфанола представлено на рис. 4. В этом случае каждый из используемых режимов ввода энергии приводит к снижению поверхностного натяжения при воздействии 50 кДж/дм<sup>3</sup>, наибольшая активность снижения свободной поверхностной энергии раствора достигает ~ 2,5 % при напряжении 21 кВ (рис. 4, кривая 1).

Менее выражен спад поверхностного натяжения при снижении напряжения до 30 кВ (кривая 2) и повышении до 41 кВ (кривая 3) – 0,9 % и 0,8% соответственно. При этом наблюдается монотонно убывающая зависимость с увеличением удельной энергии до 200 кДж/дм<sup>3</sup> и практически линейна при дальнейшем ее увеличении (до 300 кДж/дм<sup>3</sup>), что дает основание для прогнозирования поведения этой системы. Тогда как после снижения свободной поверхностной энергии Сульфанола (кривая 1) небольшим количеством удельной энергии (50 кДж/дм<sup>3</sup>) дальнейшее воздействие (до 200 кДж/дм<sup>3</sup>) приводит к увеличению свободной поверхностной энергии практически до исходной величины. После этого увеличение энергии до 300 кДж/дм<sup>3</sup> уже не

изменяет равновесия системы и возросшее при  $200 \text{ кДж/дм}^3$  поверхностное натяжение раствора Сульфанола остается неизменным. Аналогично Сульфолу ведет себя НМК-РХ (рис. 5), только при 21 кВ наблюдается более ощутимое снижение свободной поверхностной энергии раствора до  $\sim 10\%$  (кривая 2) при воздействии  $100 \text{ кДж/дм}^3$ , а дальнейшее воздействие (до  $300 \text{ кДж/дм}^3$ ) приводит к росту свободной поверхностной энергии, но так и не достигает исходной величины.

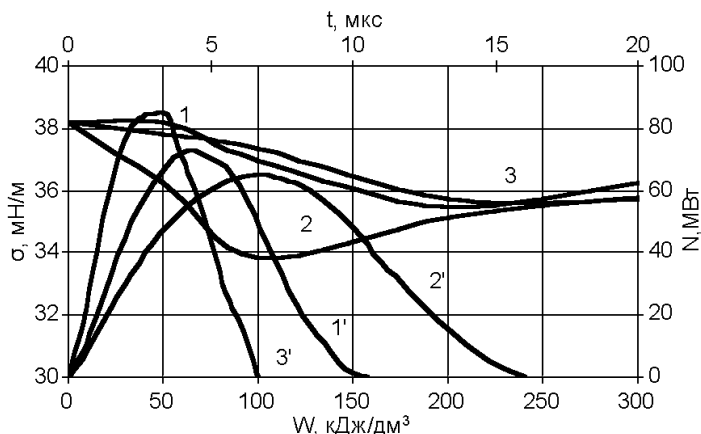


Рисунок 5 – Первый полупериод электрической мощности (1',2',3'), зависимость поверхностного натяжения НМК-РХ от удельной энергии воздействия (1,2,3) при: 1 –  $U = 30 \text{ кВ}$ , 2 –  $U = 21 \text{ кВ}$ , 3 –  $U = 41 \text{ кВ}$ .

О том, что ЭР воздействие приводит к изменению поверхностной энергии растворов ПАВ свидетельствуют результаты исследований свободной поверхностной энергии этих ПАВ на границах с твердой поверхностью. На рисунках 6-9 представлены результаты влияния удельной энергии ЭР воздействия и режима ввода энергии на изменение коэффициента растекания и моющей способности. Эти данные коррелируют с описанными выше данными по изменению поверхностного натяжения растворов. При снижении поверхностного натяжения снижается краевой угол смачивания и увеличивается коэффициент растекания, Это свидетельствует о том, что в результате ЭР система переходит в состояние с меньшей энергией Гиббса. Жидкость, как известно, растекается, если ее межмолекулярные связи разрушаются в результате адгезии, то есть стремления системы к уменьшению поверхностной энергии [12]. Увеличение свободной поверхностной энергии раствора Катапина (рис. 6) в результате ЭР воздействия на каждом из исследуемых режимов приводит к снижению коэффициента растекания.



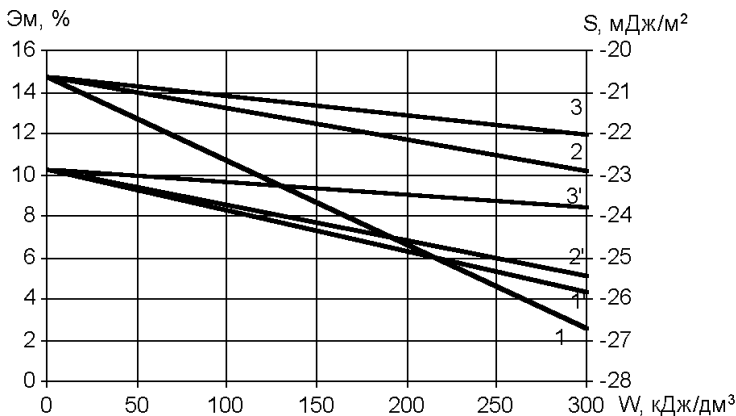


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента растекания (1',2',3') и моющего действия Катапина (1,2,3) от удельной энергии воздействия при напряжении:  
1 – U= 30 кВ, 2 – U= 21 кВ, 3 – U= 41 кВ

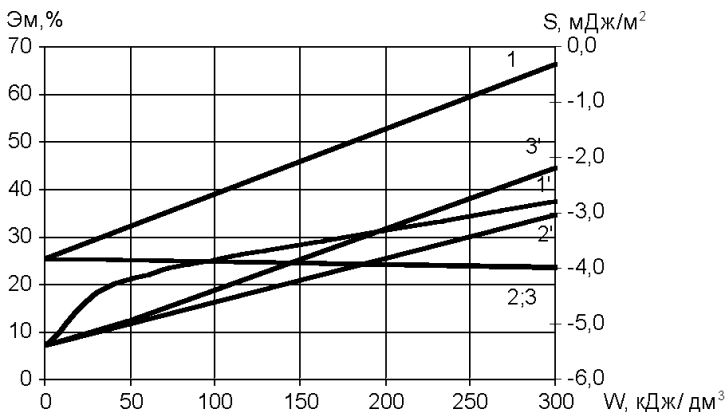


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента растекания (1',2',3') и моющего действия АФ<sub>9</sub>-12 (1,2,3) от удельной энергии воздействия при напряжении:  
1 – U= 30 кВ, 2 – U= 21 кВ, 3 – U= 41 кВ

Следствием изменения поверхностной энергии исследуемых растворов ПАВ, согласно теории Ребиндера [13], является изменение их способности удалять отложения с твердых поверхностей – моющего действия. В результате увеличения свободной поверхностной энергии, Катапин, после ЭР воздействия на всех режимах, ухудшает моющее действие (рис. 6). Эффективность снижения поверхностной энергии растворов АФ<sub>9</sub> – 12 (рис. 7), Сульфанола (рис. 8) и НМК-РХ (рис. 9) проявляется в усилении их способности удалять отложения с твердых поверхностей.

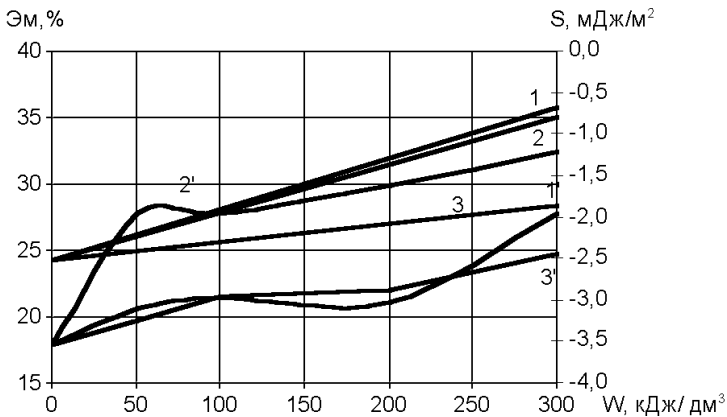


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента растекания (1',2',3') и моющего действия Сульфанола (1,2,3) от удельной энергии воздействия при напряжении:  
 1 – U= 30 кВ, 2 – U= 21 кВ, 3 – U= 41 кВ

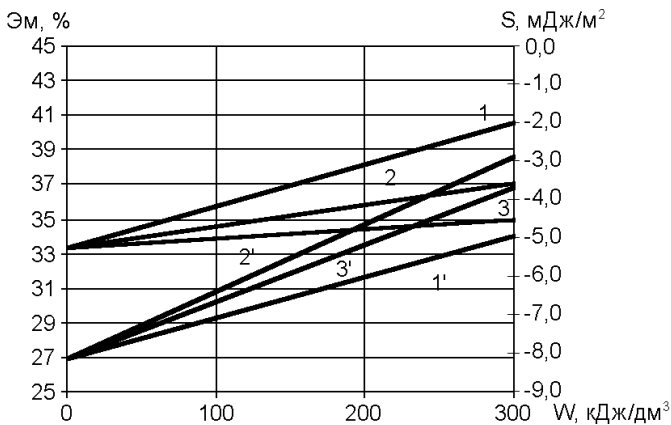


Рисунок 9 – Зависимость коэффициента растекания (1',2',3') и моющего действия НМК-РХ (1,2,3) от удельной энергии воздействия при напряжении:  
 1 – U= 30 кВ, 2 – U= 21 кВ, 3 – U= 41 кВ

**Выводы.** Установлено, что высоковольтные электрические разряды в растворах ПАВ влияют на поверхностные явления и обменные процессы на межфазных границах. Установлена связь между режимом ввода энергии высоковольтных ЭР и изменением поверхностного натяжения, краевого угла смачивания, коэффициента растекания и моющего действия в растворах ПАВ. ЭР воздействие в диапазоне исследуемых режимов ввода приводит к изменению поверхностной энергии исследуемых растворов ПАВ. Наиболее эффективно воздействие проявляется в растворах Сульфанола (анионного

ПАВ), АФ<sub>9</sub> – 12 (неионогенного ПАВ) и НМК-РХ (смеси анионных и неионогенных ПАВ) при длительности импульса мощности не менее  $17 \cdot 10^{-6}$  с при удельной энергии воздействия в диапазоне от 50 до 100 кДж/дм<sup>3</sup>.

**Список литературы:** 1. Пат. 4506734 США, МКИ<sup>2</sup> E21 B43/26. Fracturing Fluid Breaker system which is activated by fracture closure / K.G.Nolte. – Заявл. 5.6.84; Опубл. 11.10.85; Бюл № 22. 2. Пат. 3971317 США, МКИ<sup>2</sup> E21 B43/26. Detonation system and method / F.S.Gemmell, M.A.Fried. – Заявл. 12.2.74; Опубл. 27.07.76; Бюл №5. 3. *Круглицкий Н.Н., Горovenko Г.Г., Малишевский П.П.* Физико-химическая механика дисперсных систем в сильных импульсных полях. – Киев: Наукова думка, 1983. – 154 с. 4. *Сизоненко О.Н.* Синергетический эффект в изменении фильтрационных характеристик пористых насыщенных жидкостью сред при электроразрядном воздействии // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. Вып.42. – Днепропетровск: Ин-т геотехн. механики НАН Украины. – 2003. – С.173-186. 5. *Сизоненко О.Н., Шерстнев Н.М.* Особенности изменения фильтрационных характеристик пород-коллекторов при реагентно-импульсном воздействии // Нефтяное хозяйство. – 2001. – № 4. – С. 49-51. 6. *Сизоненко О.Н.* Электроразрядное воздействие на структуру капиллярно-пористых материалов // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. Вып. 69. – Днепропетровск: Ин-т геотехн. механики НАН Украины. – 2007. – С. 142-153. 7. *Сизоненко О.Н., Колмогорова Р.П., Тафтай Э.И.* и др. Влияние высоковольтного электрического разряда в растворах ПАВ на их моющие и ингибирующие свойства // Нефтяное хозяйство. – 2003. – № 2. – С. 53-55. 8. *Syzonenko O.M., Raychenko O.I.* Transformations in Hydrocarbon-Mineral Mixture Contacting with Tamol Solution at High-Voltage Electric Discharge // High Temperature Materials and Processes. – 2007. – Vol. 26, No. 2. – P. 131-137. 9. *Сизоненко О.Н., Райченко А.И.* Влияние высоковольтного электрического разряда на поведение композиции углеводородно-минеральная смесь / раствор ПАВ // Наукові нотатки: Міжвузівський зб. наук. Праць. – Луцьк: РВВ ЛДТУ. – 2007. – Вип. 20. – С. 447-452. 10. Поверхностно-активные вещества. Синтез, анализ, свойства, применение / Под ред. *А.А.Абрамзона*. – Л.: Химия, 1988. – 200 с. 11. *Абрамзон А.А.* Поверхностно-активные вещества: свойства и применение. – Л.: Химия, 1981. – 304 с. 12. *Фролов Ю.Г.* Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1988. – 464 с. 13. *Ребиндер П.А.* Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия: Избранные труды. – М.: Наука, 1978. – 386 с.

*Поступила в редколлегию 29.02.2008*

УДК 621.314

**О.В.ХВОЩАН; Ю.И.КУРАШКО**, канд.техн.наук; **В.В.ЛИТВИНОВ**;  
ИИПТ НАН Украины, Николаев

## **АНАЛИЗ СХЕМ ЗАРЯДНОЙ ЦЕПИ МАЛОГАБАРИТНЫХ ПОГРУЖНЫХ СКВАЖИННЫХ УСТРОЙСТВ ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ**

Проведено аналіз схем зарядного кола занурювальних свердловинних пристроїв, що відповідають умовам малих габаритних розмірів, високої робочої температури (до 373 К і вище), підвищених потужності і ККД пристрою.