

О.Н.СИЗОНЕНКО, д-р техн. наук, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

Э.И.ТАФТАЙ, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

Р.П.КОЛМОГорова, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

Е.В.ЛИПЯН, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

А.С.ТОРПАКОВ, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

А.Д.ЗАЙЧЕНКО, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

ВЛИЯНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА НА ИЗМЕНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СМАЧИВАНИЯ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ПОВЕРХНОСТНО- АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

У доповіді представлені результати експериментальних досліджень впливу гідродинамічних характеристик високовольтних імпульсних розрядів у розчинах поверхнево-активних речовин на їх енергетичні характеристики змочування – відносну роботу адгезії.

The report presents the results of experimental studies of the influence of the hydrodynamic characteristics of high-voltage pulse discharges in solutions of surface-active substances on their energy characteristics of wetting – relative work of adhesion.

Постановка задачі. При фільтрації жидкостей через пористі матеріали виникають проблеми, пов'язані з забрудненням пор різними видами відкладень, як хрупкими (окислами заліза і кремнія, глиною, известью, гіпсом, цементом, хлоридами кальція і магнезії), так і пластичними (асфальтенами, смолами, парафінами і др.).

Як показано в роботах [1, 2], фільтраційні характеристики пористих серед, закольматованих солями, покращуються за рахунок руйнування відкладень солей хвилями стиснення і виноса їх з зони впливу в результаті нестационарної фільтрації робочої технологічної рідини. Використання ж електророзрядної технології при впливі на породи, закольматовані асфальто-смоло-парафіновими відкладеннями (АСПО) неефективно, так як вищеперелічених факторів недостатньо для видалення в'язкопластичних АСПО. По цій же причині малоефективними вважаються і інші імпульсні методи.

В роботах [3 - 5] було запропоновано використовувати комплексне вплив-

вие высоковольтного электрического разряда (ЭР) в растворах поверхностно-активных веществ (ПАВ) на процессы фильтрации и регенерации пористых сред осадочного происхождения закольматированных АСПО. В этих работах было установлено, что использование в качестве рабочей среды при высоковольтном электрическом разряде растворов синтетических ПАВ способствует созданию синергетического эффекта в изменении фильтрационных характеристик пористых сред осадочного происхождения. Была высказана гипотеза, что неаддитивное изменение фильтрационных характеристик может происходить в результате усиления способности ПАВ удалять отложения с твердых поверхностей.

Известно, что эффективность действия ПАВ в различных технологиях зависит от интенсивности протекания поверхностных явлений в системах с их участием. Проведенные в работе [6] исследования позволили установить связь между режимом ввода энергии ЭР в растворах ПАВ, обусловленную параметрами разрядного контура, с изменением поверхностных явлений и обменных процессов на межфазных границах.

Дальнейшие исследования были направлены на оценку влияния волны сжатия при разряде как составной части ЭР воздействия на свойства растворов ПАВ, в частности, исследовалась связь гидродинамических характеристик разряда с изменением термодинамических характеристик растворов ПАВ.

Целью данной работы является исследование влияния гидродинамических характеристик электрических высоковольтных импульсных разрядов в коллоидных растворах ПАВ на изменение энергетических характеристик смачивания этих растворов.

Методика эксперимента Экспериментальные исследования выполнялись на стенде, представленном на рис. 1.

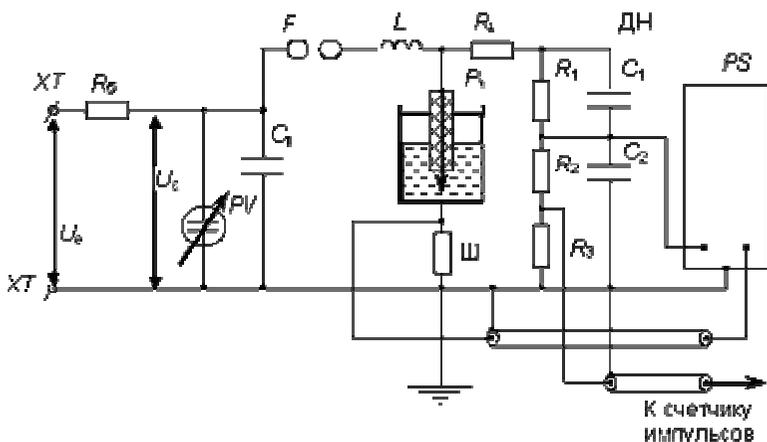
Режим ввода энергии в плазменный канал разряда изменялся путем варьирования параметрами разрядного контура, при этом неизменной была запасаемая энергия. Варьирование напряжением заряда и емкостью накопителя позволяло изменять скорость нарастания тока от $4,8 \cdot 10^8$ до $2,5 \cdot 10^9$ А/с и длительность первой полуволны тока от $3,5 \cdot 10^{-6}$ до $7 \cdot 10^{-6}$ с, а варьирование индуктивностью разрядного контура от $4 \cdot 10^{-6}$ до $16 \cdot 10^{-6}$ Гн обеспечило изменение длительности первой полуволны тока от $5 \cdot 10^{-6}$ до $9,7 \cdot 10^{-6}$ с, тем самым изменяя режим ввода энергии в плазменный канал разряда.

Электрические и энергетические характеристики разряда определялись по осциллограммам тока и напряжения на электродной системе. Осциллографирование тока проводилось с помощью омического коаксиального шунта, а напряжения с резистивно-емкостного делителя – согласно электрической схеме, приведенной на рис. 1.

В исследованиях были использованы представители анионных (алкил-

бензолсульфонат натрия Сульфонол концентрацией 4 кг/м³), неионогенных (оксиэтилированный алкилфенол Неонол АФ₉-12 концентрацией 1 кг/м³), катионных (Катапин-бактерицид алкил-полибензилпиридный хлорид концентрацией 6 кг/м³) типов ПАВ, и смесь анионных и неионогенных ПАВ (многофункциональная композиция НМК-РХ концентрацией 3 кг/м³).

Известно, что ЭР в водных электролитах носит случайный характер из-за большого количества факторов, которые влияют на его формирование, поэтому наблюдается значительный разброс электрических характеристик. Поскольку при многократном повторении опыта распределение характеристик разряда подчиняется нормальному закону, все результаты экспериментальных исследований представлены в виде средних арифметических значений характеристик разряда и соответствующих доверительных интервалов при коэффициенте надежности 0,65, вычисленных по результатам десяти опытов на каждой экспериментальной точке.



U_e – напряжение источника питания; R_b – балластный резистор; C_n – рабочая емкость разрядного контура; U_c – рабочее напряжение; PV – киловольтметр; L – индуктивность разрядного контура; $Ш$ – коаксиальный шунт; P_k – рабочая камера; R_d – демпфирующий резистор; PS – запоминающий осциллограф; F – воздушный разрядник; ДН – делитель напряжения; R_1, R_2, R_3, C_1, C_2 – элементы делителя напряжения

Рисунок 1 – Электрическая схема исследовательского стенда

Теоретическое исследование гидродинамических характеристик разряда выполнялось исходя из электрических характеристик разряда, полученных экспериментальным путем.

Максимум давления P_k в канале разряда определялся по формуле (1) [7,8]:

$$P_k = P_a \cdot b_0(\eta_1), \quad (1)$$

где P_a – промежуточный коэффициент давления, рассчитываемый по форму-

ле (2), Па; $b_0(\eta_1)$ – промежуточная безразмерная функция, определяемая по формуле (3); η_1 – доля энергии, выделенной в первом полупериоде тока разряда.

$$P_a = \left(\frac{\rho_0 U^2}{L \cdot l_p} \right)^{0,5}, \quad (2)$$

где ρ_0 – плотность рабочей среды, кг/м³; U – рабочее напряжение, В; L – индуктивность разрядного контура, Гн; l_p – длина разрядного промежутка, м.

$$b_0(\eta_1) = \frac{\gamma - 1}{2\alpha_1 \gamma} \cdot \frac{\eta_1^{0,3} \cdot (1 - 0,85\eta_1)(1 + \eta_1^3)^{2\alpha_1}}{(0,37 + 0,6\eta_1^2)^{2\alpha_1 - 1,5}}, \quad (3)$$

где γ – отношение теплоемкостей жидкости при постоянном давлении и объеме; α_1 – безразмерный коэффициент, рассчитываемый по формуле (4):

$$\alpha_1 = 0,73 + 1,22\eta_1^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-1,47\eta_1^3}. \quad (4)$$

Начальные значения гидродинамических параметров принимались равными их значениям в невозбужденной среде.

Экспериментальные и теоретические исследования проводились в водных растворах ПАВ и в дистиллированной воде при нормальных условиях. Так как почти во всех режимах обработки разряд был близким к критическому, то можно считать, что наибольшее влияние на гидродинамические характеристики разряда оказывалось первым полупериодом тока разряда.

В работе представлены исследования связи гидродинамических характеристик разряда с изменением относительной работы адгезии.

Под адгезией (или прилипанием) понимают силу сцепления между двумя, приведенными в соприкосновение разнородными телами. Адгезию часто характеризуют работой адгезии, которую надо затратить, чтобы разделить две фазы, имеющие поверхность соприкосновения 1 см² (или 1 м²). В результате первоначальная энергия Гиббса системы уменьшается на величину, равную работе адгезии W_a

$$W_a = -\Delta G. \quad (5)$$

Работу адгезии можно рассчитать, используя уравнение Дюпре–Юнга:

$$W_a = \sigma \cdot (1 + \cos \theta), \quad (6)$$

где σ – поверхностное натяжение раствора, Н/м, θ – краевой угол смачивания.

Уравнение (6) позволяет рассчитать работу адгезии если определить экспериментально краевой угол смачивания и поверхностное натяжение растворов ПАВ.

Экспериментальное измерение поверхностного натяжения производилось методом счета капель с помощью сталагмометра (методика описана в работе [5], максимальная погрешность измерений 3 %, минимальная выборка из 5 измерений).

Для определения краевого угла смачивания растворов применялся метод измерения геометрических размеров капли [9]. Увеличенное микроскопом и оптической системой фотоаппарата изображение капли регистрировалось в нем и в цифровом виде переносилось в персональную электронно-вычислительную машину для последующей обработки. При помощи графического редактора на изображении капли определялся диаметр основания капли d и ее высота h . Косинус краевого угла смачивания θ вычислялся по формуле (7).

$$\cos \theta = \frac{(d/2)^2 - h^2}{(d/2)^2 + h^2}. \quad (7)$$

Отсюда краевой угол смачивания

$$\theta = \arccos \left[\frac{(d/2)^2 - h^2}{(d/2)^2 + h^2} \right]. \quad (8)$$

Проверка погрешности методики проводилась по эталонным жидкостям с известной величиной краевого угла смачивания. Максимальная погрешность измерений составила не более 5%, минимальная выборка из 10 измерений.

Работа когезии W_k определяется затратой энергии на обратимый изотермический разрыв тела по сечению, равному единице площади. Т.к. при разрыве образуется поверхность в две единицы площади, то работа когезии равна удвоенному значению поверхностного натяжения на границе с газом:

$$W_k = 2 \cdot \sigma. \quad (9)$$

Относительная работа адгезии Z_a – величина, которая связывает работу адгезии W_a с работой когезии W_k

$$Z_a = \frac{W_a}{W_k} = (\cos \theta + 1)/2, \quad (10)$$

где W_a – работа адгезии, Дж/м²; W_k – работа когезии, Дж/м².

Основная часть. Графическое изображение зависимости относительной работы адгезии раствора Сульфанола от максимума давления в канале разряда при варьировании значениями длительности первого полупериода тока разряда τ (рис. 2) показывает, что с ростом давления в канале разряда наблюдается рост относительной работы адгезии. Однако в зависимости от длительности первого полупериода тока разряда наблюдается и различная скорость роста относительной работы адгезии. Это означает, что рост давления в канале разряда является лишь одним из факторов, влияющих на снижение поверхностной энергии системы при ЭР разряде. Так как наибольший рост относительной работы адгезии наблюдается в режиме с $\tau=9,7$ мкс (рис. 2, кривая 4), то можно предположить, что при обработке аниоактивных ПАВ значимым фактором является не только амплитуда давления, но и время воздействия импульса давления, связанное с длительностью первого по-

лупериода тока разряда [7].

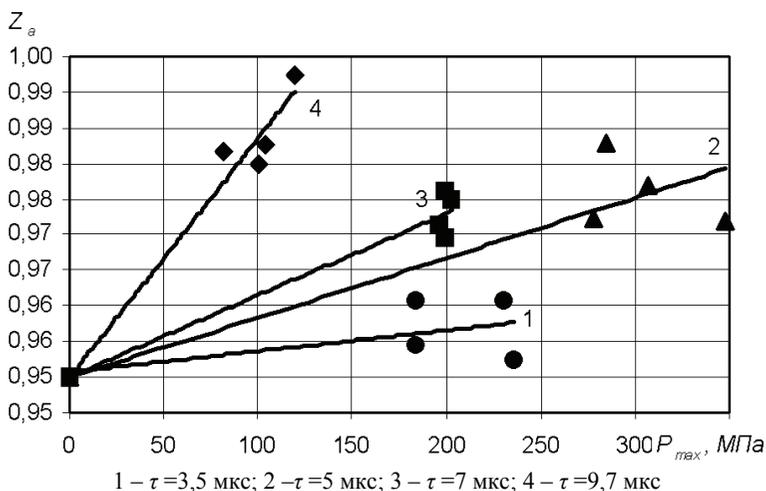


Рисунок 2 – Зависимость относительной работы адгезии от максимума давления в канале ЭР в растворе Сульфанола

При аналогичных параметрах воздействия на раствор неионогенного Неонола АФ₉-12 (рис. 3). прослеживается хорошо выраженная пропорциональная зависимость роста относительной работы адгезии от давления в канале разряда. Таким образом, можно заключить, что при обработке неионогенных ПАВ ключевым фактором является именно значение максимального давления в канале.

При обработке с теми же параметрами раствора НМК-РХ (смеси анионоактивных и неионогенных ПАВ с различными синтетическими добавками) тенденция роста относительной работы адгезии пропорционально максимуму давления в канале разряда сохраняется (рис. 4), однако режим обработки с большей длительностью воздействия давления (рис. 4, кривая 4) дала большую скорость роста относительной работы адгезии.

Таким образом, можно констатировать, что в смеси анионоактивных и неионогенных ПАВ проявляются особенности каждого из составляющих смеси, так как значимыми факторами обработки являются максимальное значение давления в канале разряда и длительность действия давления.

Поведение катионоактивного раствора Катапина при указанных длительностях первого полупериода тока разряда отличается от рассмотренных ранее растворов (рис. 5). С ростом максимума давления в канале разряда идет снижение относительной работы адгезии на всех режимах обработки. Однако при увеличении длительности первого полупериода разрядного тока (рис. 5, кривые 3,4) наблюдается и большая скорость снижения относительной работы адгезии. Таким образом, ЭР обработка катионоактивных ПАВ приводит к

снижению относительной работы адгезии, пропорционально времени воздействия давления.

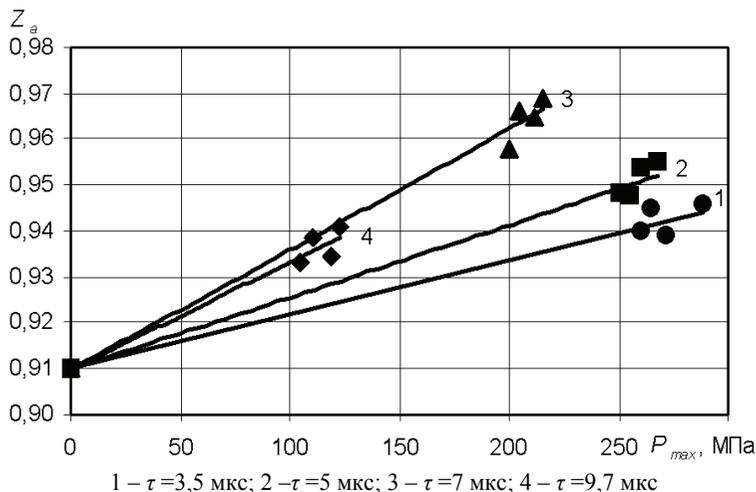


Рисунок 3 – Зависимость относительной работы адгезии от максимума давления в канале ЭР в растворе Неонол АФ₀-12

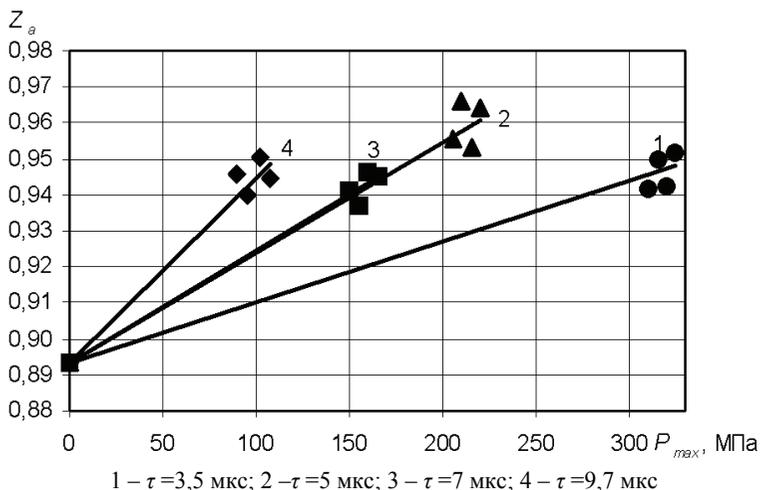


Рисунок 4 – Зависимость относительной работы адгезии от максимума давления в канале ЭР в растворе НМК-РХ

Таким образом, исследования показали, что модифицирующее действие ЭР на активность растворов ПАВ зависит от их типа по ионной характеристике.

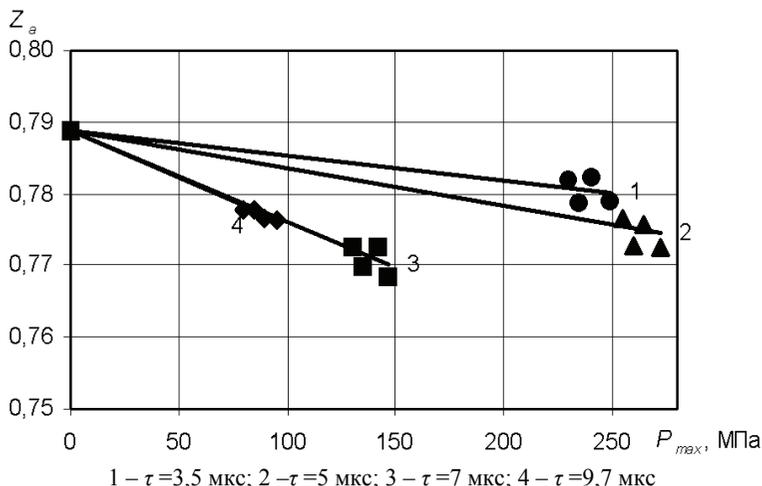


Рисунок 5 – Зависимость относительной работы адгезии от максимума давления в канале ЭР в растворе Катапина

Выводы. Установлены закономерности связи гидродинамических характеристик электрических высоковольтных импульсных разрядов в коллоидных растворах ПАВ с изменением энергетических характеристик смачивания водных растворов поверхностно-активных веществ. Установлено, что модифицирующее действие ЭР на активность растворов ПАВ зависит от их типа по ионной характеристике. Рост относительной работы адгезии в растворах, содержащих анионоактивные и неионогенные ПАВ (Сульфолон, Неонол АФ₉-12 и композиция НМК–РХ), возрастает с ростом максимума давления в канале ЭР. Увеличение максимума давления в канале ЭР при воздействии на раствор катионоактивных ПАВ (Катапин) способствует снижению относительной работы адгезии, что целесообразно использовать для решения проблем торможения процессов смачивания и адсорбции процессов. Важным фактором воздействия при ЭР обработке растворов анионоактивных, катионоактивных ПАВ и их композиции является длительность действия давления.

Список литературы: 1. Сизоненко О.Н. Особенности электроразрядной технологии интенсификации фильтрационных процессов в нефтяных коллекторах / О.Н. Сизоненко, И.С. Швец // Современные проблемы электрофизики и электродинамики жидкостей. – Санкт-Петербург: НИИ, 1988. – С. 137–139. 2. Сизоненко О.Н. Применение электроразрядного воздействия для обработки добывающих и нагнетательных скважин / О.Н. Сизоненко, И.С. Швец, А.В. Кучернюк // Нефтяное хозяйство. – 2000. – № 12. – С. 133–135. 3. Исследовать влияние комплексного воздействия электрического разряда и реагентной обработки на изменение фильтрационных характеристик пород-коллекторов нефтяных пластов с целью увеличения притока нефти в скважины: отчет о НИР (заключ.) / ИИПТ НАН Украины; рук. Сизоненко О.Н.; исполн.: Жекул В.Г. [и др.]. – Николаев, 1997. – 134 с. – № ГР 0194007379. – Инв. № 0398U005062. 4. Сизоненко О.Н. Особенности изменения фильтрационных характеристик пород-коллекторов при реагентно-импульсном воздействии / О.Н. Сизоненко, Н.М. Шерстнев // Нефтяное хозяйство. – 2001. – № 4. – С. 49–51.

5. Исследование и оценка синергетического эффекта в изменении фильтрационных характеристик пористых насыщенных сред при электрическом разряде в поверхностно-активных веществах: отчет о НИР (заключ.) / ИИПТ НАН Украины; рук. *Сизоненко О.Н.*; исполн.: *Дыхта Л.М.* [и др.]. – Николаев, 2003 – 239 с. – № ГР 0100U004071. – Инв. № 0203U006526.
6. Исследование импульсного воздействия высоковольтного разряда в растворах поверхностно-активных веществ на физико-химическое состояние системы жидкость – пористая среда: отчет о НИР (заключ.) / ИИПТ НАН Украины; рук. *Сизоненко О.Н.*; исполн.: *Ивлиев А.И.* [и др.]. – Николаев, 2009 – 204 с. – № ГР 0107U004475. – Инв. № 7.
7. *Шамко В.В.* Теоретические основы инженерных расчетов энергетических и гидродинамических параметров подводного искрового разряда / *В.В. Шамко, В.В. Кучеренко.* – Николаев: Ин-т импульсных процессов и технологий АН Украины, 1991. – 51 с. – (Препринт / АН Украины, Ин-т импульсных процессов и технологий; № 20).
8. *Наугольных К.А.* Электрические разряды в воде / *К.А. Наугольных, Н.А. Рой.* – М.: Наука, 1971. – 155 с.
9. Руководство к практическим работам по коллоидной химии / под ред. *О.Н. Григорова.* – М.; Л.: Химия, 1964. – 326 с.

Поступила в редколлегию 05.03.2010