

**О.Н.СИЗОНЕНКО**, докт.техн.наук, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины;

**Э.И.ТАФТАЙ**, Институт импульсных процессов и технологий;

**Р.И.МАЛАЯ**, Институт импульсных процессов и технологий;

**А.С.ТОРПАКОВ**, Институт импульсных процессов и технологий;

**Е.В.ЛИПЯН**, Институт импульсных процессов и технологий;

**Р.П.КОЛМОГорова**, Институт импульсных процессов и технологий

## **МОДИФИЦИРУЮЩЕЕ ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ РАЗРЯДОВ НА АКТИВНОСТЬ РАСТВОРОВ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ**

Наведено результати комплексних досліджень дії електричних імпульсних високовольтних розрядів на колоїдні розчини поверхнево-активних речовин. Встановлені закономірності зв'язку процесів адгезії за участю поверхнево-активних речовин з максимумом тиску у каналі розряду.

The results of complex researches of action of electric impulsive high-voltage digits on colloid solutions of superficially-active matters are given. Conformities to the law of communication of processes of adhesion with participation of superficially-active matters with maximum of pressure into the discharge channel are found.

**Постановка задачі.** Ефективність действия поверхностно-активних веществ (ПАВ) в различных технологиях зависит от интенсивности протекания поверхностных явлений в системах с их участием [1-3]. Исследования влияния закона ввода энергии при импульсных высоковольтных электрических разрядах (ЭР) в растворах ПАВ представляют научный и практический интерес в связи с интенсификацией физико-химических процессов на межфазных границах и проявлением модификации сред с участием ПАВ. В работах [4-5] показано, что ЭР в коллоидных растворах ПАВ влияет на поверхностные явления и обменные процессы на межфазных границах. Была установлена связь между режимом ввода энергии высоковольтных ЭР, обусловленная параметрами разрядного контура и изменением поверхностных явлений.

Дальнейшие исследования были направлены на оценку влияния волны давления 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 интенсивность протекания адгезионных процессов с участием поверхностно-активных веществ.

**Методика эксперимента.** Экспериментальные исследования выполнялись на стенде, описанном ранее [4].

В исследованиях были использованы представители следующих типов ПАВ:

- анионоактивные ПАВ – Сульфенол (алкилбензолсульфонат натрия) с концентрацией 4 кг/м<sup>3</sup>;
- неионогенные ПАВ – Неонол АФ<sub>9</sub>-12 (оксиэтилированный алкилфенол) с концентрацией 1 кг/м<sup>3</sup>;
- катионоактивные ПАВ – Катапин-бактерицид (алкилполибензилпирридный хлорид) с концентрацией 6 кг/м<sup>3</sup>;
- многокомпонентная смесь анионных и неионогенных ПАВ различного химического строения и целевых добавок – НМК-РХ (многофункциональная композиция ПАВ) с концентрацией 3 кг/м<sup>3</sup>.

Режим ввода энергии в плазменный канал разряда изменялся путем варьирования параметрами разрядного контура, при этом неизменной была запасаемая энергия.

Параметры контура ЭР воздействия и обработки растворов ПАВ приведены в таблице.

Параметры контура ЭР воздействия и обработки растворов ПАВ

Рабочее напряжение, U <sub>c</sub> , кВ	Рабочая емкость разрядного контура, C <sub>н</sub> , мкФ	Индуктивность разрядного контура L, мкГн	Запасаемая энергия W <sub>з</sub> , кДж	Количество разрядов n
21	4,8	4	1	от 50 до 300
30	2,4	4	1	от 50 до 300
41	1,2	4	1	от 50 до 300
30	2,4	8	1	от 50 до 300
30	2,4	16	1	от 50 до 300
30	2,4	32	1	от 50 до 300

Варьирование напряжением заряда накопителя позволяло изменять скорость нарастания тока разряда от  $4,8 \cdot 10^8$  до  $2,5 \cdot 10^9$  А/с при длительности первой полуволны тока от  $3,1 \cdot 10^{-6}$  до  $6,2 \cdot 10^{-6}$  с. Варьирование индуктивностью разрядного контура от  $8 \cdot 10^{-6}$  до  $32 \cdot 10^{-6}$  Гн обеспечивало изменение длительности первой полуволны тока от  $9,2 \cdot 10^{-6}$  до  $37 \cdot 10^{-6}$  с, соответственно, тем самым регулировался режим ввода энергии в плазменный канал разряда.

Энергетические характеристики рассчитывались по осциллограммам тока и напряжения на разрядном промежутке. Осциллографирование тока проводилось с помощью омического коаксиального шунта, а напряжение с резистивно-емкостного делителя – согласно электрической схеме, приведен-

ной в [4]. Обработка полученных осциллограмм описана в [6-8]. По этим данным расчетным путем находилась мощность на протяжении активной стадии разряда  $N(t)$ :

$$N(t) = U(t) \cdot I(t), \quad (1)$$

где  $U(t)$ ,  $I(t)$  – зависимости напряжения и тока (соответственно) в канале разряда от времени, полученные экспериментально.

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 при многочисленном повторении разряда. В работе [9] показано, что при многократном повторении опыта распределение характеристик разряда подчиняется нормальному закону. Поэтому 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 по методике, изложенной в [10-11].

Теоретическое исследование гидродинамических характеристик разряда выполнялось, исходя из электрических и энергетических характеристик разряда.

Экспериментальные и теоретические исследования проводились в водных растворах ПАВ для случая при нормальных условиях.

**Основная часть.** При построении математической модели исследуемых процессов были приняты следующие допущения:

- стенки электроразрядной камеры абсолютно тверды;
- канал разряда в начальный момент времени имеет форму прямого круглого цилиндра, высота которого равняется длине межэлектродного промежутка, а ось симметрии совпадает с осью симметрии разрядной камеры;
- стенка канала непроницаема;
- камера заполнена идеальной сжимаемой жидкостью, а канал разряда – идеальной плазмой.

Для определения температуры плазмы в канале разряда использовалось выражение:

$$T = \left[ \frac{E \cdot (\gamma - 1) D}{\sigma \cdot \tau \cdot S_0} \right]^{\frac{1}{5}}, \quad (2)$$

где  $E$  – энергия, выделенная в процессе разряда, определяемая по формуле:

$$E = \int_{t_0}^{t_{\max}} N(t) dt; \quad (3)$$

$\gamma$  – отношение теплоемкостей жидкости при постоянном давлении  $c_p$  и объеме  $c_v$  соответственно;  $D$  – энергия диссоциации;  $\sigma$  – газокинетическое сечение рассеяния;  $\tau$  – длительность первой полуволны мощности;  $S_0$  – площадь поверхности канала разряда, в соответствии с моделью короткого цилиндра [12]:

$$S_0 = 2\pi R_0 l_p, \quad (4)$$

где  $l_p$  – межэлектродный промежуток,

$$R_0 = \left( \frac{(\gamma - 1) \cdot \tau^2 \cdot E}{\pi \cdot \rho \cdot l_p} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность вещества в канале разряда.

Максимум давления в канале разряда определялся по формуле:

$$P_\kappa = P_m \cdot b_0(\eta), \quad (6)$$

где  $P_m = \left( \frac{\rho \cdot U_0}{L \cdot l_p} \right)^{0,5}$ ,  $\eta$  – доля энергии, выделенной в первом полупериоде тока разряда.

$$b_0(\eta) = \frac{\gamma - 1}{2\alpha\gamma} \cdot \frac{\eta^{0,3} \cdot (1 - 0,85\eta)(1 + \eta)^3}{(0,37 + 0,6\eta^2)^{2\alpha - 1,5}}, \quad (7)$$

$$\alpha = 0,73 + 1,22\eta^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-1,47\eta^3}. \quad (8)$$

Начальные значения гидродинамических параметров принимали равными значениям в невозбужденной среде.

Так как разряд был близким к критическому, то можно считать, что наибольшее воздействие на вещество вызывалось первым полупериодом волны мощности.

В качестве термодинамической характеристики оперировали относительной работой адгезии.

Относительная работа адгезии  $Z_a$  – величина, которая связывает работу адгезии  $W_a$  с работой когезии  $W_\kappa$  [5],

$$Z_a = \frac{W_a}{W_\kappa}. \quad (10)$$

Рассматривалась связь относительной работы адгезии и максимума давления в канале разряда.

Результаты теоретического исследования связи энергетических и гидродинамических характеристик электрического разряда (максимума давления в канале разряда) в водных растворах ПАВ с термодинамическими характеристиками среды с использованием экспоненциальной аппроксимации представлены на рис. 1-8.

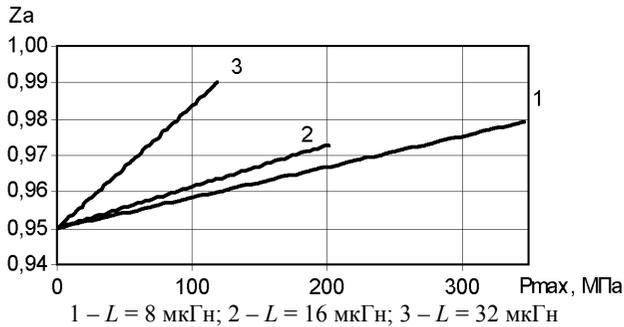


Рисунок 1 – Зависимость относительной работы адгезии от максимума давления в канале ЭР в растворе Сульфанола при  $U = 30$  кВ

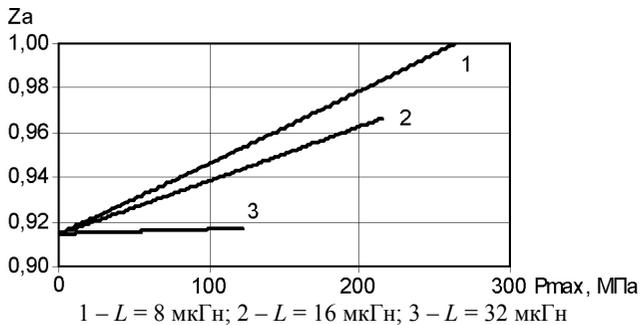


Рисунок 2 – Зависимость относительной работы адгезии от максимума давления в канале ЭР в растворе Неонола АФ<sub>9</sub>-12 при  $U = 30$  кВ

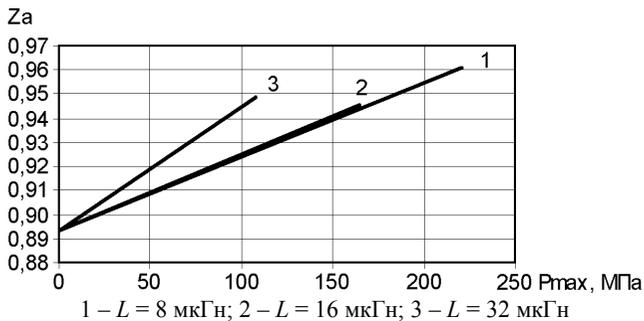


Рисунок 3 – Зависимость относительной работы адгезии от максимума давления в канале ЭР в растворе НМК-РХ при  $U = 30$  кВ

Графическое изображение зависимости относительной работы адгезии раствора Сульфанола при постоянном напряжении  $U = 30$  кВ и варьировании значениями индуктивности  $L$  (рис. 1) от максимума давления в канале разря-

да показывает, что с ростом давления в канале разряда наблюдается рост относительной работы адгезии. Такое поведение раствора Сульфанола означает снижение поверхностной энергии системы с ростом максимума давления в канале разряда.

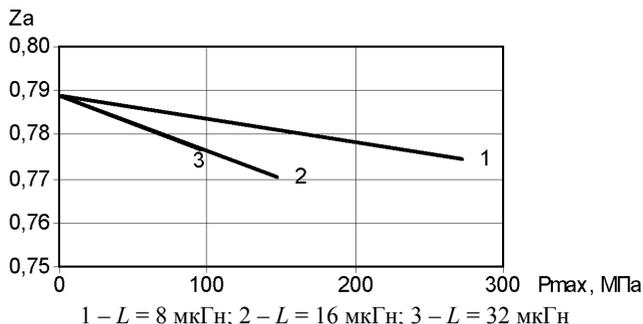


Рисунок 4— Зависимость относительной работы адгезии от максимума давления в канале ЭР в растворе Катапина при  $U = 30$  кВ

Аналогичные изменения поверхностной энергии с ростом максимума давления в канале разряда происходят в водных растворах Неонола АФ<sub>9</sub>-12 и НМК-РХ (рис. 2 и рис. 3) при тех же параметрах воздействия.

Поведение катионоактивного раствора Катапина при указанных режимах ЭР воздействия отличается от рассмотренных ранее (рис. 4). При напряжении  $U = 30$  кВ с ростом максимума давления в канале разряда идет снижение относительной работы адгезии на всех режимах варьирования индуктивностью.

При изменении режима ввода энергии путем изменения рабочего напряжения и емкости накопителя при постоянной индуктивности контура, наблюдается тенденция роста относительной работы адгезии растворов Сульфанола (рис. 5), Неонола АФ<sub>9</sub>-12 (рис. 6) и НМК-РХ (рис. 7), которая сохранилась и связана с максимумом давления в канале разряда.

В отношении раствора Катапина (рис. 8) при обработке режимами с варьированием напряжения относительная работа адгезии монотонно уменьшается с ростом максимума давления в канале разряда и, как следствие, свободная поверхностная энергия системы увеличивается пропорционально росту амплитудного значения максимума давления в канале разряда.

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

Как видно из формул (6), (7) и (8) и рисунков (рис. 1-8), максимум давления в канале разряда зависит от совокупности факторов, таких, как падающее напряжение на разрядном промежутке, индуктивности разрядного кон-

тура, длины межэлектродного промежутка и доли энергии, выделенной в первом полупериоде тока разряда. Поскольку индуктивность разрядного контура оказывает существенное влияние на долю энергии, выделенной в первом полупериоде тока разряда, то можно сказать, что наиболее существенное влияние на величину максимума давления в канале разряда оказывает именно индуктивность разрядного контура.

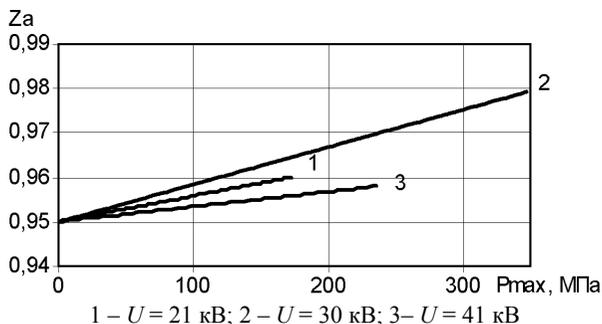


Рисунок 5 – Зависимость относительной работы адгезии от максимума давления в канале ЭР в растворе Сульфанола при  $L = 4$  мкГн

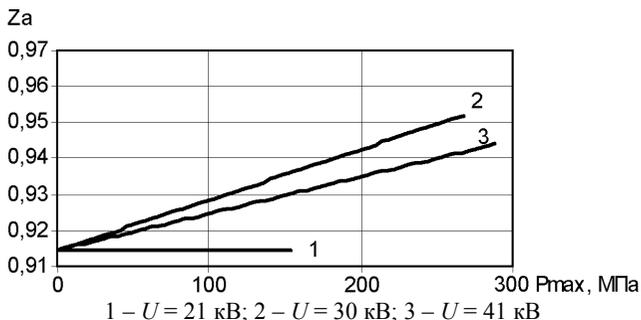


Рисунок 6 – Зависимость относительной работы адгезии от максимума давления в канале ЭР в растворе Неонола АФ<sub>9</sub>-12 при  $L = 4$  мкГн

Вышеприведенные результаты на рис. 1 и 5 свидетельствуют, что в растворах анионоактивных ПАВ для активации поверхностных явлений и обменных процессов на межфазных границах необходимо выбирать режим ввода энергии, который обеспечивает более длительное время действия давления. Для растворов неионогенных ПАВ (рис. 2 и 6) необходимо обеспечивать максимальное выделение энергии в первом полупериоде тока. В растворах смеси анионоактивных и неионогенных ПАВ с различными синтетическими добавками НМК – РХ (рис. 3 и 7) оба фактора влияют в равной мере. Наибольшее снижение относительной работы адгезии катионоактивных ПАВ

(рис. 4 и 8) связано со временем действия давления, поэтому, если возникает необходимость в торможении процессов смачивания и адсорбционных процессов, то необходимо выбирать режим ввода энергии, который обеспечивает более длительное время действия давления.

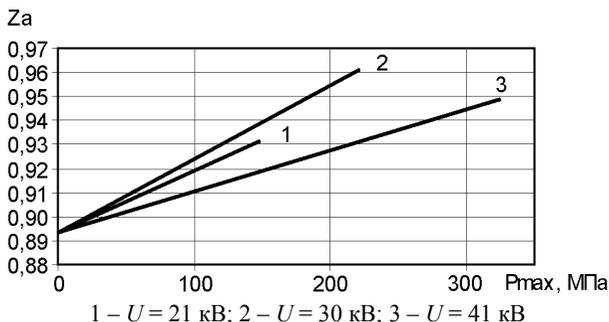


Рисунок 7 – Зависимость относительной работы адгезии от максимума давления в канале ЭР в растворе НМК-РХ при  $L = 4$  мкГн

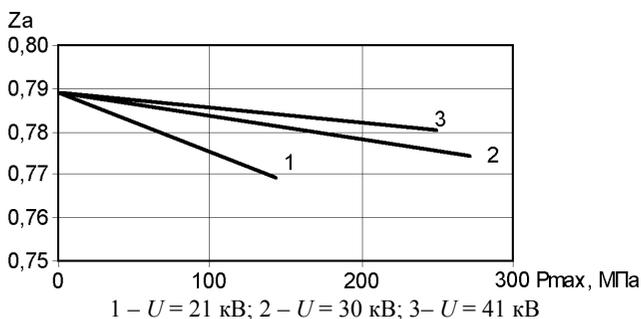


Рисунок 8 – Зависимость относительной работы адгезии от максимума давления в канале ЭР в растворе Катапина при  $L = 4$  мкГн

**Выводы.** Установлены закономерности связи гидродинамических характеристик электрических высоковольтных импульсных разрядов в коллоидных растворах ПАВ с интенсивностью протекания адгезионных процессов с участием 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 анионактивные и неионогенные ПАВ (Сульфолон, Неонол АФ<sub>9</sub>-12 и композиция НМК-РХ), возрастает с ростом максимума давления в канале ЭР. Увеличение максимума давления в канале ЭР при воздействии на раствор катионактивных ПАВ (Катапин) способствует снижению относительной работы адгезии, что целесообразно использовать для решения проблем торможения процессов смачивания и адсорбции процессов.

можения процессов смачивания и адсорбции процессов. Определены тенденции режимов ввода энергии для активации поверхностных явлений и обменных процессов на межфазных границах.

**Список литературы.** 1. *Сизоненко О.Н.* Синергетический эффект в изменении фильтрационных характеристик пористых насыщенных жидкостью сред при электроразрядном воздействии / *О.Н. Сизоненко* // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. – Вып.42. – Днепропетровск: Ин-т геотехн. механики НАН Украины. – 2003. – С. 173-186. 2. *Шерстнев Н.М.* Применение композиций ПАВ при эксплуатации скважин / *Н.М. Шерстнев, Л.М. Гурвич, И.Г. Булина и др.* – М.: Недра, 1988. – 184 с. 3. *Когановский А.М.* Физико-химические основы извлечения поверхностно-активных веществ из водных растворов и сточных вод / *А.М. Когановский, Н.А. Клименко.* – К.: Наук. думка, 1978. – 176 с. 4. *Сизоненко О.Н.* Влияние высоковольтных импульсных разрядов в растворах поверхностно-активных веществ на их основные свойства / *О.Н. Сизоненко, Э.И. Тафтай, Р.И. Малая, Р.П. Колмогорова, Е.В. Лилян, А.С. Торпаков* // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – № 21. – С. 124-134. 5. *Сизоненко О.Н.* К вопросу о влиянии индуктивности разрядного контура при высоковольтных электрических разрядах в растворах поверхностно-активных веществ на их основные свойства / *О.Н. Сизоненко, Э.И. Тафтай, Р.И. Малая, Р.П. Колмогорова, Е.В. Лилян, А.С. Торпаков* // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – № 44. – С. 137-146. 6. *Питьева К.Е.* Аспекты использования газообразных сорбированных углеводородов в эколого-гидрогеологическом мониторинге / *К.Е. Питьева* // Вестник Воронеж. ун-та. Геология. – 2000. – Вып. 5(10). – С. 227-230. 7. 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. – Николаев, 2003 – 239 с. – № ГР 0100U004071. – Инв. № 0203U006526. 8. *Шваб А.* Измерения на высоком напряжении / *А. Шваб.* – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с. 9. Исследование динамики развития мощных электрических разрядов в воде с максимальным током разряда до 400 кА: Отчет о НИР (заключительный) / ПКБЭ АН УССР; Руководитель Е.В.Кривицкий. – ГР 73024016; Инв. № 330 н.с. – Николаев, 1976. – 290 с. 10. *Жекул В.Г.* Статистическое исследование времени запаздывания пробоя при разряде в воде / *В.Г. Жекул, В.И. Загребнюк, А.В. Мурзаев, Л.С. Хаскина* // Физико-механические процессы при высоковольтном разряде в жидкости. – Киев: Наук. думка, 1980. – С. 13-18. 11. *Зайдель А.Н.* Ошибки измерений физических величин / *А.Н. Зайдель.* – Л.: Наука, 1968. – 96 с. 12. *Наугольных К.А.* Электрические разряды в воде / *К.А. Наугольных, Н.А. Рой.* – М.: Наука, 1971. – 156 с.

*Поступила в редколлегию 17.03.2009.*