

8. *Вольнский М.С.* Необыкновенная жизнь обыкновенной капли. М., 1986.
9. Физический энциклопедический словарь. М., 1960.
10. *Ривкин С.Л., Александров А.А.* Теплофизические свойства воды и водяного пара. М., 1980.
11. *Штильрайн Э.Э., Кессельман П.М.* Основы теории теплофизических свойств веществ. М., 1977.
12. Физические величины: Справочник / *А.П.Бабичев, Н.А.Бабушкина, А.М.Братковский* и др. / Под ред. *И.С.Григорьева, Е.З.Мейлихова* М., 1991.
13. *Болога Ан.М., Болога Ал.М.* О влиянии физических параметров жидкости и газа на процесс формирования капельного аэрозоля в электростатическом распылителе // *Buletinul Academiei de Stiinte a Republicii Moldova. Fizica si Tehnica.* 1996. N 3. P. 87–92.
14. *Водопьянова Н.Н., Фукс Л.Г., Чижик Ю.И.* Измерение теплофизических характеристик жидкости в электрическом поле // Вопросы теплообмена и определения теплофизических характеристик / Под ред. проф. д.т.н. Г.И. Фукса, доц. к.т.н. А.С.Ляликова, Томск, 1971. С. 82–84.
15. *Расторгуев Ю.Л., Ганиев Ю.А.* Теплопроводность жидкостей в постоянном электрическом поле // *Электронная обработка материалов.* 1967. № 1.
16. *Григорьев А.И.* Неустойчивость поверхности жидкости во внешнем электрическом поле и механизм возникновения огней св. Эльма // *ЖТФ.* 1986. Т.56, Вып. 3. С. 538–541.

*Поступила 17.08.2000*

### Summary

The investigations of the influence of the effect of electrohydrodynamic disintegration of charged drops on the transfer processes in the charged gas-drops systems are carried out. The influence of liquid temperature on the parameters which characterize the aerodynamic and electrohydrodynamic stability of a charged drop is determined. It is shown that the increasing of liquid temperature changes these parameters, what can be used for intensification of the transfer processes.

---

В.Г. Жекул, С.Г. Поклонов, Л.П. Трофимова, И.С. Швец

## ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЯХ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский, 43 А, г. Николаев, 540018, Украина*

### Введение

Технологический узел электрогидроимпульсных погружных устройств типа “Скиф”, используемых для обработки нефтяных скважин с целью повышения их дебита, представляет собой пару [1] с потенциальным острым электродом диаметром 4 мм и плоским противозлектродом. В период ремонта скважина заполняется до устья жидкостью глушения, в качестве которой, как правило, используется минерализованная пластовая вода. Поэтому она же является рабочей жидкостью для осуществления высоковольтного электрического разряда. Известно [2], что такие важные с точки зрения формирования электрического разряда параметры используемых для глушения скважин пластовых вод, как концентрация минеральных солей, плотность и удельная электропроводность изменяются в достаточно широких пределах. Кроме того, неблагоприятными факторами для формирования разряда являются повышенные температура  $T$  и гидростатическое давление  $P_{\text{гс}}$ , определяемые в итоге глубиной залегания продуктивного пласта и, следовательно, глубиной погружения устройства в скважину.

---

© Жекул В.Г., Поклонов С.Г., Трофимова Л.П., Швец И.С., *Электронная обработка материалов*, 2001, № 1, С. 37–43.

Эффективность электроразрядного воздействия на призабойную зону скважины во многом зависит от стабильности реализации искрового разряда, выбора оптимальной длины межэлектродного промежутка [3], величины непродуктивных затрат запасенной в накопительном конденсаторе энергии на формирование канала разряда.

По результатам экспериментальных исследований, представленных в работе [4], а также полученных в настоящей работе (рис. 1, кривые 1, 2), известно, что с увеличением  $P_{zc}$ , то есть глубины скважины, пробивное напряжение водных промежутков при прочих неизменных условиях возрастает. Для обычной питьевой воды с электропроводностью  $\sigma = 0,06$  См/м уже при давлении  $P_{zc}=20$  МПа пробивное напряжение межэлектродного промежутка длиной  $l=25$  мм приближается к зарядному напряжению устройства  $U_z = 30$  кВ. Экспериментально было установлено, что для реализации устойчивого пробоя при давлении в скважине до 50 МПа необходимо использовать воду с большей электропроводностью, то есть более засоленную, а именно с  $\sigma=0,28$  См/м (рис. 1, кривая 2). Увеличение электропроводности воды неизбежно приводит к росту предпробивных затрат энергии накопителя за счет возрастания предпробивных токов проводимости в межэлектродном промежутке. При ограниченности запасаемой энергии погружного устройства увеличение энергозатрат на формирование пробоя неизбежно влечет за собой снижение эффективности воздействия разряда на стенку скважины. Таким образом, с увеличением гидростатического давления в скважине стабильный искровой разряд реализуется в узком интервале электропроводности водного электролита, составляющей десятые доли См/м. Сверху этот интервал также ограничен, так как в сильно засоленной воде при  $\sigma > 1$  См/м искровой разряд переходит в коронный [5], силовые параметры которого существенно ниже, чем искрового. Следует иметь в виду также, что при заполнении скважины жидкостью глушения концентрация солей и удельная электропроводность исходной воды могут неконтролируемо возрастать. В частности, при выполнении данной работы обнаружено, что удельная электропроводность водопроводной воды с  $\sigma \cong 0,06$  См/м после заполнения ею разрядной камеры, предварительно загрязненной нефтью, и осуществления в ней нескольких десятков разрядов увеличилась практически на порядок.

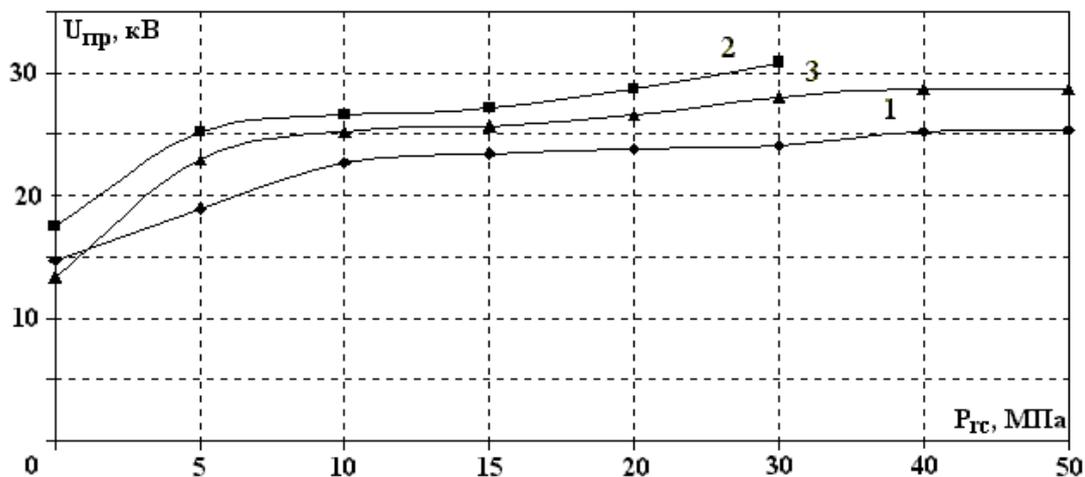


Рис. 1. Зависимость пробивного напряжения от гидростатического давления.  
1 – ВНЭ,  $\varphi = 48\%$ ; 2 – вода,  $\sigma = 0,06$  См/м; 3 – вода,  $\sigma = 0,28$  См/м.

Изложенные выше соображения объясняют отчасти не всегда стабильные и высокие результаты практического применения электрогидроимпульсной технологии обработки нефтяных скважин. Одним из путей решения проблемы стабилизации искрового разряда и повышения эффективности его воздействия в условиях глубоких скважин является использование для глушения скважин вместо пластовой воды других жидкостей.

Весьма обнадеживающими в этой связи являются результаты предварительных исследований [6] электрического разряда в водонефтяных эмульсиях (ВНЭ), пробивное напряжение которых при гидростатическом давлении до 20 МПа и нормальной температуре существенно ниже, чем у водных электролитов. Существенно ниже оказались для них и предпробивные энергозатраты, что может значительно повысить эффективность обработки скважин с использованием ВНЭ в качестве жидкости глушения.

### Методика экспериментальных исследований

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований формирования разряда в ВНЭ в условиях глубоких скважин, то есть при  $P_{zc}$  до 50 МПа и  $T$  до  $100^0\text{C}$ , полученные на экспериментальном стенде и по методике, описанном в [7]. При проведении температурных исследований экспериментальная разрядная камера погружалась в емкость с водой, снабженной термоэлектрическими нагревателями. Это позволило обеспечить равномерный нагрев всей оснастки и рабочей жидкости внутри камеры в диапазоне от 20 до  $100^0\text{C}$ . Геометрические параметры (наружный и внутренний диаметры) разрядной камеры соответствовали усредненным параметрам обсадных труб скважин. Конструкция экспериментальной электродной системы соответствовала электродной системе устройства типа “Скиф”, а параметры генератора импульсных токов экспериментальной установки были следующими: зарядное напряжение  $U_3=30\text{ кВ}$ ; емкость накопительного конденсатора  $C=2,4\text{ мкФ}$ ; индуктивность разрядной цепи  $L=4,5\text{ мкГн}$ ; радиус стержневого электрода  $r=2\text{ мм}$ ; длина разрядного промежутка  $l = l_{omm} = 30\text{ мм}$ .

Основными характеристиками разряда, которые непосредственно определялись в эксперименте, были следующие: пробивное напряжение  $U_{np}$ , начальное напряжение активной стадии разряда  $U_0$ , разрядный ток  $i(t)$ , напряжение на разрядном промежутке  $u(t)$ , время задержки пробоя  $t_3$ . Эти характеристики определялись из осциллограмм тока и напряжения, измеренных на разрядном промежутке. Осциллографирование тока и напряжения проводилось с помощью омических коаксиальных шунтов и емкостных делителей напряжения. Методика выполнения этих измерений и обработки полученных осциллограмм подробно описаны в [3].

Наряду с непосредственно измеренными характеристиками разряда по данным осциллографирования расчетным путем определялись предпробивные потери энергии:

$$W_{nn} = CU_3^2 / 2 - CU_0^2 / 2, \quad (1)$$

где  $U_3$  – зарядное напряжение.

$$R(t) = U(t) / R(t) \quad (2)$$

$$N(t) = i(t) u(t). \quad (3)$$

Известно [8], что искровой разряд в проводящих жидкостях из-за большого числа факторов, влияющих на его формирование, носит в определенной степени случайный характер. Поэтому при многочисленных повторениях разрядов наблюдается значительный разброс основных разрядных характеристик, существенно превышающий погрешность измерений. Там же показано, что при многократном повторении опытов распределение характеристик разряда подчиняется нормальному закону. Поэтому все результаты экспериментальных исследований представлены в работе в виде средних арифметических значений характеристик разряда и соответствующих доверительных интервалов при коэффициенте погрешности  $\alpha=0,65$ , вычисленных по результатам 10 опытов на каждой экспериментальной точке.

### Результаты исследований и их обсуждение

Эксперименты проводились в эмульсиях, приготовленных из двух типов нефтей – из нефти плотностью  $\rho=937\text{ кг/м}^3$  (Павловское месторождение Пермской области) и нефти плотностью  $\rho=830\text{ кг/м}^3$  (Полтавское месторождение). Легкая нефть с  $\rho = 830\text{ кг/м}^3$  не позволила получить устойчивую эмульсию даже при небольшой (20%) обводненности. Уже при первых разрядах она, очевидно, расслаивалась, вода осаждалась ниже разрядного промежутка, и разряд происходил в сильно обезвоженной нефти. Это хорошо видно из осциллограммы напряжения, приведенной на рис. 2, где время запаздывания пробоя при  $P_z = 0,1\text{ МПа}$  уже при первом разряде составляло несколько миллисекунд. Кроме того, в разряднике зажигалась дуга, что свидетельствует о значительном сопротивлении разрядного промежутка. Неустойчивость горения дуги в разряднике в этих экспериментах выразилась в скачках напряжения на промежутке в предпробойной стадии разряда. При этом от разряда к разряду время запаздывания пробоя увеличивалось, что свидетельствует о дальнейшем расслоении эмульсии под действием разрядов. Незначительное повышение давления  $P_z \cong 1,2\text{ МПа}$  приводило к отсутствию пробоя этой эмульсии. Поэтому для этих эмульсий приводятся лишь некоторые результаты по пробивным характеристикам. В частности, пробивное напряжение для данной эмульсии при указанных выше параметрах разрядной цепи и геометрии электродной системы оказалось близким к зарядному  $U_{np} \cong U_3 \cong 30\text{ кВ}$  уже при нормальном гидростатическом давлении.

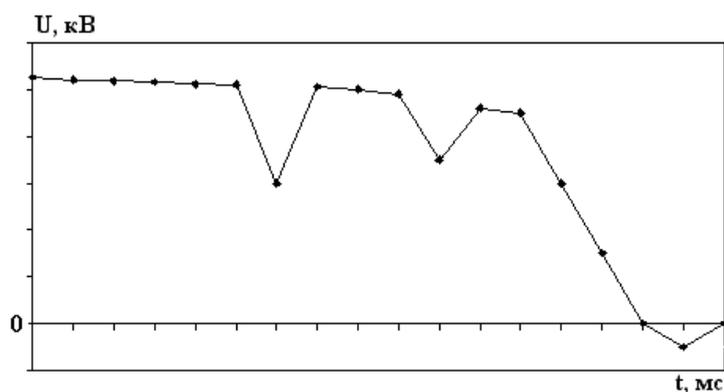


Рис. 2. Стилизованная осциллограмма напряжения разряда в эмульсии (80% Полтавской нефти и 20% воды с  $\rho = 1,1 \text{ кг/м}^3$ ),  $t_u = 5 \text{ кВ/дел}$ ,  $t_t = 0,1 \text{ мс/дел}$ .

Основной массив экспериментальных данных по формированию и развитию разряда был получен для эмульсий различной обводненности, приготовленных из более тяжелой нефти с  $\rho = 937 \text{ кг/м}^3$ , которые оказались достаточно устойчивыми.

На рис. 1 приведена зависимость пробивного напряжения эмульсии обводненностью  $\phi = 48\%$  от гидростатического давления при нормальной температуре. Там же для сравнения приведены аналогичные зависимости для водопроводной воды с  $\sigma = 0,066 \text{ См/м}$  и специально подсолоненной воды с  $\sigma = 0,28 \text{ См/м}$ . Как уже отмечалось, пробивное напряжение эмульсии ниже, чем у воды, и слабее зависит от гидростатического давления. Повышение температуры этой эмульсии, как показали эксперименты, приводит к увеличению пробивного напряжения. Так, при нагреве эмульсии до  $50^\circ\text{C}$  уже при давлении 20 МПа около 10% разрядов в данной серии при  $U_3 = 30 \text{ кВ}$  не завершаются пробоем, то есть  $U_{np} \cong U_3 \cong 30 \text{ кВ}$ . Дальнейшее повышение температуры эмульсии до  $100^\circ\text{C}$  постепенно приводит к увеличению количества беспробойных разрядов до 50%.

Аналогичное влияние на пробивное напряжение оказывает уменьшение обводненности водонефтяной эмульсии. В эмульсиях с обводненностью  $\phi = 40$  и 32% при давлении  $P_{zc} = 20 \text{ МПа}$  пробивное напряжение сравнимо с зарядным напряжением погружных устройств, и около 10% разрядов при  $U_3 = 30 \text{ кВ}$  не завершаются пробоем. С повышением давления до  $P_{zc} = 40 \text{ МПа}$  количество беспробойных разрядов в эмульсии с  $\phi = 32\%$  возрастает до 30%.

Наряду с пробивным напряжением в эксперименте определялись времена запаздывания пробоя и предпробивные потери энергии. На рис. 3 и 4 приведены зависимости соответственно времени запаздывания пробоя и предпробивных потерь энергии от гидростатического давления при температуре  $T = 20^\circ\text{C}$  для упомянутых выше эмульсий трех обводненностей (кривые 1–3). Для сравнения там же приводятся соответствующие зависимости (кривая 5) для минерализованной воды с удельной электропроводностью  $\sigma = 0,28 \text{ См/м}$ . Кроме того, в эксперименте моделировался имеющий место в практике случай, когда закрывающиеся на ремонт скважины с остатками нефти на ее стенках заполняются водным электролитом. Кривые 4 на рис. 3 и 4 получены для такой сильно обводненной эмульсии с  $\phi \cong 95\%$ , когда водный электролит с  $\sigma = 0,28 \text{ См/м}$  заливался в загрязненную предыдущими экспериментами камеру.

Анализ полученных результатов показывает, что в водонефтяной эмульсии с обводненностью, близкой к 50%, искровой разряд реализуется наиболее стабильно и с наименьшими по сравнению с водой предпробивными потерями энергии. Разряд в эмульсиях характеризуется меньшим разбросом данных по времени запаздывания пробоя и предпробивным энергозатратам (от 10 до 20%), чем разряд в минерализованной воде (от 20 до 40%). Данные по доверительным интервалам на экспериментальных зависимостях не приводятся, чтобы не загромождать рисунки. С повышением гидростатического давления разбросы экспериментальных данных разряда в ВНЭ так же, как и при разряде в воде, уменьшаются.

Представленные выше результаты свидетельствуют о том, что, несмотря на очень низкую удельную электропроводность (удельная электропроводность ВНЭ при исследованных обводненностях была порядка  $10^{-4}$ – $10^{-5} \text{ См/м}$ ), эмульсия пробивается при более низких напряжениях и с меньшими потерями энергии, чем минерализованная вода. Вода же при достаточной очистке, обеспечивающей аналогичную проводимость, уже при небольшом повышении давления не пробивается. Это можно объяснить наличием в ВНЭ границ раздела двух сред, сильно отличающихся

(приблизительно на порядок) по величине диэлектрической проницаемости, а именно это нефть с  $\epsilon \approx 2$  и диспергированная в ней вода с  $\epsilon \approx 80$ . Известно [9], что на границах раздела таких сред в электрическом поле из-за повышенной напряженности электрического поля создаются условия для зажигания и развития так называемых поверхностных (скользящих) разрядов.

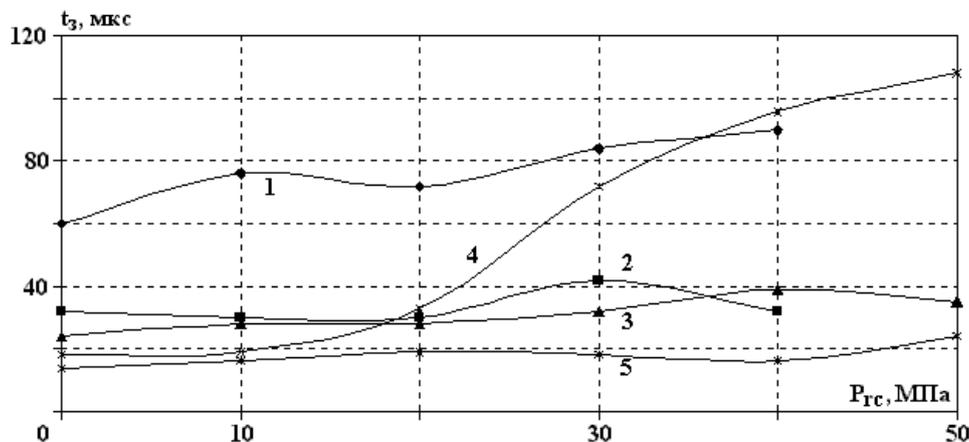


Рис. 3. Зависимость времени запаздывания пробоя от гидростатического давления:  
 1 – ВНЭ,  $\varphi = 32\%$ ; 2 – ВНЭ,  $\varphi = 40\%$ ; 3 – ВНЭ,  $\varphi = 48\%$ ; 4 – ВНЭ,  $\varphi = 95\%$ ; 5 – водный электролит с  $\sigma = 0,26$  См/м.

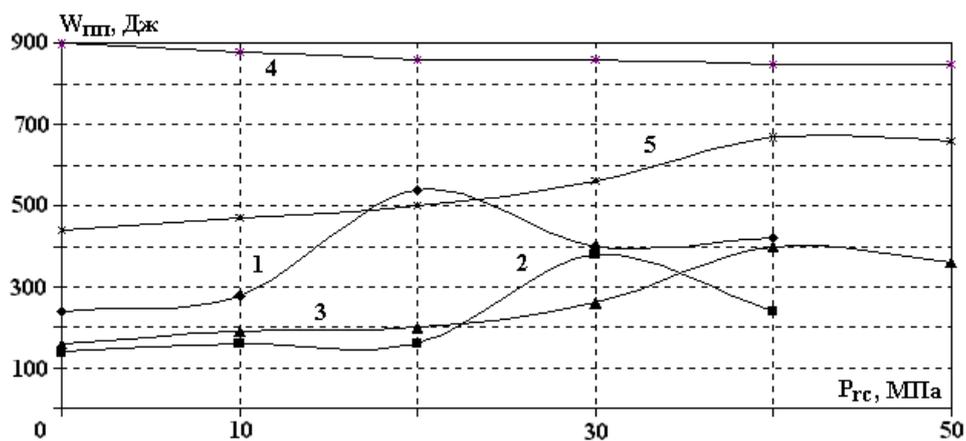
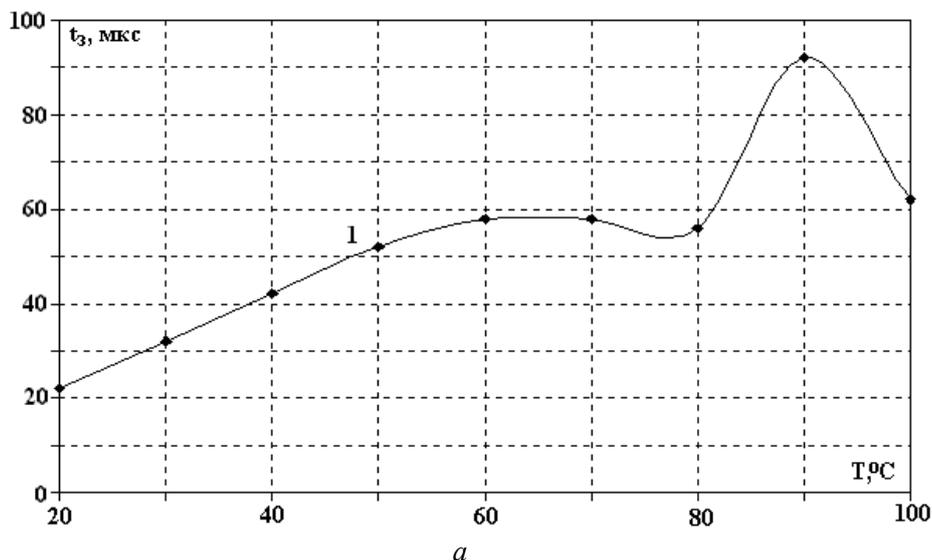


Рис. 4. Зависимость предпробивных потерь энергии от гидростатического давления:  
 1 – ВНЭ,  $\varphi = 32\%$ ; 2 – ВНЭ,  $\varphi = 40\%$ ; 3 – ВНЭ,  $\varphi = 48\%$ ; 4 – ВНЭ,  $\varphi = 95\%$ ; 5 – водный электролит с  $\sigma = 0,26$  См/м.



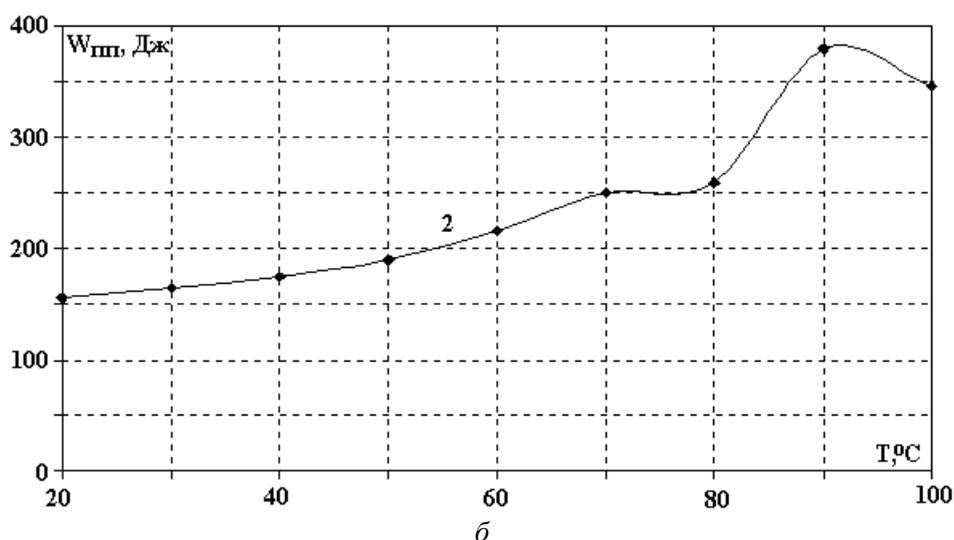


Рис. 5. Зависимости времени запаздывания пробоя и предпробивных потерь энергии от температуры для ВНЭ с  $\varphi = 48\%$  и  $P_{zc} = 30$  МПа.

Как показали эксперименты, с повышением температуры эмульсии условия ее пробоя ухудшаются. Это выражается в увеличении времени запаздывания пробоя и предпробивных энергозатрат (рис. 5). При температурах эмульсии выше  $50^{\circ}\text{C}$  ее пробивное напряжение приближается к зарядному напряжению (30 кВ) устройства “Скиф”, и не все разряды при этом завершаются пробоем межэлектродного промежутка. Так, при  $T \geq 80^{\circ}\text{C}$  около 50% разрядов в эмульсии обводненностью 48% не завершаются пробоем. Все это снижает эффективность разряда в ВНЭ при повышении температуры в призабойной зоне скважины.

#### Заключение

Полученные в работе результаты позволяют сделать вывод о том, что использование водонефтяных эмульсий обводненностью до 50% для глушения скважин позволяет в ряде случаев существенно повысить эффективность электроразрядного воздействия. Однако полностью решить проблему стабилизации разряда и повышения его эффективности использование ВНЭ в качестве жидкости глушения не позволяет. Особенно это относится к “горячим” скважинам, температура которых выше  $70^{\circ}\text{C}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Максотов Р.А., Сизоненко О.Н., Малюшевский П.П. и др. Использование электровзрывного воздействия на призабойную зону // Нефтяное хозяйство. 1985. № 1. С. 34–35.
2. Гиматулинов Ш.К., Ширковский А.К. Физика нефтяного и газового пласта. М., 1982.
3. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. Киев, 1986.
4. Трофимова Л.П., Поклонов С.Г. Электрическая прочность разрядного промежутка при высоковольтном пробое воды в условиях повышенных давлений // Электронная обработка материалов. 1993. № 6. С. 35–38.
5. Глушенко В.Ж., Жекул В.Г., Трофимова Л.П. Динамика импульсного электрического разряда в сильнопроводящих водных электролитах в условиях высоких гидростатических давлений // Теория, эксперимент, практика электроразрядных явлений. Киев, 1995. С. 4–7.
6. Сизоненко О.Н., Любимов А.Д., Денисюк О.Н. Влияние обводненности водонефтяной эмульсии на эффективность электрического разряда // Нефтяное хозяйство. 1996. № 4. С. 51–52.
7. Поклонов С.Г., Глушенко В.Ж., Трофимова Л.П. и др. Эффективность электрического разряда для условий нефтяных скважин // Нефтяное хозяйство. 1992. № 3. С. 20–23.
8. Жекул В.Г., Загребнюк В.И., Мурзаев А.В. и др. Статистическое исследование времени запаздывания пробоя при разряде в воде // Физико-механические процессы при высоковольтном разряде в жидкости. Киев, 1980. С. 12–18.
9. Балыгин И.Е. Электрические свойства твердых диэлектриков. М., 1974.

Поступила 17.07.2000

## Summary

The temperature and pressure influence on basic characteristics (disruptive pressure, prestrike time, prestrike consumptions) of high-voltage discharge initiation in water-oil emulsion of different degrees of oil saturation with water is experimentally researched and compared with the discharge characteristics in water. The results obtained would be useful for improvement of the electric discharge technology of oil-well treatment under the temperatures up to 100°C and pressures up to 50 MPa.

---

А.П. Достанко, В.В. Баранов, Л.П. Ануфриев, А.А. Костюкевич, В.А. Зеленков

## ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР ПРИ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКЕ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220027, Республика Беларусь*

Примесно-дефектное взаимодействие имеет важное значение при создании твердотельных структур методами диффузии, ионного легирования и твердофазных реакций, например, при формировании высококачественных невыпрямляющих контактов и контактов Шоттки на монокристаллическом кремнии [1].

С целью повышения стабильности и надежности контактов металл–полупроводник в процессе их эксплуатации в составе изделий полупроводниковой электроники используется целый ряд методов, среди которых можно выделить формирование контактов на основе силицидов металлов платиновой группы [2], введение редкоземельных и изовалентных примесей, которое оказывает существенное влияние на характер структурных несовершенств в приконтактных слоях кремния, проведение термообработок, обеспечивающих отжиг радиационных дефектов структуры монокристаллического кремния, например, методами изотермического отжига, быстрого термического отжига, в том числе лазерного [3, 4] и др. При этом различные методы термообработки являются в ряде случаев средством формирования внутренних геттеров для фоновых технологических примесей, выступающих одним из факторов нестабильности твердотельных структур.

Цель данной работы – выяснение вопроса о том, как на стабильность твердотельных структур влияет дозированная бомбардировка ионами инертного газа в сочетании с последующей термообработкой.

В качестве объекта исследований выбраны контакты Шоттки типа Si/Mo, которые формировали методом магнетронного распыления в среде аргона при давлении  $2 \cdot 10^{-2}$  Па на пластинах кремния, ориентированных в плоскости (111). Толщина пленки Mo составляла 0,1 мкм. Для обеспечения последующего контактирования создаваемых тестовых структур поверх пленки Mo магнетронным распылением наносили пленку сплава Al-1,5%Si. Нанесение пленок Mo и сплава Al-Si для одной части образцов проводили в едином вакуумном цикле. Другую часть образцов формировали в отдельных вакуумных циклах; при этом после нанесения пленки Mo ее подвергали бомбардировке ионами  $Ar^+$  в вакууме  $\sim 10^{-2}$  Па. Доза облучения лежала в пределах  $2 \cdot 10^{15} - 3 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>. Заключительной операцией формирования твердотельных структур являлся изотермический отжиг различной продолжительности либо быстрый отжиг ИК излучением, проводимый с помощью блока галогенных ламп КГ-220-1000. В последнем случае излучение направлялось как со стороны кремния, так и со стороны металлической пленки (Mo/Al-Si).

Образцы со сплошными пленками исследовали электронографическим методом с целью определения структурных изменений в переходном слое контактов. Измерение интенсивностей дифракционных рефлексов и диаметра колец проводилось с помощью микрофотометра МД 100.