

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

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В СКВАЖИННЫХ ЖИДКОСТЯХ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОБРАБОТКЕ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

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

Эффективность электроразрядного воздействия на призабойную зону и фильтр скважины во многом зависит от стабильности искрового разряда в скважинной жидкости, выбора оптимального режима разряда, величины непродуктивных энергозатрат на формирование канала искрового разряда (предпробивные потери энергии). Для повышения эффективности необходимо максимально увеличить коэффициент преобразования запасаемой в накопительном конденсаторе электрической энергии в акустическую энергию волны давления. Именно с воздействием волны давления электроразряда на обсадную трубу скважины, ее фильтр и призабойную зону продуктивного пласта в основном связано улучшение фильтрационных параметров и повышение притока нефти в скважину.

Известно [1], что электроакустический К.П.Д. разряда, определяющий степень преобразования электрической энергии, введенной в канал разрядной искры, в энергию ударной волны, распространяющейся в жидкости, в лучшем случае может достигать величины порядка 30% от запасенной в конденсаторе энергии. Максимальный коэффициент преобразования энергии достигается при условии отсутствия предпробивных энергозатрат, а также при пробое разрядных промежутков оптимальной длины.

В электроразрядных установках и технологиях “наземного” типа, когда высоковольтное оборудование размещено на поверхности земли, при отсутствии жестких ограничений массогабаритных показателей установки необходимые параметры волн давления легко могут быть достигнуты за счет варьирования параметров генератора импульсных токов. В погружных электроразрядных устройствах типа “Скиф” [2], предназначенных для обработки нефтяных скважин, такая возможность отсутствует. Максимальная запасенная в конденсаторах энергия в этих устройствах составляет приблизительно 1 кДж, и в ближайшее время практической возможности существенного ее увеличения не предвидится. Поэтому в погружных устройствах необходимо рационально и максимально эффективно использовать запасаемую электрическую энергию.

Реализация электрического разряда в погружных устройствах типа “Скиф” осуществляется высоковольтным пробоем жидкости, заполняющей скважину. При этом используется электродная система типа “острие – плоскость”, схема которой представлена на рис. 1, с диаметром острейкового анода 4 мм. В качестве жидкости глушения, заполняющей скважину до устья, используется, как правило, пластовая вода. Ее параметры (плотность, концентрация солей, удельная электропроводность) в зависимости от месторождения изменяются в широких диапазонах. Разряд в таких водных электролитах при повышенных гидростатических давлениях P_2 исследован достаточно подробно [3, 4]. В частности, экспериментально установлено, что с ростом P_2 условия пробоя ухудшаются, а именно: увеличиваются напряжение зажигания разряда $U_{заж}$ [3] и напряжение пробоя $U_{пр}$ (рис. 2). Увеличивается соответственно время задержки пробоя и, как следствие, предпробивные энергозатраты (рис. 3, кривая 5). Установлено, что при заданных параметрах генератора импульсных

токов и заданном радиусе острейкового анода увеличение P_z , рост которого соответствует увеличению глубины скважины, для обеспечения стабильности пробы требует увеличения ее удельной электропроводности σ_0 . Для каждого значения P_z существует своя пороговая электропроводность жидкости, ниже которой пробой разрядного промежутка не обеспечивается.

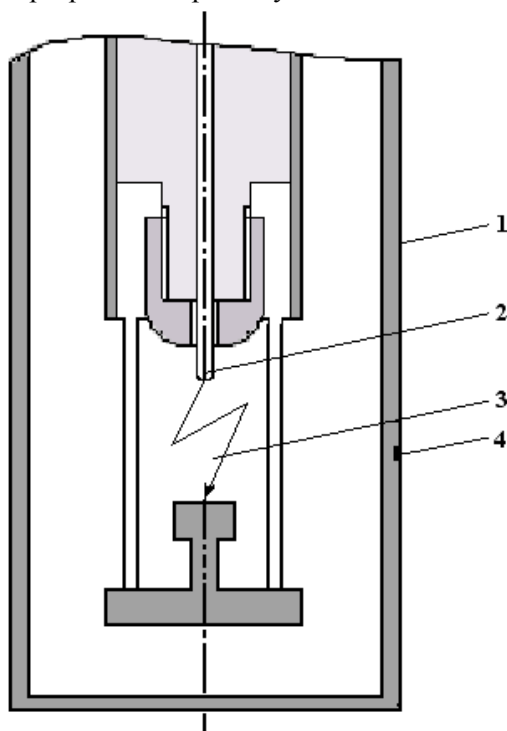


Рис. 1. Схема электродной системы погружного электроразрядного устройства типа "Скиф": 1 – стенка камеры; 2 – электрод; 3 – канал разряда; 4 – точка измерения.

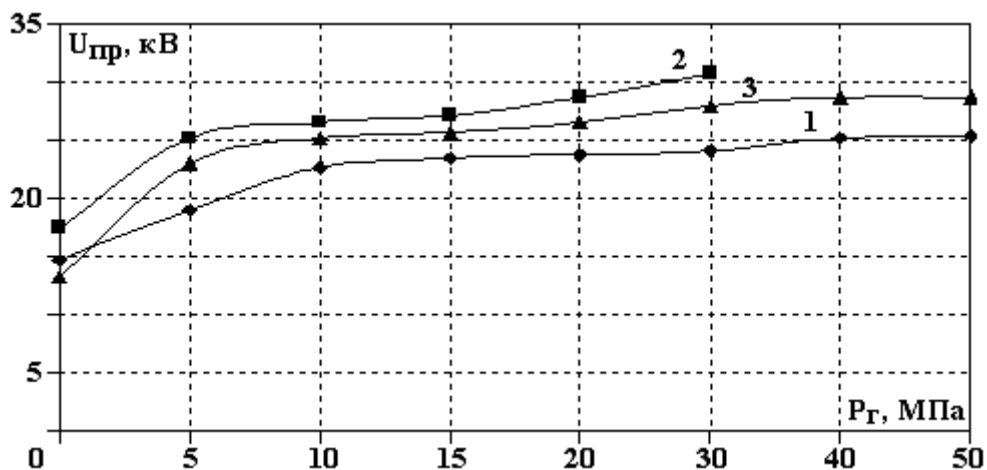


Рис. 2. Зависимость пробивного напряжения от гидростатического давления: 1 – вода, $\sigma_0 = 0,06$ См/м; 2 – вода, $\sigma_0 = 0,26$; 3 – ВНЭ, обводненность $\varphi = 48\%$.

Таким образом, с ростом P_z нижний предел интервала допустимых для осуществления искровых разрядов величин σ_0 смещается в сторону больших значений. Сверху этот интервал ограничивается увеличивающимися предпробивными потерями электрической энергии и переходом при $\sigma_0 \geq 1$ См/м искрового разряда в "коронный" [4]. В частности, при увеличении P_z до 50 МПа потери энергии при разряде в воде с $\sigma_0 = 0,26$ См/м достигают более 50% от запасенной в конденсаторах энергии, равной $W_z = 1080$ Дж (рис. 3, кривая 5). Эффективность воздействия разряда на стенку трубы, представленная на рис. 4, при этом существенно снижается.

На практике [2], когда параметры рабочей жидкости в скважине в процессе обработки трудно поддаются контролю и могут изменяться из-за растворения в ней солевых отложений на стенках и фильтре в широких диапазонах, устанавливают небольшие, порядка 10 мм, неоптимальные

разрядные промежутки l_{pn} . Это приводит к снижению эффективности разряда как по амплитуде волны давления, так и по удельному импульсу, сообщаемому стенке трубы [5]. Кроме того, при малых значениях длины разрядного промежутка l_{pn} , когда реализуется колебательный режим разряда, наблюдается значительный эрозионный износ острейшего электрода-анода и существенно снижается ресурс импульсных накопительных конденсаторов. Установлено, что при начальной длине разрядного промежутка $l_{pn}=10$ мм эрозионный износ стального анода на 1000 разрядов составляет около 7 мм. В то же время при $l_{pn} \approx l_{opt}$ этот износ не превышает 1 мм.

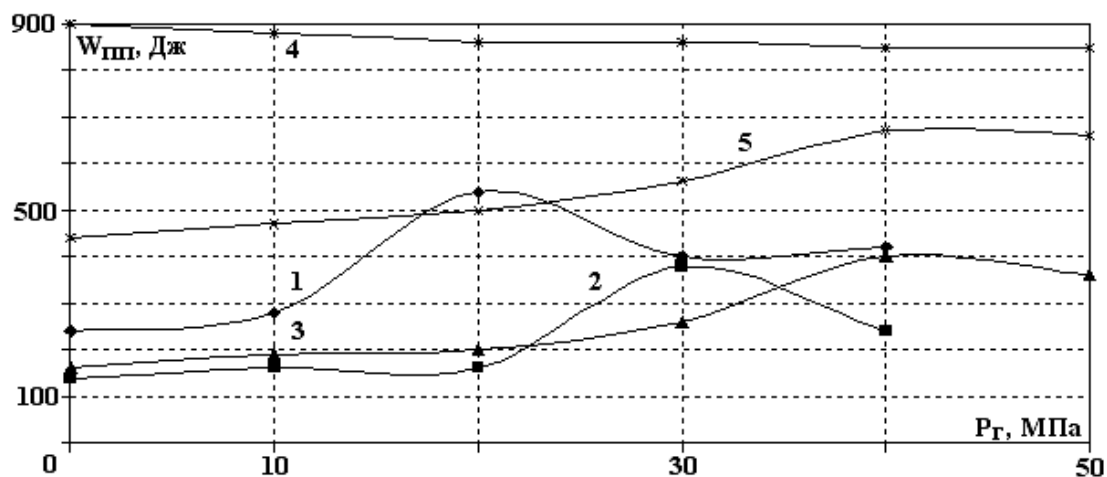


Рис. 3. Зависимость предпробивных потерь энергии от гидростатического давления. ВНЭ: 1 – $\phi = 32\%$; 2 – $\phi=40\%$; 3 – $\phi=48\%$; 4 – $\phi = 95\%$; 5 – водный электролит, электропроводность $\sigma_0=0,26$ См/м.

Изложенные выше соображения объясняют отчасти не всегда стабильные и высокие результаты практического применения электроразрядной технологии обработки нефтяных скважин. Одним из путей решения проблемы стабилизации искрового разряда и повышения эффективности его воздействия в условиях глубоких скважин является использование для их глушения, вместо пластовой воды, других жидкостей. Этим объясняется интерес, который вызывает в последнее время электрический разряд в водонефтяных эмульсиях (ВНЭ) [5, 6]. С одной стороны, ВНЭ является более естественной средой для заполнения нефтяной скважины, чем вода, поскольку заводнение призабойной зоны при использовании воды сказывается на ее фильтрационных характеристиках. С другой стороны, как показали эксперименты, пробивное напряжение и предпробивные потери энергии (рис. 2 и 3 соответственно) при разряде в ВНЭ ниже, чем в воде, и слабее зависят от гидростатического давления в скважине. С этим связана и большая скорость энерговода (активная мощность) в плазменный канал при разряде в ВНЭ по сравнению с разрядом в воде (рис. 5, кривые 1, 4).

Приведенные в данной работе экспериментальные результаты получены на экспериментальной установке, моделирующей условия в скважине, и с помощью измерительных методик, подробно описанных в [5, 7]. Параметры экспериментальной установки соответствовали параметрам существующих погружных устройств типа “Скиф” и были следующими: зарядное напряжение ГИТ $U_3 = 30$ кВ; емкость накопительного конденсатора $C = 2,4$ мкФ; запасенная в накопителе энергия $W_3 = 1080$ Дж; индуктивность разрядной цепи $L = 4,5$ мкГн; длина разрядного промежутка $l_{pn} = 30$ мм, близкая к оптимальной.

Известно [1], что увеличение скорости энерговода в канал разряда, которое имеет место при разряде в ВНЭ, приводит к увеличению давления в канале разряда и соответственно амплитуды давления в окружающей его жидкости. В экспериментах это зафиксировано увеличением удельного импульса, сообщаемого волной стенке трубы разрядной камеры (рис. 4, кривые 1–4).

Анализ полученных результатов показал, что искровой разряд в ВНЭ с обводненностью $\phi \leq 50\%$ реализуется более стабильно, с меньшим разбросом параметров и меньшими предпробивными потерями энергии, которые объясняются более низкой, по сравнению с обычной водой, электропроводностью ВНЭ. Электропроводность ВНЭ с обводненностью $\phi \leq 50\%$ находилась в пределах ($10^{-4} - 10^{-5}$) См/м. Наблюдаемую в экспериментах меньшую пробивную напряженность электрического поля на аноде (при фиксированном диаметре анода это соответствует меньшему пробивному

напряжению) при низкой электропроводности ВНЭ можно объяснить наличием в ВНЭ границ раздела двух сред, в значительной мере отличающихся, почти на порядок, по величине диэлектрической проницаемости ϵ : для нефти $\epsilon \approx 2$ и диспергированной в ней воды $\epsilon \approx 80$. Известно, 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 [7]. Дальнейшее развитие плазменного канала в направлении противоэлектрода, вплоть до замыкания разрядного промежутка, определяется напряженностью поля на его головке, которая из-за малости радиуса разрядного канала существенно выше, чем начальная напряженность на аноде. Поэтому при повышенном гидростатическом давлении основная проблема осуществления разряда состоит в том, чтобы его зажечь. Дальнейшее развитие разряда уже слабо зависит от электропроводности жидкости. В воде с аналогичной ВНЭ электропроводностью разряд уже при сравнительно невысоких давлениях не зажигается. Для того, чтобы его зажечь, необходимо либо существенно повысить начальную напряженность электрического поля на аноде, например, за счет уменьшения радиуса анода или за счет повышения зарядного напряжения. На практике выполнить эти требования для существующих погружных устройств не удастся. Возможно также более чем на два порядка повысить электропроводность жидкости за счет повышения концентрации растворенных в ней солей. Последнее неизбежно приводит к существенному увеличению предпробивных потерь энергии и снижению эффективности разряда.

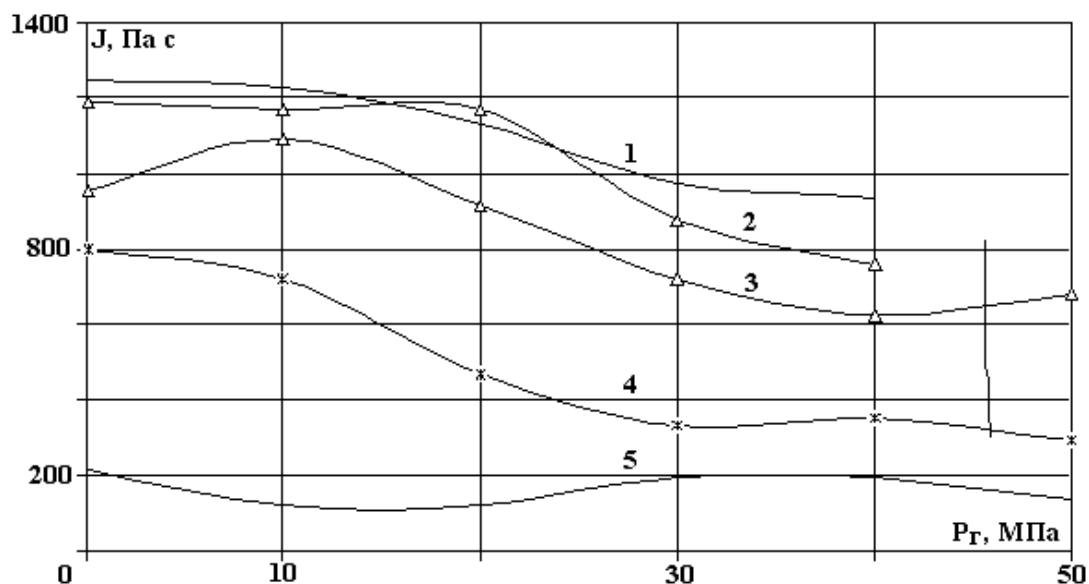


Рис. 4. Зависимость удельного импульса, сообщаемого разрядом стенке трубы, от гидростатического давления. ВНЭ: 1 – $\varphi=32\%$; 2 – $\varphi=40\%$; 3 – $\varphi=48\%$; 4 – $\varphi=95\%$; 5 – водный электролит, электропроводность $\sigma_0=0,26$ См/м.

В целом с точки зрения малости предпробивных потерь энергии (рис. 3), величины развиваемой в канале разряда электрической мощности (рис.5) и механического действия (рис. 4) разряд в ВНЭ с малой обводненностью более эффективен, чем разряд в воде. Однако, как показали эксперименты, с повышением гидростатического давления в таких ВНЭ появляются разряды, не завершающиеся пробоем. В частности, при $P_2 = 30$ МПа и нормальной температуре в ВНЭ обводненностью $\varphi = 32\%$ более 30% разрядов при многократном их повторении не завершаются пробоем. Только при обводненности, близкой к 50%, все разряды при нормальной температуре в ВНЭ завершаются пробоем промежутка во всем, интересующем практику (до 50 МПа) диапазоне давлений. С повышением температуры условия пробоя также и для этой эмульсии ухудшаются, что проявляется в увеличении предпробивных потерь энергии и появлении беспробойных разрядов.

В таблице представлены данные по количеству завершающихся пробоем разрядов n_k среди общего числа разрядов n в исследуемой выборке и по усредненным предпробивным энергозатратам ΔW по отношению к запасенной в конденсаторе энергии W_3 для различных температур водонефтяной эмульсии и при гидростатическом давлении $P_2 = 30$ МПа.

Приведенные в таблице данные показывают, что уже при температуре $t \geq 70^{\circ}\text{C}$ (343°K) около 50% разрядов не завершаются пробоем. При этом предпробивные потери у завершенных пробоем разрядов приближаются к 50% от запасенной энергии. Эффективность воздействия разрядов на стенку скважины и призабойную зону соответственно снижается.

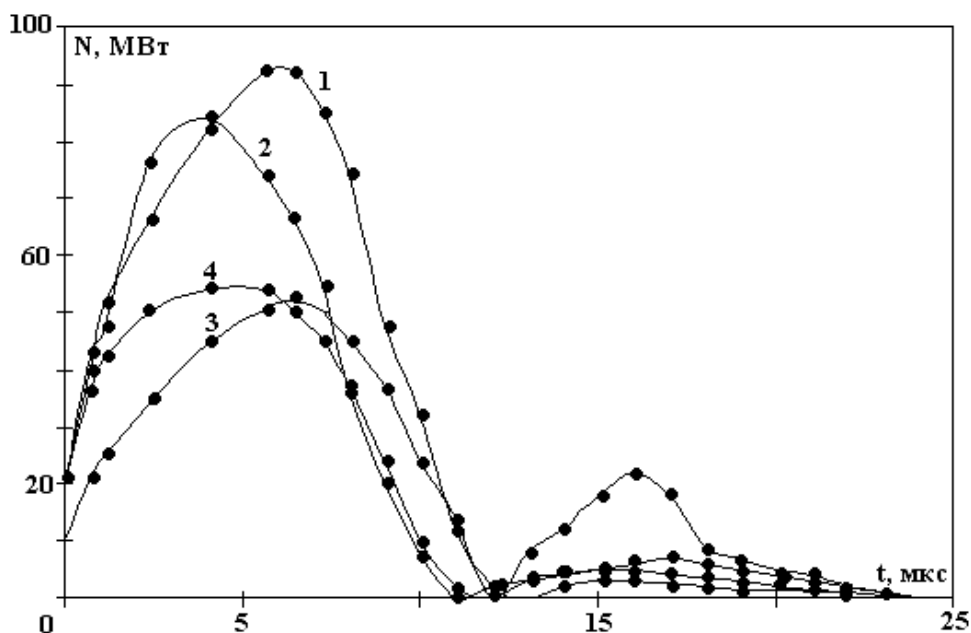


Рис. 5. Электрическая мощность в активной стадии разряда ВНЭ: 1 – $\varphi=32\%$; 2 – $\varphi=40\%$; 3 – $\varphi=48\%$; 4 – водный электролит, электропроводность $\sigma_0=0,26\text{ См/м}$.

Экспериментальные результаты пробоя водонефтяной эмульсии

T, K	293	323	343	353	373
$n_k/n, \%$	100	90	52	50	50
$\Delta W/W_3, \%$	13	18	23	24	34

Таким образом, можно 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 скважин не позволяет. Особенно это относится к “горячим” скважинам, температура которых превышает 70°C .

Полученные в данной работе результаты, а также учет сложностей, связанных с приготовлением эмульсии (для каждой нефти необходимо исследовать свои тонкости технологии ее приготовления), при необходимости разработки дополнительного оборудования и дополнительной операции в процессе обработки скважин, на наш взгляд, не позволяют рекомендовать использование ВНЭ в качестве универсального пути повышения эффективности электроразрядной технологии обработки скважин. В тех случаях, когда параметры добываемой в скважине нефти соответствуют оптимальным по эффективности разряда параметрам ВНЭ ($\varphi \leq 50\%$, $t \leq 70^{\circ}\text{C}$), ее использование вместо воды для глушения скважин при электроразрядной обработке достаточно перспективно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. Киев, 1979.
2. Максудов Р.А., Сизоненко О.Н., Малюшевский П.П. Использование электроразрядного воздействия на призабойную зону // Нефтяное хозяйство. 1985. № 1. С. 34–35.
3. 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.

4. 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 технологий, сб. научн. трудов. Киев, 1995. С. 4–7.
5. 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.
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. Ковязин Н.И., Ипполитов В.В., Уросов С.А., Косенков В.М. и др. Методика измерения и экспериментальное исследование удельного импульса, сообщаемого деформируемому цилиндру давлением на его внутреннюю поверхность // Изв. ВУЗ. Нефть и газ. 2000. № 1. С. 25–30.
8. Балыгин И.Е. Электрические свойства твердых диэлектриков. М., 1974.

Поступила 15.04.2002

Summary

The parameters of high-voltage electrical discharge in water and oil emulsions of various water content is investigated. Its comparison with underwater electrical discharge is conducted. It is shown that the discharge in water and oil emulsions with low water content is more effective than underwater discharge judging by pre-breakdown energy losses, discharge channel electrical power as well as by mechanical effect. However, more than 30 per cent of discharges have no breakdown at hydrostatic pressure equal to 30 MPa. There is some deterioration in the emulsion breakdown conditions with temperature growth. Prebreakdown energy losses increase up to 50 per cent of stored energy under the temperature exceeding 70⁰C. The results obtained can be of use for improving electric discharge technology for oil well treatment.
