

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ ПРОДУКТИВНОГО ПЛАСТА

В.Г. Жекул, С.Г. Поклонов, А.П. Смирнов

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский, 43 А, г. Николаев, 54018, Украина, [iipt@iipt.com.ua](mailto:iipt@iipt.com.ua)*

### Введение

В процессе многолетней эксплуатации дебит действующих нефтяных, газовых, нагнетательных и водяных скважин падает из-за снижения проницаемости призабойной зоны (ПЗ) вследствие ее кольматации различного рода отложениями. Для восстановления производительности скважины применяются различные методы декольматации, одним из которых является электроразрядный способ [1].

Основным действующим фактором электроразрядного воздействия принято считать волну давления, вызванную электрическим разрядом в жидкости, амплитуда которой зависит от длины межэлектродного промежутка (МЭП). Максимальное значение амплитуды волны давления достигается при электрическом разряде на оптимальном межэлектродном промежутке [2]. При электроразрядной обработке скважины происходит неконтролируемое изменение электропроводности внутрискважинной жидкости. В случае применения электродных систем открытого типа (ОЭС) это приводит к необходимости осуществлять электрические разряды на коротком межэлектродном промежутке, чтобы обеспечить стабильный его пробой. Это негативно сказывается как на работе оборудования (значительно снижается его ресурс), так и на эффективности электроразрядной обработки (значительно снижается амплитуда волны давления). Для решения данной проблемы была разработана электродная система закрытого типа (ЗЭС) [3]. Главное ее отличие от ОЭС – наличие непроницаемого акустически прозрачного экрана, отделяющего жидкость в зоне разряда от скважинной жидкости и не допускающего их смешения. Применение ЗЭС позволяет постоянно осуществлять электрический разряд на оптимальном межэлектродном промежутке, что значительно снижает предпробивные потери энергии, стабилизирует электрический разряд и позволяет работать при максимальной амплитуде волны давления. В то же время возникает вопрос о влиянии оболочки закрытой электродной системы на преобразование параметров волны давления, вызванного электрическим разрядом в жидкости, и целесообразности ее применения.

Ранее был выполнен целый ряд экспериментальных и теоретических работ по исследованию ЗЭС [4–8]. Так, проведено экспериментальное сравнение эффективности электродных систем открытого и закрытого типов и преобразование импульса волны давления при проходе через оболочку при различных гидростатических давлениях в скважине с использованием волноводных датчиков давления [4, 5]. В работе [6] для исследования трансформации импульса давления при его прохождении сквозь оболочку применялась методика измерения удельного импульса, сообщаемого разрядом трубе, по отклонению маятника от своего вертикального положения. Также было установлено, что наибольшей эффективностью обладают электродные системы, работающие на оптимальном межэлектродном промежутке [7]. Математическому моделированию влияния оболочки камеры электроразрядного устройства на гидроимпульсную нагрузку в скважине посвящена работа [8].

Однако окончательный ответ на поставленный выше вопрос может дать только экспериментальное исследование на физической модели призабойной зоны продуктивного пласта, которое должно включать:

- исследование влияния длины межэлектродного промежутка на эффективность электроразрядного воздействия;
- экспериментальное сравнение эффективности электродных систем различного типа.

Поэтому **цель данной работы** – проведение экспериментальных исследований на физической модели по определению целесообразности применения ЗЭС для электроразрядного воздействия на призабойную зону продуктивного пласта.

Для этого необходимо было решить следующие **задачи**:

- разработать методику определения эффективности электроразрядного воздействия на физической модели призабойной зоны продуктивного пласта;
- выполнить экспериментальные исследования по определению влияния длины межэлектродного промежутка на эффективность электроразрядного воздействия;
- выполнить экспериментальные исследования по сравнению эффективности электродных систем открытого и закрытого типов.

#### **Методика выполнения экспериментальных исследований**

Методика была разработана с целью определения эффективности электроразрядного воздействия в процессе декольматации. Данная методика позволила провести экспериментальные исследования по сравнению эффективности электродных систем открытого и закрытого типов на физических моделях цементного кольца обсадной колонны скважины при атмосферном давлении и по влиянию длины межэлектродного промежутка на эффективность электроразрядного воздействия. Она осуществлялась согласно следующему алгоритму:

1. Испытания проводились по исследовательской схеме, которая приведена на рис. 1. Схема состоит из модели ПЗ скважины, состоящей из стальной трубы 1 с отверстиями 2, равномерно распределенными по поверхности трубы на расстоянии 55 мм друг от друга. По наружному диаметру труба 1 охвачена цилиндром из сетки «рабица» 10×10 мм (на рисунке не показано) для удержания цементной обмазки 3 толщиной от 10 до 15 мм. Внутри модели помещалась открытая электродная система 4 от электроразрядной погружной установки «Скиф-100». Для моделирования условий закрытой электродной системы на нее надевался акустически прозрачный экран 5.

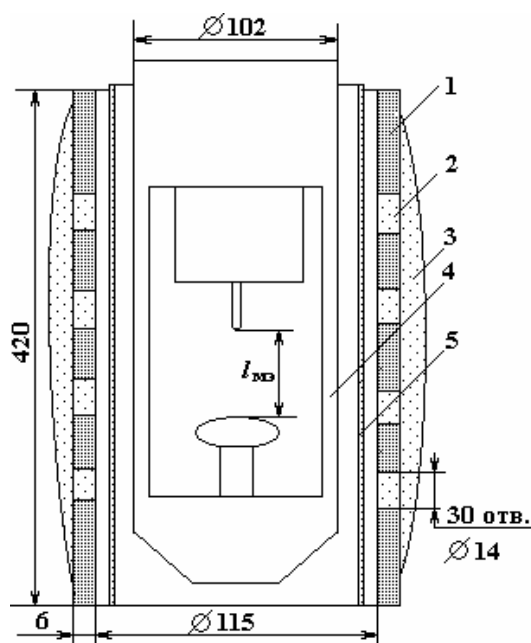


Рис. 1. Исследовательская схема: 1 – труба; 2 – отверстие; 3 – цементная обмазка; 4 – электродная система; 5 – акустически прозрачные экраны

2. Эксперименты проводились в стальном баке 670×700×520 мм с окнами, заполненном рабочей средой – водопроводной водой с удельной электропроводностью  $\sigma_0 = 0,06$  См/м, в который помещалась модель с электродной системой. Параметры экспериментальной установки соответствовали параметрам электроразрядной установки для обработки скважин типа «Скиф»: зарядное напряжение конденсаторной батареи  $U_0 = 30$  кВ; емкость конденсаторной батареи  $C = 1$  мкФ; частота следования импульсов – 0,25 Гц; количество импульсов – 15.

3. Подготовка модели производилась путем нанесения на поверхность трубы 1 цементного раствора. Раствор получали из цемента марки 400 и песка в пропорции 1:4. На одну модель готовили

раствор из 4 дм<sup>3</sup> песка, 1 дм<sup>3</sup> цемента марки 400 и 750 мл воды. После подготовки модели она просушивалась в течение двух суток.

4. Электродная система открытого типа испытывалась на модели цементного кольца при следующих межэлектродных расстояниях  $l_{МЭ}$ , мм: 5, 10, 15, 22, 35. Где 22 мм – оптимальное значение межэлектродного расстояния для данных параметров установки, рассчитанное по формуле [2]:

$$l_{opt} = \sqrt[4]{r^2 \sqrt{\frac{L}{C}} 0,5 \frac{U_0^2 C}{A}}, \quad (1)$$

где  $r$  – расстояние до объекта обработки, м;  $L$  – индуктивность, Гн;  $A$  – искровая постоянная, В<sup>2</sup>·с·м<sup>-2</sup> (для искрового разряда  $A=10^5$  В<sup>2</sup>·с·м<sup>-2</sup>).

5. Электродная система закрытого типа испытывалась на модели цементного кольца (при оптимальном межэлектродном расстоянии  $l_{МЭ}=22$  мм) с двумя типами акустически прозрачных экранов: труба резиновая напорная с нитяными усилениями и труба полиэтиленовая.

6. Процесс воздействия на макет в динамическом режиме фиксировался с помощью видеокамеры, при этом отмечался момент наступления первого разрушения цементного кольца в зоне отверстия.

7. Интегральное воздействие на макет фиксировалось по числу отверстий, очищенных от цементной обмазки в результате действия волны давления после 15 разрядов.

Следует отметить, что данная методика при небольшой переработке объекта воздействия использовалась и для оценки эффективности электроразрядного воздействия на вязкие отложения [9].

#### **Результаты экспериментального исследования**

Для сравнения эффективности электродных систем открытого и закрытого типов и определения влияния длины межэлектродного промежутка на эффективность электроразрядного воздействия на модель призабойной зоны в эксперименте определялись:

- момент наступления первого разрушения цементного кольца в зоне отверстия;
- интегральное воздействие на макет, определяемое по числу очищенных от цемента отверстий в модели после 15 разрядов.

При оценке интегральной характеристики эффективности обработки использовался безразмерный коэффициент эффективности ( $K_{эф}$ ), который вычислялся согласно выражению

$$K_{эф} = \frac{N_i}{N_{opt}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $N_i$  – количество очищенных отверстий в ходе  $i$ -го эксперимента, шт.;  $N_{opt}$  – количество очищенных отверстий в ходе контрольного эксперимента (открытая электродная система, МЭП – оптимальный для данного режима).

Была выполнена серия экспериментов, в которой исследовались:

- зависимость эффективности обработки от длины МЭП в случае открытой электродной системы;
- сравнение эффективности открытых и закрытых электродных систем.

Получены следующие результаты.

На рис. 2. показан внешний вид модели призабойной зоны продуктивного пласта до (а) и после (б) обработки.

Варьирование длиной межэлектродного промежутка показало, что она значительно влияет на эффективность обработки модели призабойной зоны скважины (рис. 3), что находится в полном соответствии с представлениями об оптимальной длине МЭП и связью ее с амплитудой волны давления [2].

Аналогичная тенденция наблюдается и при анализе момента наступления первого разрушения ( $N_p$ ) цементного кольца в зоне отверстий (рис. 4).

Эти результаты позволяют сделать вывод, что главным фактором электроразрядного воздействия на хрупкие отложения в процессе декольматации скважины является амплитуда волны давления. Следовательно, при обработке надо стремиться к максимально возможной амплитуде волны давления, что при заданных параметрах генератора (электроразрядного устройства) можно достигнуть при установке оптимальной длины МЭП. Электроразрядная обработка на малом межэлектродном промежутке (5 и 10 мм) характеризуется малой эффективностью электроразрядного воздействия. Так, при межэлектродном промежутке 10 мм  $K_{эф}$  составляет 68% при 100% на оптимальном межэлектродном промежутке, а при межэлектродном промежутке 5 мм в модели не было зафиксировано очищенных от цемента отверстий.

Для моделирования условий работы закрытой электродной системы в пространство между зоной электрического разряда и объектом обработки помещался сплошной акустически проницаемый экран, который при проходе сквозь него дает минимальное изменение амплитуды волны давления. В качестве материала оболочки согласно [4, 5] были выбраны полиэтилен (как наиболее акустически прозрачный материал с импедансом, близким к импедансу воды) и рукав резиновый напорный (как наиболее технологичный материал). Полученные результаты (см. рис. 5) показали, что установка оболочки из полиэтилена практически не оказывает влияние на эффективность обработки. При использовании в качестве оболочки для закрытой электродной системы рукава резинового напорного эффективность несколько снижается, что согласуется с ранее полученными данными [4, 5].



Рис. 2. Внешний вид модели призабойной зоны продуктивного пласта до (а) и после (б) обработки

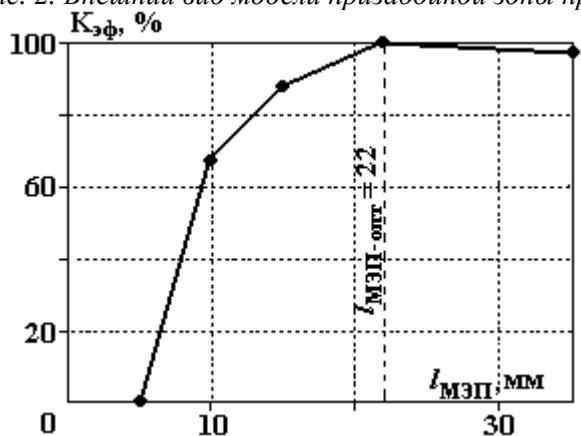


Рис. 3. Зависимость коэффициента эффективности обработки от длины МЭП

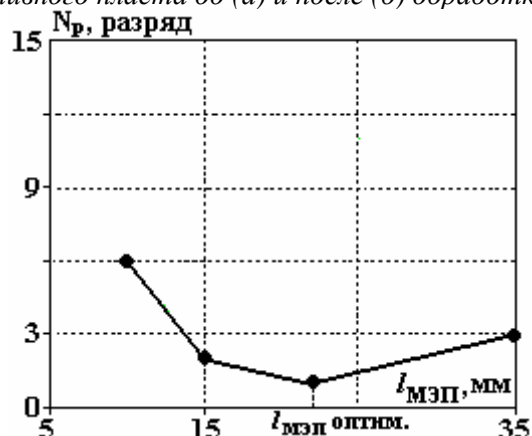


Рис. 4. Зависимость начала разрушения цементного кольца модели от длины МЭП

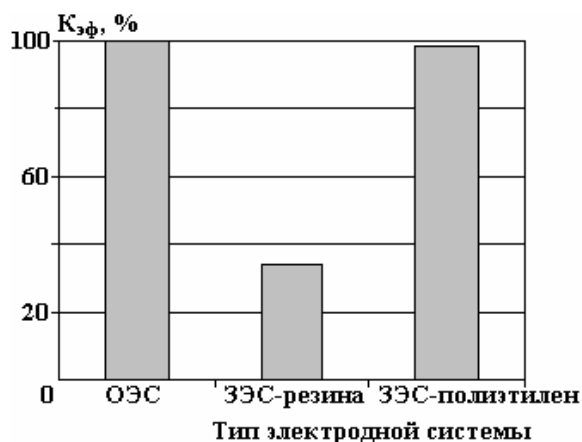


Рис. 5. Зависимость коэффициента эффективности обработки от типа электродной системы и материала оболочки

## Выводы

Электроразрядную обработку скважины с целью ее декольматации рекомендуется проводить на оптимальном межэлектродном промежутке, который обеспечивает максимальную амплитуду волны давления. Электроразрядное воздействие при малых значениях межэлектродного промежутка характеризуется малой эффективностью воздействия на хрупкие отложения: при работе на межэлектродном промежутке 10 мм  $K_{эф}$  уменьшается на 32% по сравнению с работой на оптимальном промежутке, а при межэлектродном промежутке 5 мм в модели не было зафиксировано очищенных от цемента отверстий. В силу специфических особенностей в скважине постоянную работу на оптимальном межэлектродном промежутке может обеспечить только закрытая электродная система.

В качестве материала оболочки ЗЭС лучше всего использовать материал с импедансом, близким к импедансу воды, например полиэтилен, который обеспечивает минимальное снижение амплитуды волны давления при ее прохождении сквозь оболочку.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гулый Г.А. *Основы разрядноимпульсных технологий*. Киев: Наукова думка, 1990, 208 с.
2. Шамко В.В., Кучеренко В.В. *Теоретические основы инженерных расчетов энергетических и гидродинамических параметров подводного искрового разряда*. Николаев: ИИПТ НАН Украины, 1991, 52 с. (Препринт/НАН Украины, Институт импульсных процессов и технологий; №20).
3. Жекул В.Г., Поклонов С.Г., Швец И.С. Электроразрядные погружные установки со стабилизированными рабочими параметрами. *Нефтяное хозяйство*. 2006, (2), 89–91.
4. Poklonov S. G., Zhekul V. G. and Smirnov A. P. Technique and results of experimental investigations of the influence of the elastic barrier on pressure wave parameters in electric discharge in water. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2007, **43**(5), 350–353.
5. Софийский К.К., Жекул В.Г., Смирнов А.П., Поклонов С.Г. Влияние упругой преграды на параметры волны давления, возбуждаемой разрядом в жидкости. *Геотехнічна механіка*. 2005, (5), 123–129.
6. Ковязин Н.И., Ипполитов В.В., Уросов С.А., Сорокин В.Ф., Косенков В.М., Жекул В.Г., Поклонов С.Г. Методика определения и экспериментальное исследование удельного импульса, сообщаемого возмущениями от источника электроразрядного типа. *Известия вузов: Нефть и газ*. 2000, (1), 25–30.
7. Ковязин Н.И., Уросов С.А., Шишков Д.А., Поклонов С.Г., Жекул В.Г., Трофимова Л.П. Экспериментальное исследование эффективности электродных систем электрогидроимпульсных скважинных устройств. *Известия вузов: Нефть и газ*. 2001, (2), 32–35.
8. Барбашова Г.А., Жекул В.Г., Смирнов А.П., Косенков В.М., Софийский К.К. Влияние оболочки камеры электроразрядного устройства на гидроимпульсную нагрузку в скважине. *Геотехнічна механіка*. 2004, (49), 106–114.
9. Софийский К.К., Жекул В.Г., Смирнов А.П., Поклонов С.Г. Экспериментальное тестирование математической модели электроразрядного воздействия на вязкие отложения. *Геотехнічна механіка*. 2010, (85), 133–139.

Поступила 25.06.10

## Summary

In work the experimental technique has been developed and experimental researches in comparison of efficiency of various technological modes of electrodischarge influence on physical model well bottom zone of a productive layer are executed. A result of research has shown necessity of use at well treatment of the closed electrode system.