

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ УПРУГОЙ ПРЕГРАДЫ НА ПАРАМЕТРЫ ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ В ВОДЕ

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

Введение

Для восстановления притока флюида в водяных и нефтяных скважинах используются электроразрядные погружные установки (ЭПУ) [1]. Сущность процесса заключается в том, что при опускании ЭПУ в скважину, заполненную жидкостью, в электродной системе (ЭС) ЭПУ реализует высоковольтный импульсный пробой жидкости, при котором возбуждаются волны сжатия, пульсирующая парогазовая полость, воздействующие на загрязненную фильтровую часть скважины, очищая ее.

Известно, что эффективность работы ЭС и установки в целом зависит от свойств скважинной жидкости и условий в скважине [2, 3]. Возможны такие внутрискважинные условия, при которых предпробивные потери энергии достигают более 50% от запасенной, при этом снижаются эффективность и стабильность разрядов. Для преодоления указанных препятствий применяются ЭС закрытого типа (ЗЭС) [4, 5]. Отличие ЗЭС от открытой ЭС состоит в наличии непроницаемой для жидкости, но акустически прозрачной оболочки, ограничивающей от внешней среды внутреннюю полость ЭС, которая заполнена рабочей жидкостью с оптимальной удельной электропроводностью, позволяющей стабилизировать разряд и снижать потери энергии до уровня 10% и менее.

Анализ проблемы

КПД процесса последовательного преобразования электрической энергии в ЗЭС в энергию силового воздействия на объект обработки $\eta_{\text{общ}}$ представим в виде произведения КПД четырех этапов преобразования энергии:

$$\eta_{\text{общ}} = \eta_{\text{ПП}} \times \eta_{\text{ЭЛ}} \times \eta_{\text{АК}} \times \eta_{\text{ПЕР}}, \quad (1)$$

где $\eta_{\text{ПП}}$ – КПД преобразования энергии при формировании канала разряда; $\eta_{\text{ЭЛ}}$ – КПД преобразования электрической энергии конденсатора во внутреннюю энергию канала разряда в течение первого полупериода разрядного тока; $\eta_{\text{АК}}$ – КПД преобразования внутренней энергии канала разряда в акустическую энергию волны давления; $\eta_{\text{ПЕР}}$ – КПД передачи акустической энергии через передающую среду к объекту обработки.

Как уже указывалось, в ЗЭС уменьшаются предпробивные потери энергии, что способствует повышению КПД преобразования энергии при формировании канала разряда $\eta_{\text{ПП}}$:

$$\eta_{\text{ПП}} = \frac{W_0 - W_{\text{ПП}}}{W_0}, \quad (2)$$

где $W_0 = CU_0^2/2$ – начальная запасаемая энергия в накопительном конденсаторе, Дж; C – емкость накопительного конденсатора, Ф; U_0 – напряжение зарядки накопительного конденсатора, В; $W_{\text{ПП}}$ – предпробивные потери энергии, Дж.

КПД преобразования энергии конденсатора во внутреннюю энергию канала разряда в первом полупериоде разрядного тока [6], в течение которого формируется акустическая (ударная) волна, определяется как

$$\eta_{\text{ЭЛ}} = \left(\frac{\pi A l_{\text{МЭ}}^2}{U_0^2 \eta_{\text{ПП}} \sqrt{LC}} \right), \quad (3)$$

где A – искровая постоянная (для иницируемых разрядов $A=0,25 \times 10^5 \text{ В}^2\text{с}/\text{м}^2$, для неиницируемых разрядов $A=10^5 \text{ В}^2\text{с}/\text{м}^2$); $l_{\text{МЭ}}$ – длина межэлектродного промежутка, м; L – индуктивность разрядной цепи, Гн.

КПД преобразования энергии канала разряда в акустическую энергию волны давления [7] можно выразить формулой:

$$\eta_{\text{ак}} = \frac{0,8}{c_0} \left(\frac{\eta_{\text{эл}} W_0 \eta_{\text{пп}}}{\rho_0 l_{\text{мэ}} \tau^2} \right), \quad (4)$$

где c_0 – скорость звука в невозмущенной жидкости, м/с; ρ_0 – плотность жидкости, кг/м³; $\tau = (1 + \eta_{\text{эл}}^3) \pi \sqrt{LC}$ – длительность первого полупериода разрядного тока, с.

КПД передачи акустической энергии через передающую среду к объекту обработки $\eta_{\text{пер}}$ определим согласно равенству

$$\eta_{\text{пер}} = \frac{W_{\text{ак2}}}{W_{\text{ак1}}}, \quad (5)$$

где $W_{\text{ак1}}$ – акустическая энергия, передаваемая объекту обработки без потерь в передающей среде, Дж; $W_{\text{ак2}}$ – акустическая энергия, передаваемая объекту обработки при потерях в передающей среде, Дж.

Как следует из (1), максимальное значение $\eta_{\text{общ}}$ возможно при наибольшем значении каждого из сомножителей, в том числе и $\eta_{\text{пер}}$. Если для открытой ЭС $\eta_{\text{пер}}$ можно принять равным единице, то для ЗЭС эта величина должна быть меньше единицы при ограничивающей оболочке, расположенной на пути распространения волны нагружения от канала разряда к объекту обработки.

Известно [4], что тонкая резиновая оболочка толщиной $\delta = 1$ мм уменьшает амплитуду ударной волны на 15–20%, а подобная оболочка из полиэтилена практически не ослабляет волну давления [8]. Однако, исходя из специфики работы ЗЭС в условиях глубоких скважин (до 5000 метров) с температурой среды до 100⁰С, гидростатическими давлениями до 50 МПа, существенными механическими нагрузками при спуске-подъеме, реальная толщина оболочки может быть более 6 мм.

На основе математического моделирования [9] проведено исследование процесса передачи импульса давления через стенку разрядной камеры обсадной трубе для трех типов материала: полиэтилена, резины, стали ($\delta = 6, 6, 1$ мм соответственно). Результаты исследований показали, что наличие экрана из этих материалов приводит к уменьшению амплитуды волны давления на внутреннюю поверхность трубы в 2; 2,2; 2,6 раза соответственно.

Однако данный расчет не учитывал влияния гидростатического давления на свойства самой оболочки и отсутствия точных данных о таких параметрах, как модуль Юнга для реально используемых сложных многослойных оболочек [10].

Цель работы. Представлено экспериментальное исследование преобразования параметров волны давления, таких как амплитуда, удельный импульс и акустическая энергия для оболочек из различных материалов, при различных гидростатических давлениях, соответствующих скважинным.

Методика исследований

Исследования влияния материала оболочки на передачу волны давления к объекту проводились на экспериментальном стенде [3], технологическая часть которого представлена на рис. 1 по методике, основанной на измерении временного профиля импульсного давления $P(t)$ специальным волноводным датчиком давления – ВДД (рис. 2).

Используя данные по $P(t)$, определяли максимальную амплитуду импульсного давления P_m , удельный импульс J , рассчитываемый по формуле

$$J = \int_0^t P(t) dt, \quad (6)$$

и плотность потока акустической энергии волны давления W [6]:

$$W = \frac{1}{\rho_0 c_0} \int_0^t P^2(t) dt. \quad (7)$$

Исследования проводили при следующих энергетических параметрах установки: зарядное напряжение $U_0 = 20$ кВ, емкость конденсаторной батареи $C = 0,25$ мкФ, индуктивность разрядной цепи $L = 4,58$ мкГн.

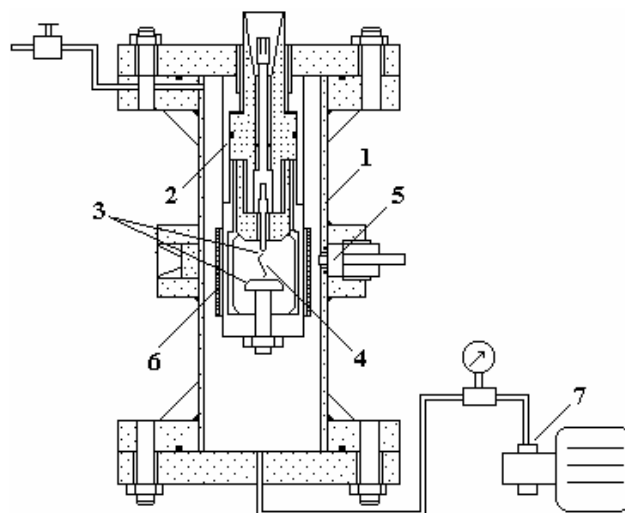


Рис. 1. Технологическая часть экспериментального стенда: 1 – разрядная камера высокого давления; 2 – коаксиальная электродная система; 3 – электроды электродной системы; 4 – канал разряда; 5 – волноводный датчик давления; 6 – ограничивающая оболочка, 7 – насос высокого давления

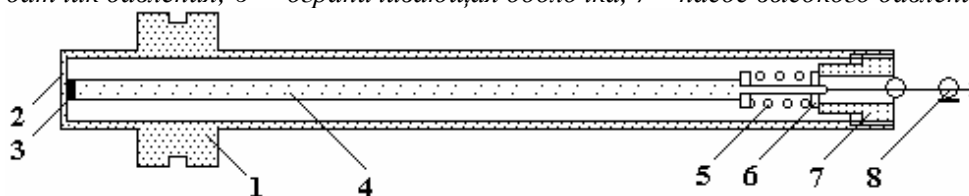


Рис. 2. Волноводный датчик давления: 1 – корпус датчика; 2 – доньшко датчика; 3 – пьезокерамический преобразователь; 4 – медный волновод; 5 – пружина; 6 – диэлектрическая шайба; 7 – прижимная гайка; 8 – измерительный кабель

Для стабилизации длины и гидродинамических параметров канала разряда 4 (рис. 1) производилось инициирование разряда медным проводником $\varnothing 0,1$ мм, длиной 46 мм. Рабочей средой служила дистиллированная вода.

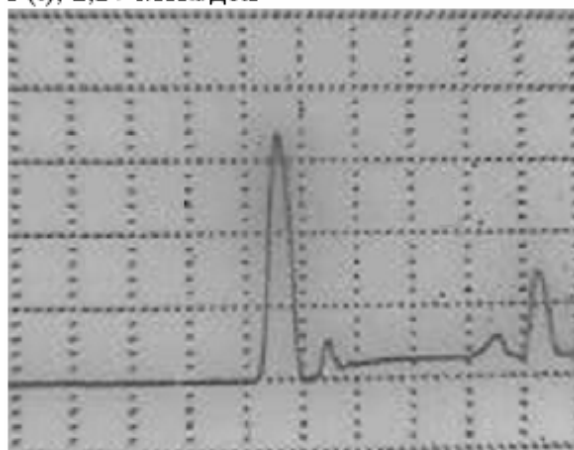
Испытанию подвергались ограничивающие оболочки 6 из полиэтилена низкого давления ($\delta=6$ мм), резиновой (рукав резиновый напорный с нитяными усилениями, неармированный гладкий по ГОСТу 10362 -76, $\delta=7,5$ мм) и стальной оболочек ($\delta = 0,6$ мм).

Эксперименты проводились при следующих уровнях гидростатического давления в камере: 0,1, 0,6, 1,8, 3,0, 12,0, 30,0 МПа.

Применявшийся волноводный датчик давления (рис. 2) позволял выполнять измерения импульсного давления на внутренней поверхности камеры высокого давления. Чувствительным элементом ВДД является преобразователь 3 из пьезокерамики ЦТС-19.

Динамическая калибровка датчика ВДД для определения его чувствительности вместе с измерительным кабелем длиной 6 м осуществлялась с помощью ударной установки по методике, изложенной в [11]. Чувствительность датчика составила $\mu_d=19,65$ мкВ/Па.

$P(t), 1,27 \text{ МПа/дел}$



$t, 10 \text{ мкс/дел}$

Рис. 3. Типичная осциллограмма волны давления

Для каждого уровня гидростатического давления выполнено по пять опытов при наличии и без ограничивающей оболочки. Определялись средние статистические значения \bar{P}_{m1} , \bar{J}_1 , \bar{W}_1 без ограничивающей оболочки и \bar{P}_{m2} , \bar{J}_2 , \bar{W}_2 – с ограничивающей оболочкой, на временном отрезке от 0 до 60 мкс, в течение которого значение импульсного давления уменьшалось в пять раз (рис.3).

На основании полученных данных вычислялись коэффициенты преобразования амплитуды импульсного давления ε_p , удельного импульса ε_j , акустической энергии $\varepsilon_w = \eta_{\text{пер}}$ в электродной системе закрытого типа по сравнению с электродной системой открытого типа по выражениям:

$$\varepsilon_p = \frac{\bar{P}_{m2}}{\bar{P}_{m1}}, \quad (8)$$

$$\varepsilon_j = \frac{\bar{J}_2}{\bar{J}_1}, \quad (9)$$

$$\varepsilon_w = \frac{\bar{W}_2}{\bar{W}_1} = \eta_{\text{пер}}. \quad (10)$$

Результаты исследований

Сравнительный анализ коэффициентов преобразования исследуемых материалов при гидростатическом давлении 1,8 МПа представлен на рис. 4, из которого следует, что наибольшими коэффициентами преобразования характеризуется полиэтиленовая оболочка. В частности, КПД передачи $\eta_{\text{пер}}$ для полиэтилена близок к единице, в то время как для резины он составляет порядка 0,87, а для стали – 0,6.

Однако, как уже указывалось, в связи с особыми условиями внутри скважины наиболее пригодным материалом для оболочки ЗЭС является рукав резиновый, который, уступая полиэтилену по эффективности преобразования, превосходит его по технологическим свойствам и обеспечивает меньшие потери по сравнению с оболочкой, выполненной из стали.

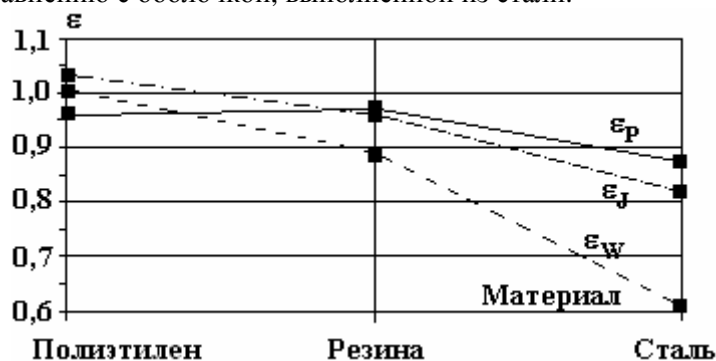


Рис. 4. Коэффициенты преобразования параметров волны давления ограничивающими оболочками из различных материалов

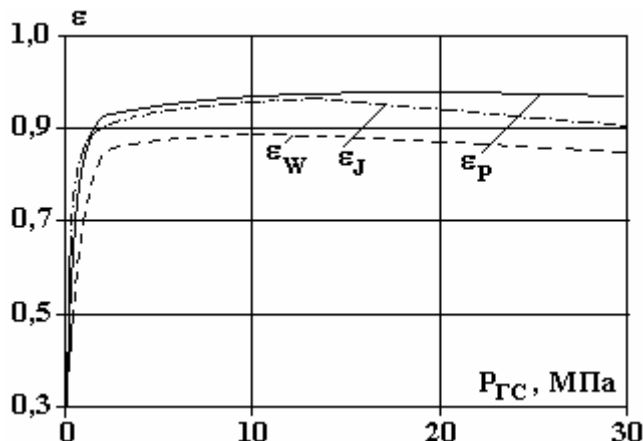


Рис. 5. Зависимости коэффициентов преобразования параметров волны давления от гидростатического давления ограничивающей оболочкой из рукава резинового

Результаты исследования коэффициентов преобразования для резинового рукава во всем диапазоне изменения гидростатического давления показаны на рис. 5, из которого видно, что их значение зависит от гидростатического давления. Так, при изменении давления от 0,1 до 1,8 МПа значения их увеличиваются в среднем от 0,3 до 0,85. При дальнейшем повышении давления изменения их незначительны. Вероятно, подобное поведение указанных параметров связано с наличием воздушных включений в многослойной структуре оболочки, ослабляющее влияние которых на прохождение акустической волны ослабевает по мере объемного обжатия и уплотнения при повышении гидростатического давления в камере.

Выводы

1. Наибольшими коэффициентами преобразования параметров волны давления (близкими к единице) характеризуется полиэтилен, что повышает его применение в качестве оболочки на электродные системы закрытого типа при соответствующей технологической проработке.

2. Применение рукава резинового как наиболее технологичного материала в условиях глубоких скважин материала для оболочки закрытой электродной системы целесообразно при гидростатическом давлении более 1,8 МПа, когда обеспечивается КПД передачи на уровне 0,85.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубовенко К.В., Курашко Ю.И., Швец И.С., Онищенко Л.И. Разрядно-импульсное оборудование для увеличения дебита нефтяных и водозаборных скважин // Вестник национального технического университета “ХПИ”. Темат. вып. “Электроэнергетика и преобразовательная техника”. Харьков, 2002. № 7. Т. 1. С. 96–103.
2. Поклонов С.Г. Режимы работы электродной системы электрогидроимпульсного скважинного устройства // Вестник национального технического университета “ХПИ”. Темат. вып. “Электроэнергетика и преобразовательная техника”. Харьков, 2003. Т. 1. № 1. С. 154–162.
3. Поклонов С.Г., Глушенко В.Ж., Трофимова Л.П., Цуркин В.Н., Ковязин Н.И. Эффективность электрического разряда для условий нефтяных скважин // Нефтяное хозяйство. 1992. № 3. С. 20–23.
4. Романенко В.А., Вольницкая Э.М. Восстановление производительности водозаборных скважин. Л.: Недра, Ленинградское отделение, 1986. 112 с.
5. Патент 27436 Украины. МПК 6 E 21 B 43/112. Электрогидроимпульсный свердловинный пристрій / Сасенко В.А., Поклонов С.Г. Опубл. 15.09.2000; Бюл. №4.
6. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. Киев: Наукова думка. 1979. 208 с.
7. Кривицкий Е.В. Эффективность преобразования энергии при высоковольтном искровом разряде // Физико-механические процессы при высоковольтном разряде в жидкости. Киев: Наукова думка, 1980. С. 60–67.
8. Алексеев В.С., Гребенников В.Т. Восстановление дебита водозаборных скважин. М.: Агропромиздат, 1987. 239 с.
9. Ковязин Н.И., Ипполитов В.В., Уросов С.А., Сорокин В.Ф., Косенков В.М., Жекул В.Г., Поклонов С.Г. Влияние экранов на динамическое и кинематическое поведение обсадной трубы при воздействии на нее возмущений от источника электроразрядного типа // Изв. вузов “Нефть и газ”. 1999. № 6. С. 13–19.
10. Смирнов А.П., Жекул В.Г., Косенков В.М., Поклонов С.Г. Исследование упругих свойств многослойных материалов, используемых в качестве цилиндрических оболочек закрытых электродных систем // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / Ин-т геотехнической механики им. М.С. Полякова НАН Украины. Днепропетровск, 2003. Вып. 47. С. 196–204.
11. Теляшов Л.Л., Чеканов Ю.С., Гнатенко Е.К. Установка для динамической калибровки широкополостных датчиков давления // Физические основы электрогидравлической обработки материалов: Сб. науч. трудов. Киев: Наукова думка, 1988. С. 160–165.

Поступила 30.03.07

Summary

A method and results of experimental researches of influencing of resilient barrier from some materials on transformation of parameters of wave of pressure at an electric discharge in water with the purpose of the use of them in the electrode systems of closed type of high-voltage discharge submersible installations for treatment of aquatic and oil-wells is resulted.