

Влияние параметров жидкости на амплитуду волны давления, генерируемой электрическим разрядом

* А. П. Смирнов, В. Г. Жекул, Э. И. Тафтай, О. В. Хвощан, И. С. Швец

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
г. Николаев, 54018, Украина, *e-mail: smirnovap1978@gmail.com*

Выполнено экспериментальное исследование влияния гидростатического давления, температуры и удельной электропроводности жидкости на амплитуду волны давления, генерируемой электрическим разрядом в жидкости при электроразрядной обработке нефтяных скважин. Полученные результаты показали, что с ростом гидростатического давления происходит уменьшение амплитуды генерируемой волны давления. Использование в качестве рабочей среды жидкости с удельной электропроводностью 0,53 См/м (что близко к значению удельной электропроводности пластовой воды) приводит к уменьшению (до 67%) амплитуды волны давления. Поэтому при обработке нефтедобывающих скважин электроразрядным погружным устройством необходимо использовать схему с закрытой электродной системой, так как в этом случае эффективность обработки не зависит от удельной электропроводности внутрискважинной жидкости.

Ключевые слова: амплитуда волны давления, электрический разряд в жидкости, электроразрядная обработка скважин, гидростатическое давление, удельная электропроводность, температура, интенсификация добычи нефти.

УДК 537.528

DOI: 10.5281/zenodo.1168366

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире наиболее актуальны задачи, посвященные обеспечению промышленности топливно-энергетическими ресурсами. Особый интерес представляют работы, направленные на повышение коэффициента извлечения нефти существующих нефтяных месторождений [1–4].

Известно, что в процессе эксплуатации нефтяных скважин происходит уменьшение их производительности. Это связано с кольматацией скважины и ее призабойной зоны различного рода отложениями. Для решения данной проблемы могут быть применены различные методы [5–7]. Одним из наиболее перспективных и эффективных является электроразрядный способ декольматации скважин [8].

В основе электроразрядного способа декольматации лежит использование электрического разряда в жидкости, в результате которого генерируются волны давления. Волну давления принято считать основным воздействующим фактором электроразрядного способа декольматации, приводящим к очистке перфорационных отверстий и призабойной зоны скважины от кольматантов, тем самым повышая ее дебит [9]. При этом в качестве основного параметра, характеризующего генерируемую волну давления, используется ее амплитудное значение [10].

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ

Рассматривая электроразрядный способ, нельзя не отметить, что электрический разряд в

скважине осуществляется в условиях повышенных температур и гидростатических давлений, а также при изменяющейся в процессе обработки удельной электропроводности жидкости, заполняющей скважину. В связи с этим для обеспечения эффективной очистки скважины от отложений необходимо рассмотреть влияние скважинных условий на параметры волны давления, генерируемой электрическим разрядом в скважинной жидкости.

В процессе обработки призабойной зоны скважины происходит увеличение удельной электропроводности скважинной жидкости в результате поступления нефти из зоны пласта в скважину и растворения в ней различных солей. Это приводит к необходимости уменьшения длины межэлектродного промежутка (МЭП) для обеспечения стабильности работы электроразрядного устройства, что, в свою очередь, ведет к невозможности обеспечения режима обработки при оптимальном МЭП и соответственно к падению эффективности электроразрядной обработки. Данная проблема была решена путем разработки закрытой электродной системы (ЗЭС) [11], в которой электроды помещены в герметичную акустически прозрачную упругую оболочку, заполненную рабочей жидкостью, позволяющей проводить обработку при оптимальном значении МЭП. Однако ее разработка поставила ряд новых вопросов, в том числе как оболочка закрытой электродной системы влияет на параметры волны давления, генерируемой электрическим разрядом в жидкости. Частично ответ на этот вопрос дан в статье [12], где исследовалось

влияние материала упругой оболочки ЗЭС на характеристики волны давления при различных гидростатических давлениях. Однако в данной работе в исследованиях не использовалась реальная ЗЭС, которая применяется при обработке, а инициирование разряда осуществлялось медным проводником. Поэтому интерес представляют работы, сравнивающие эффективность работы открытых электродных систем (ОЭС) и ЗЭС при различных величинах удельной электропроводности скважинной жидкости, что позволит сделать вывод об эффективности и целесообразности применения того или иного типа электродных систем.

Помимо удельной электропроводности на эффективность электроразрядной обработки могут оказывать влияние повышенные гидростатическое давление и температура.

Существует ряд работ, в которых рассматривается влияние гидростатического давления на параметры волны давления, генерируемой электрическим разрядом в жидкости. Так, в работе [13] отмечено уменьшение амплитуды волны давления с ростом гидростатического давления от 3 до 8 МПа. Однако в данной работе рассматривался диапазон гидростатических давлений до 8 МПа, а в реальных скважинах гидростатическое давление может достигать величин десятков мегапаскалей. В работе [14] также показано, что рост гидростатического давления от 0,1 до 30 МПа приводит к уменьшению амплитуды волны давления на 15% и изменению ее временного профиля. Однако в этой работе инициирование разряда осуществлялось медным проводником, тогда как в ЗЭС и ОЭС электроразрядных погружных устройств типа «Скиф» происходит пробой водного промежутка.

Учитывая все вышесказанное, цель данной работы – экспериментальное исследование влияния скважинных условий (удельной электропроводности жидкости, гидростатического давления, температуры) и режима обработки скважины (с применением ЗЭС или ОЭС) на амплитуду волны давления, генерируемой электрическим разрядом в жидкости в процессе электроразрядной обработки скважин.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования проводились на специальном стенде, моделирующем внутрискважинные условия. Стенд состоит из энергетической, технологической и измерительной частей. Его структурная схема приведена на рис. 1.

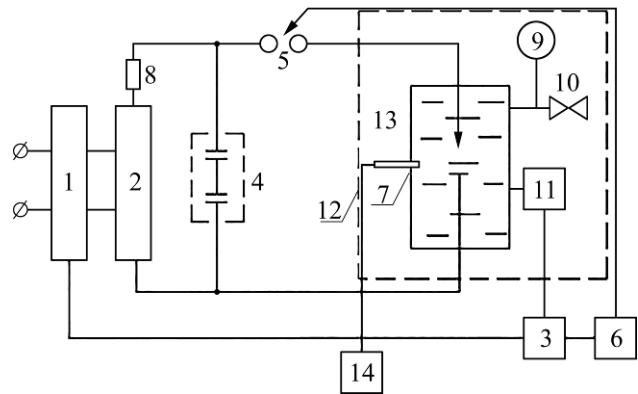


Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда: 1 – регулировочный трансформатор РТТ 25/0,5; 2 – высоковольтный трансформатор выпрямитель ВТМ 15/50; 3 – пульт управления; 4 – батарея импульсных конденсаторов; 5 – воздушный управляемый разрядник; 6 – блок поджига; 7 – камера высокого давления; 8 – зарядное сопротивление; 9 – манометр; 10 – клапан; 11 – насос высокого давления с электроприводом; 12 – технологическая часть испытательного стенда; 13 – датчик давления; 14 – осциллограф.

Энергетическая часть стенда предназначена для осуществления высоковольтного электрического разряда. Она в себя включает: регулировочный трехфазный трансформатор РТТ 25/0,5 (1), выпрямитель-трансформатор ВТМ 15/50 (2), пульт управления (3), батарею импульсных конденсаторов (4), воздушный управляемый разрядник (5), блок поджига (6), зарядное сопротивление (8).

Энергетическая часть стенда позволяет с помощью регулировочного трансформатора (1) через выпрямитель-трансформатор (2) и зарядное сопротивление (8) (для ограничения тока зарядки) зарядить батарею импульсных конденсаторов (4) до необходимого значения высоковольтного напряжения (свыше 1 кВ). После достижения требуемого напряжения с пульта управления (3) с помощью блока поджига (6) запускается воздушный разрядник (5) и осуществляется электрический разряд в камере высокого давления (7).

Непосредственно скважина и условия в ней моделируются в технологической части (12). Ее основу составляет разрядная камера высокого давления (рис. 2) внутренним диаметром 0,12 м, который соответствует наиболее распространенному внутреннему диаметру обсадной трубы нефтяных скважин в перфорационной части призабойной зоны. Верхний фланец (крышка) камеры позволяет устанавливать в камере закрытую или открытую электродную систему электроразрядного устройства «Скиф-100М». В зоне разряда камера снабжена двумя отверстиями с прижимными гайками, которые используются для установки датчиков импульсного давления. Помимо камеры в технологическую

часть входит оборудование для обеспечения и контроля внутрискважинных условий (рис. 1): камера высокого давления (7), манометр (9), клапан (10), насос высокого давления с электроприводом (11).



Рис. 2. Разрядная камера высокого давления.

Для измерения импульсного давления использовался пьезоэлектрический волноводный датчик импульсного давления ДТХ-1 (13) [15]. Сигнал с датчика давления регистрировался цифровым запоминающим осциллографом Tektronix TDS 2024В (14).

С помощью насоса (насос типа НД 2,5 16/400 фирмы RINAR MASINBUVE (Латвия), ОСТ 26-06-2003-77) в камере высокого давления создается необходимое гидростатическое давление, контроль за величиной которого осуществляется с помощью образцового манометра типа МО-160-60 МПа-0,4 ГОСТ 6521-72 (верхний предел измерений 60 МПа, класс точности 0,4, цена деления – 0,6 МПа, предел допускаемой основной погрешности $\pm 0,4\%$ от верхнего предела измерений). До поднятия в камере гидростатического давления, при необходимости, возможен нагрев воды в камере высокого давления. Для этого используется трубчатый электронагреватель. Контроль за нагревом осуществляется с помощью терморпары типа НУТР-105 и мультиметра МУ 60 (диапазон измерения температуры от -20 до 1000°C , цена деления -1°C , погрешность $\pm 1,0\%$).

В ходе проведения исследований емкость конденсаторной батареи составляла 2,26 мкФ, зарядное напряжение 30 кВ, запасенная в конденсаторах энергия – ≈ 1 кДж, длина МЭП – 25 мм. Данные параметры энергетической части стенда соответствуют параметрам электроразрядного устройства «Скиф-100М» [8].

В процессе проведения экспериментов рассматривались схемы электроразрядного воздействия как с ОЭС, так и с ЗЭС.

Экспериментальные исследования выполнялись на трех уровнях гидростатического давления: 2, 10 и 20 МПа (для ОЭС также был выпол-

нен эксперимент при гидростатическом давлении 0,6 МПа). Нижнее значение этого интервала (2 МПа) обусловлено низкой эффективностью работы закрытой электродной системы при давлениях ниже 1,8 МПа [12].

В экспериментальных исследованиях при гидростатических давлениях 2, 10 и 20 МПа удельная электропроводность рабочей жидкости имела значения соответственно 0,121; 0,168 и 0,192 См/м. Это обеспечивало стабильность электрического разряда и малые предпробивные потери энергии [11, 16].

Температурные исследования проводились с использованием ОЭС, при гидростатическом давлении 10 МПа и трех значениях температуры: 20, 50 и 70°C .

На каждом режиме выполнялось по 10 экспериментов.

Кроме того, для случая применения открытой электродной системы были проведены эксперименты в сильноконцентрированных водных растворах NaCl с удельной электропроводностью 0,53 См/м, характерных для попутно добываемых и закачиваемых в скважину пластовых вод нефтяных месторождений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 3 представлены экспериментальные данные по влиянию гидростатического давления на амплитуду волны давления, генерируемой электроразрядным погружным устройством с помощью как ОЭС, так и ЗЭС. Их анализ показывает, что с ростом гидростатического давления от 2 до 20 МПа происходит уменьшение среднего значения амплитуды волны давления в случае применения как ОЭС, так и ЗЭС. Так, для ОЭС с ростом гидростатического давления от 2 до 20 МПа амплитудное значение падает на $\approx 36\%$, а для ЗЭС при росте гидростатического давления от 2 до 20 МПа амплитуда падает на $\approx 38\%$. Эта зависимость носит линейный характер, что подтверждают приведенные на графике величины коэффициента достоверности аппроксимации R^2 .

Сравнение амплитудных значений волн давления для разных типов электродных систем показывает, что в случае применения ЗЭС наблюдается их падение на $\approx 13\%$, что хорошо согласуется с результатами исследований [12]. Из данных, представленных на рис. 3, видно, что из общей тенденции выпадают результаты, полученные при гидростатическом давлении 10 МПа. Это объясняется тем, что в отличие от исследований [12] наши экспериментальные исследования проводились на «свободном»

искровом разряде без инициирования, из-за чего наблюдается большой разброс данных, который связан с большим количеством различных пространственных ориентаций каналов разряда. В целом же несущественное уменьшение амплитудного значения при применении ЗЭС хорошо прослеживается при сравнении линий тренда для ОЭС и ЗЭС, также представленных на рис. 3.

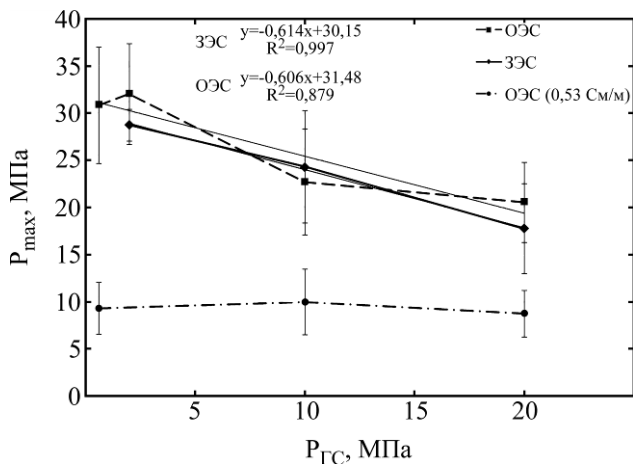
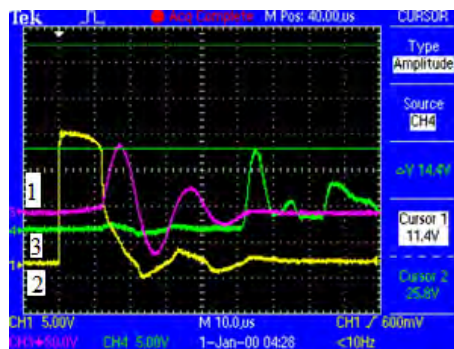


Рис. 3. Влияние гидростатического давления на амплитуду волны давления, генерируемой электроразрядным погружным устройством.

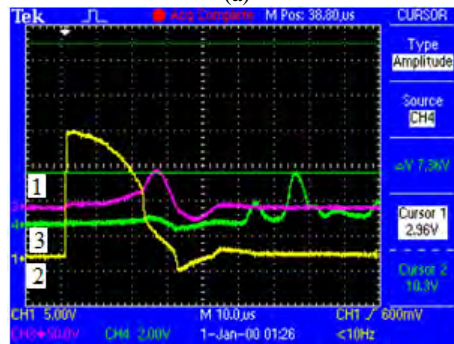
Также интересен момент роста среднего значения амплитуды волны давления в ОЭС от 0,6 до 2 МПа с последующим его спадом при увеличении гидростатического давления до 20 МПа. Полученные результаты хорошо согласуются с данными работы [13], где авторы наблюдали рост амплитуды волны давления при увеличении гидростатического давления от 0,1 до 3 МПа и уменьшение амплитуды волны давления при последующем росте гидростатического давления до 8 МПа.

Как свидетельствует многолетний опыт обработки скважин электроразрядным устройством, в большинстве случаев скважину заполняют пластовой водой нефтяных месторождений, электропроводность которой составляет порядка 0,5 См/м и выше. В связи с этим в рамках данной работы были проведены эксперименты по исследованию импульса давления, генерируемого электрическим разрядом в жидкости при работе ОЭС в жидкости с электропроводностью 0,53 См/м. Как видно из представленных на рис. 3 данных, этот случай характеризуется сильным падением амплитудных значений генерируемой волны давления (до 67%). Это обусловлено особенностями протекания электрического разряда при повышенной электропроводности, что видно из осциллограмм, представленных на рис. 4. На приведенных осциллограммах кривая 1 – разрядный ток; 2 – напряжение на разрядном промежутке; 3 – давление на стенке камеры.

Анализ рис. 4 показывает, что в случае электрического разряда в жидкости с большей электропроводностью электрическому пробую предшествует стадия зажигания «короны», на которую затрачивается значительная часть энергии, что приводит к снижению амплитудных значений генерируемой волны давления и соответственно уменьшению эффективности воздействия.



(а)



(б)

Рис. 4. Осциллограммы разрядного тока (1), напряжения на разрядном промежутке (2) и давления на стенке камеры (3) при электрическом разряде с параметрами, характерными для параметров электроразрядного устройства «Скиф»: (а) – электропроводность жидкости 0,121 См/м; (б) – электропроводность жидкости 0,53 См/м.

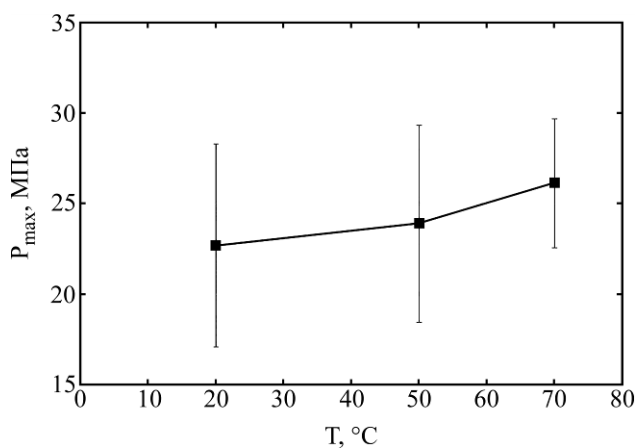


Рис. 5. Влияние температуры на амплитуду волны давления, генерируемой электроразрядным погружным устройством.

Полученные результаты показывают, что при обработке нефтедобывающих скважин электроразрядным погружным устройством необходимо использовать ЗЭС, так как в этом случае эффек-

тивность обработки не зависит от удельной электропроводности внутрискважинной жидкости.

Оценка влияния температуры рабочей жидкости на амплитуду волны давления приведена на рис. 5. Анализ показывает, что с ростом температуры от 20 до 70°C происходит увеличение среднего значения амплитуды волны давления на 15%. Однако с учетом того, что все результаты лежат в диапазоне статистического разброса данных, для окончательного вывода по влиянию температуры жидкости на амплитуду волны давления генерируемой электрическим разрядом необходимо проведение дополнительных исследований.

ВЫВОДЫ

Выполненные исследования по влиянию параметров жидкости, соответствующих скважинным условиям, на амплитуду волны давления, генерируемой электрическим разрядом в жидкости, позволили заключить:

– с ростом гидростатического давления от 2 до 20 МПа происходит уменьшение амплитудного значения генерируемой электрическим разрядом волны давления: для схемы обработки с использованием открытой электродной системы амплитуда падает на $\approx 36\%$, а для схемы обработки с закрытой электродной системой – на 38%;

– использование закрытой электродной системы при электрическом разряде в жидкости с оптимальной электропроводностью приводит к уменьшению амплитуды генерированной волны давления на $\approx 13\%$;

– электрический разряд в жидкости с удельной электропроводностью 0,53 См/м (что близко к значению удельной электропроводности пластовой воды) приводит к уменьшению (до 67%) амплитуды волны давления по сравнению с электрическим разрядом в жидкости с оптимальным значением удельной электропроводности. Поэтому при обработке нефтедобывающих скважин электроразрядным погружным устройством необходимо использовать закрытую электродную систему, так как в этом случае изменение удельной электропроводности скважинной жидкости не влияет на эффективность обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нукунов Д. *Геоинформатика*. 2014, (1), 19–24.
2. Малышко Ф.Л. *Экспозиция Нефть Газ*. 2013, (2), 17–18.
3. Alvarado V. and Manrique E. *Energies*. 2010, **3**, 1529–1575. DOI: 10.3390/en3091529.
4. Молчанов А.А., Агеев П.Г. *Записки Горного института*. 2017, **227**, 530–539. DOI: 10.25515/PMI.2017.5.530.

5. Софийский К.К., Филимонов П.Е., Бокий Б.В., Швец И.С., Чередников В.В., Смирнов А.П., Агаев Р.А. *Динамические способы декольматации поверхностных скважин*. Донецк: ТОВ «Східний видавничий дім», 2014. 248 с.
6. Бадрегдинов И.А., Карпов В.Г. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2014, **9**(1). URL: http://www.ngtp.ru/rub/3/5_2014.pdf DOI: http://dx.doi.org/10.17353/2070-5379/5_2014
7. Saleem Qadir Tunio, Abdul Haque Tunio, Naveed Ahmed Ghirano, Ziad Mohamed El Adawy. *Int J Appl Sci Technol*. 2011, **1**(5), 143–153.
8. Жекул В.Г., Литвинов В.В., Мельхер Ю.И., Смирнов А.П. и др. *Нафтогазова енергетика*. 2017, **27**(1), 23–31.
9. Zhekul V.G., Poklonov S.G., Smirnov A.P. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2011, **47**(1), 89–93.
10. Ахметов М.Н., Ахметов Н.Д., Гимадеев М.М., Кривошеев В.А. *Прикладная физика*. 2015, (6), 53–56.
11. Жекул В.Г., Поклонов С.Г., Швец И.С. *Нефтяное хозяйство*. 2006, (2), 89–91.
12. Poklonov S.G., Zhekul V.G., Smirnov A.P. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2007, **43**(5), 350–353.
13. Dong Yan, Decun Bian, Jinchang Zhao, Shaoqing Niu. *Shock and Vibration*, 2016, Article ID 6412309, 11 p. DOI: 10.1155/2016/6412309.
14. Smirnov A.P., Zhekul V.G., Poklonov S.G. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2014, **50**(3), 39–43.
15. Жекул В.Г., Смирнов А.П., Тафтай Э.И., Хвошан О.В., Швец И.С. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2017, (5), 55–59. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.5.09.
16. Щерба А.А., Косенков В.М., Жекул В.Г., Поклонов С.Г. *Техническая электродинамика*. 2004, (3), 23–26.

Поступила 03.11.17

Summary

An experimental study of the effect of hydrostatic pressure, temperature and specific electrical conductivity of a liquid on the amplitude of a pressure wave generated by an electric discharge in a liquid during electric discharge treatment of oil wells is performed. The obtained results showed that with increasing hydrostatic pressure, the amplitude of the generated pressure wave decreases. The use of a fluid with a conductivity of 0.53 S/m as a working medium (which is close to the value of the specific conductivity of the produced water) leads to a decrease (up to 67%) in the amplitude of the pressure wave. Therefore, when processing oil wells using the electric discharge immersion device, it is necessary to use a treatment scheme with a closed electrode system, since in this case the processing efficiency does not depend on the electrical conductivity of the downhole fluid.

Keywords: pressure wave amplitude, electric discharge in a liquid, electric discharge treatment of wells, hydrostatic pressure, specific electric conductivity, temperature, intensification of oil production.