

Влияние гидростатического давления на параметры волны сжатия, генерируемой электрическим разрядом в жидкости

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

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: aps-78@mail.ru*

Приведены результаты экспериментального исследования влияния гидростатического давления на параметры волны давления при электрическом разряде в жидкости. Показано, что повышение гидростатического давления вызывает уменьшение амплитуды волны давления и изменение ее временного профиля.

Ключевые слова: гидростатическое давление, электрический разряд, амплитуда волны давления, электроразрядный способ декольматации скважин.

УДК 534.2:537.528:622.24

ВВЕДЕНИЕ

Электроразрядные технологии, основанные на использовании энергии высоковольтного электрического разряда в жидкости, нашли свое применение во многих отраслях промышленности. В частности, одна из них направлена на обработку призабойной зоны нефтяных, газовых, водяных и нагнетательных скважин [1, 2]. Отличительной особенностью этой технологии является наличие столба жидкости в скважине, создающего в зоне реализации высоковольтного электрического разряда гидростатическое давление до 50 МПа, которое влияет на все стадии развития разряда в жидкости и формирования волны давления.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ

Влияние высокого гидростатического давления на активную стадию разряда [3], ответственную за преобразование электрической энергии в энергию волны, и воздействие на объекты были рассмотрены в ряде публикаций [4–6, 7]. Так, в работе [3] сделан вывод, что внешнее гидростатическое давление в диапазоне до 50 МПа не оказывает существенного влияния на мощность, развиваемую в канале разряда (значения лежат в пределах статистического разброса экспериментальных данных).

В экспериментальной работе [4] показано, что площадь трещинообразования в образцах из оргстекла уменьшается с повышением гидростатического давления от 0,1 до 20 МПа в 3,3 раза (от 280 до 85 см²), а в работе [5] пришли к выводу, что повышение гидростатического давления от 0,1 до 25 МПа приводит к уменьшению величины прогиба мембранных датчиков в 3 раза (от 1,8 до 0,6 мм).

На основании результатов этих двух работ можно заключить, что с повышением гидроста-

тического давления уменьшается работа, совершаемая волной давления, источником которой является электрический разряд в жидкости, и соответственно в какой-то степени уменьшаются ее амплитуда, удельный импульс и плотность потока энергии. Однако эти методики не позволяют дать оценку изменению удельного импульса и плотности потока энергии.

Исследования изменения удельного импульса волны давления при повышении гидростатического давления проводились в работе [6]. Их результаты показали, что при увеличении гидростатического давления от 0,1 до 50 МПа происходит уменьшение удельного импульса в 2,5 раза (от 2000 до 800 Па·с).

В работе [7] рассматривалось влияние гидростатического давления, изменяющегося в интервале от 0,1 до 20 МПа, на амплитуду волны давления электрического разряда в различных средах. Проведенные экспериментальные исследования показали незначительное снижение амплитуды волны давления с ростом гидростатического давления в водном электролите (см. рис. 1, кривая 2).

Согласно анализу изложенных результатов гидростатическое давление несущественно влияет на скорость выделения энергии в канале разряда. В то же время оно приводит к уменьшению амплитуды волны давления [7], снижению эффективности воздействия на объекты обработки [4, 5] и уменьшению удельного импульса волны давления [6]. Такое разнообразие результатов и используемых экспериментальных методик не позволяет получить полную картину влияния гидростатического давления на параметры волны давления, генерируемой электрическим разрядом в жидкости.

В работе [8] представлены результаты экспериментальных исследований, свидетельствующи-

щие, что гидростатическое давление существенно влияет на стадию формирования разряда в жидкости (это несколько противоречит данным работы [3]). Так, с увеличением гидростатического давления растут затраты энергии импульсного накопителя на стадию формирования разряда (так называемые предпробивные потери), снижая долю энергии, которая вводится в канал разряда. Это, безусловно, приводит к снижению амплитуды волны давления. Поэтому авторами [8] делается вывод, что для проведения качественных исследований влияния гидростатического давления на динамику канала разряда и параметры волны давления важное значение имеет стабилизирование параметров разряда.

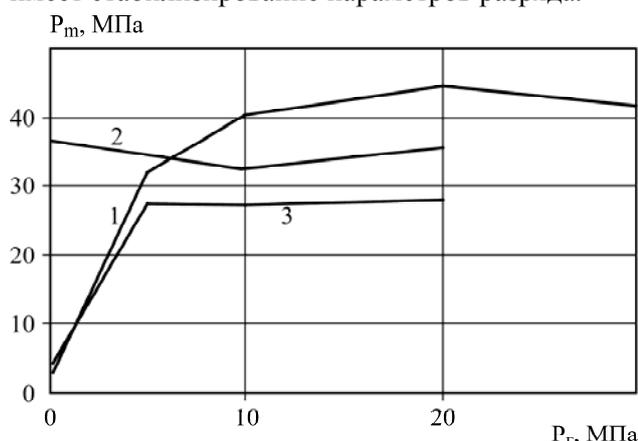


Рис. 1. Зависимость амплитуды давления от гидростатического давления при электроразряде в различных средах [7]: 1 – водонефтяная эмульсия + поверхностно-активное вещество (НМК-21); 2 – водный электролит, $\sigma_0 = 0,1 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$; 3 – 0,3% водный раствор НМК-21.

В связи с этим цель данной работы – на основе единой методики, обеспечивающей стабилизирование параметров разряда, исследовать влияние гидростатического давления на амплитуду волны давления, удельный импульс и плотность энергии волны давления при электрическом разряде в жидкости.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Методика экспериментальных исследований

Для исследования влияния гидростатического давления на параметры волны давления, генерируемой электрическим разрядом в жидкости, использовалась экспериментальная методика, описанная в [9], в которой измерялся временной профиль волны давления на внутренней стенке разрядной камеры высокого давления с помощью волноводного датчика на расстоянии 0,06 м от канала разряда перпендикулярно его оси.

Согласно этой методике по осциллограммам волны давления $P(t)$ определялась ее амплитуда P_m , рассчитывались удельный импульс

$$J = \int_0^t P(t) dt \quad (1)$$

и плотность потока энергии [10]:

$$W = \frac{1}{\rho c} \int_0^t P^2(t) dt, \quad (2)$$

где ρ – плотность жидкости; c – скорость звука в жидкости.

Нижний предел интегрирования ($t = 0$) в формулах (1) и (2) совпадал с началом действия волны давления $P(t)$ на внутреннюю поверхность трубы. Верхний предел интегрирования определялся длительностью первой фазы расширения трубы под действием давления $P(t)$, когда она передает это давление окружающей ее среде, то есть временем динамического контакта τ_k трубы с окружающей средой. Интегрирование по формулам (1) и (2) выполнялось на ПЭВМ.

Экспериментальные исследования были выполнены при следующих параметрах установки: зарядное напряжение $U_0 = 20 \text{ кВ}$, емкость конденсаторной батареи $C = 0,25 \text{ мкФ}$, индуктивность разрядной цепи $L = 4,5 \text{ мкГн}$.

Для стабилизации разряда в соответствии с рекомендациями [11] производилось его инициирование медным микропроводником длиной 46 мм. Подобные меры позволяют устранить нестабильность формирования канала разряда, стабилизировать его длину, устранить существование нескольких параллельных каналов (что характерно для «свободных», неиницируемых разрядов), стабилизировать гидродинамические параметры канала разряда и его расположение в пространстве относительно волноводного датчика.

Рабочей средой являлась дистиллированная вода с удельной электропроводностью порядка 10^{-3} См/м , что способствовало уменьшению стекания заряда с открытых поверхностей электродов, а также повышению стабильности экспериментальных данных. Эксперименты проводились при следующих уровнях гидростатического давления в камере, МПа: 0,1, 0,6, 1,8, 3,0, 12,0, 30,0. На каждом уровне гидростатического давления в камере выполняли по 10 опытов с последующей статистической обработкой [12].

Результаты исследований

Характерная осциллограмма профиля волны давления представлена на рис. 2.

На рис. 3 приведены результаты обработки данных. При этом использовались коэффициенты преобразования амплитуды импульсного давления k_p , удельного импульса k_j и плотности потока энергии k_w . Эти коэффициенты показывают изменение амплитуды волны давления, удельного импульса и плотности потока энергии на режимах с повышенным гидростатическим давлением относительно результатов, полученных на режиме при атмосферном давлении.

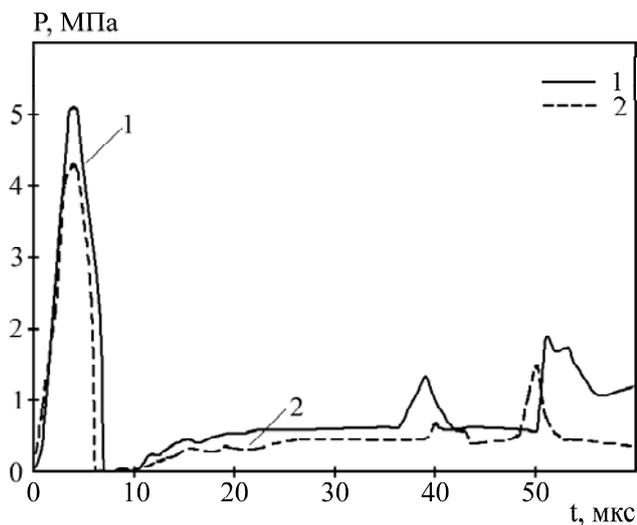


Рис. 2. Осциллограммы профиля волны давления: 1 – при гидростатическом давлении 0,1 МПа; 2 – при гидростатическом давлении 30 МПа.

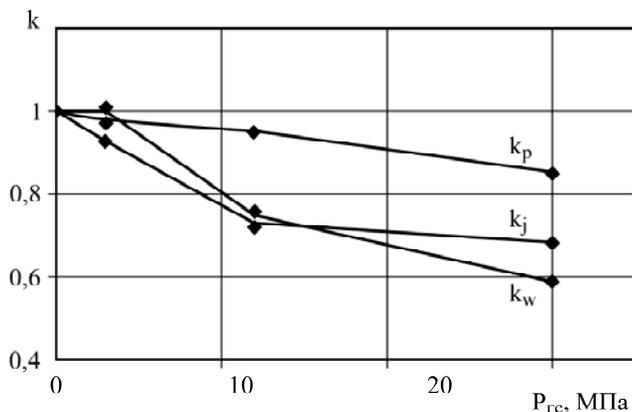


Рис. 3. Влияние гидростатического давления на параметры волны давления.

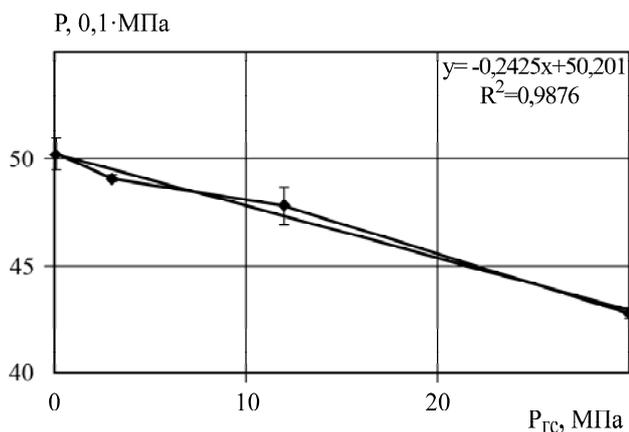


Рис. 4. Зависимость амплитуды волны давления от гидростатического давления.

На рис. 4 представлена зависимость амплитуды волны давления от гидростатического давления с пределами статистического разброса. Была выполнена линейная аппроксимация этой зависимости и определена величина коэффициента достоверности аппроксимации R^2 (уравнение зависимости и R^2 приведены на рис. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты эксперимента показали, что увеличение гидростатического давления приводит к уменьшению всех исследуемых параметров: амплитуды, удельного импульса и плотности энергии волны давления. Это согласуется с данными ранее проведенных исследований [4–6]. Уменьшение импульса и плотности потока энергии связано с изменением профиля волны давления. На изменение профиля в свою очередь оказывает влияние уменьшение амплитуды волны давления. При сравнении полученных данных по зависимости амплитуды волны давления от гидростатического давления с данными работы [7] следует отметить некоторые различия. Они, на наш взгляд, обусловлены использованием в настоящих экспериментах для инициирования разряда медного проводника, что значительно стабилизирует разряд и уменьшает пределы статистического разброса в отличие от работы [7], в которой эксперименты проводились при самопробое.

Попытаемся объяснить, чем вызвано уменьшение амплитуды волны давления. Для этого рассмотрим физическую картину происходящих процессов.

Так, известно, что в момент, предшествующий началу активной стадии выделения энергии в канале разряда, существует некоторый токопроводящий канал определенного поперечного сечения. Введение энергии, запасенной в емкостном накопителе, в этот канал повышает его внутреннюю энергию и приводит к увеличению поперечного сечения. Расширяющиеся стенки канала возбуждают в окружающей жидкости волны возмущения (акустические волны). Волна давления распространяется в окружающей среде со скоростью, большей скорости расширения канала. На рис. 5 представлена фотограмма расширения канала разряда.

При этом чем больше скорость расширения канала разряда, тем больше амплитуда волны давления. Скорость расширения канала разряда зависит от мощности, развиваемой в последнем, и от параметров окружающей среды. Экспериментальные данные [3] показывают, что внешнее гидростатическое давление в диапазоне до 50 МПа не оказывает существенного влияния на мощность, развиваемую в канале разряда, и в то же время повышенное давление влияет на скорость расширения канала (рис. 6): при гидростатическом давлении 0,1 МПа максимальная скорость расширения радиуса канала разряда (рассматривался начальный момент времени 2 мкс от начала пробоя) составляет 310,3 м/с, а при гидростатическом давлении 30 МПа – 263,2 м/с, то

есть скорость расширения уменьшилась на 15%. Это согласуется и с выводом работы [4].

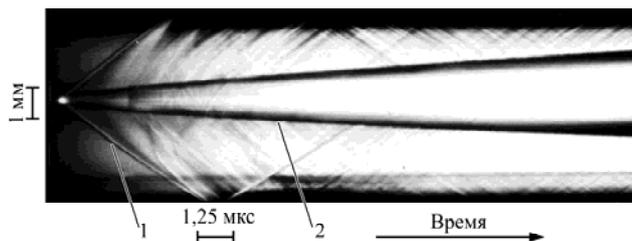


Рис. 5. Фотограмма расширения канала разряда (щелевая развертка): 1 – движение волны возмущения; 2 – движение стенки канала разряда.

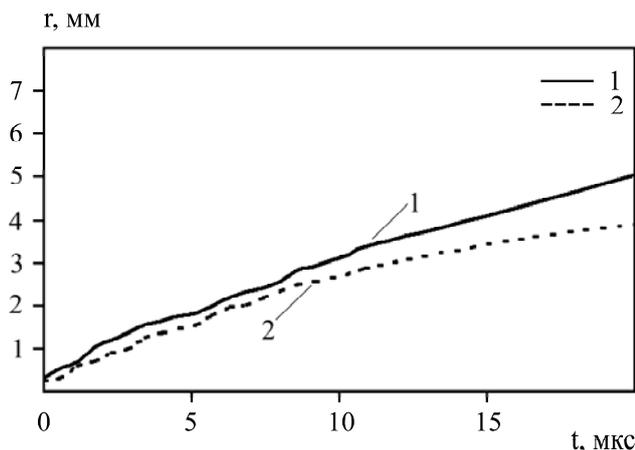


Рис. 6. Динамика расширения канала разряда: 1 – при гидростатическом давлении 0,1 МПа; 2 – при гидростатическом давлении 30 МПа.

Используя экспериментальные данные [3], проведем оценочный расчет величины уменьшения амплитуды волны давления с увеличением гидростатического давления.

Известно, что давление в жидкости можно определить по формуле [13]:

$$P = \rho cV, \quad (3)$$

где P – давление в жидкости, Па; ρ – плотность жидкости, кг/м^3 ; V – скорость движения жидкости, м/с; c – скорость распространения волны давления в жидкости (в данном случае – скорость звука), м/с.

Увеличение гидростатического давления приводит к изменению свойств жидкости. Определим, как изменяются эти свойства:

– для расчета изменения плотности воды использовалось уравнение состояния в форме Тэтта [14]. Расчеты показали, что при увеличении гидростатического давления от 0,1 до 30 МПа плотность воды увеличивается на 1,3%;

– для оценки изменения скорости звука воспользовались упрощенной формулой Лероя [15]. Расчеты показали, что увеличение гидростатического давления до 30 МПа приводит к увеличению скорости звука на 3,3% [14].

Используя соотношение (3), с учетом влияния гидростатического давления на скорость расши-

рения канала разряда и на физические параметры среды, видим, что повышение гидростатического давления до 30 МПа приводит к уменьшению амплитуды волны давления на 11,9%, что хорошо согласуется с данными, полученными в нашем эксперименте.

ВЫВОДЫ

- На основе единой методики было выполнено исследование влияния гидростатического давления на параметры волны давления, генерируемой электрическим разрядом в жидкости, при его инициировании взрывом микропроводника.

- Полученные результаты показали, что повышение гидростатического давления от 0,1 до 30 МПа приводит к уменьшению амплитуды волны давления на 15% и оказывает влияние на временной профиль волны давления, в результате чего плотность потока энергии уменьшается на 42%, а удельный импульс – на 32%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жекул В.Г., Кучернюк В.А., Мельхер Ю.И., Поклонов С.Г., Смирнов А.П., Швец И.С. Электро-разрядная обработка скважин на нефтедобывающих месторождениях Украины. *Вестник НТУ «ХПИ»: Тематический выпуск «Техника и электрофизика высоких напряжений»*. 2012, (21), 72–77.
2. Жекул В.Г., Поклонов С.Г., Швец И.С. Электро-разрядные погружные установки со стабилизированными рабочими параметрами. *Нефтяное хозяйство*. 2006, (2), 89–91.
3. Дубовенко К.В., Поклонов С.Г., Трофимова Л.П. Влияние гидростатического давления на канальную стадию электрического разряда в воде. *ЭОМ*. 1992, (1), 29–32.
4. Рябов В.П., Муха А.Г., Горовенко Г.Г., Малюшевский П.П. Особенности электрогидравлического эффекта при высоком давлении. *Разрядно-импульсная технология*. Киев: Наукова думка, 1978. 35–42.
5. Швец И.С., Цуркин В.Н., Поклонов С.Г., Трофимова Л.П. Механическое действие электровзрыва в водных электролитах при повышенных давлениях и температурах. *Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий*. К.: Наукова думка, 1993. Вып. 1, 49–53.
6. Ковязин Н.И., Ипполитов В.В., Уросов С.А., Сорокин В.Ф., Косенков В.М., Жекул В.Г., Поклонов С.Г., Трофимова Л.П. Методика определения и экспериментальное исследование удельного импульса, сообщаемого возмущениями от источника электроразрядного типа. *Известия вузов: Нефть и газ*. 2000, (1), 25–30.
7. Хвощан О.В., Сизоненко О.Н., Курашко Ю.И., Швец И.С. К выбору параметров генераторов импульсных токов установок погружного типа. *Вестник НТУ «ХПИ»: Тематический выпуск*

- «Техника и электрофизика высоких напряжений». 2005, (49), 111–119.
8. Жекул В.Г., Поклонов С.Г., Трофимова Л.П., Швец И.С. Оптимизация электрического разряда в скважинных жидкостях применительно к обработке нефтяных скважин. *ЭОМ*. 2002, (6), 75–80.
 9. Poklonov S.G., Zhekul V.G., 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. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2007, **43**(5), 350–353.
 10. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. *Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде*. Киев: Наукова думка, 1979. 208 с.
 11. Кривицкий Е.В. *Динамика электровзрыва в жидкости*. Киев: Наукова думка, 1986. 208 с.
 12. Зайдель А.Н. *Погрешности измерений физических величин*. Л.: Наука, 1985. 112 с.
 13. Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа*. М.: Наука, 1987. 840 с.
 14. Муха Ю.П., Суркаев А.Л. Исследование эффекта нелинейности взаимодействующих ударно-акустических волн давления. *ПЖТФ*. 2002, **28**(15), 43–47.
 15. Урик Р. *Основы гидроакустики*. Л.: Судостроение, 1978. 448 с.

Поступила 20.11.12

После доработки 03.09.13

Summary

This study reveals the results of the experimental investigation of the influence of the hydrostatic pressure on pressure wave parameters during an electric discharge in fluid. It is shown that a higher hydrostatic pressure provokes a shorter amplitude of the pressure wave and a change of its time profile.

Keywords: hydrostatic pressure, electric discharge, pressure wave amplitude, electrodischarge method for well demudding.