

## Измерения характеристик электрического разряда в растворе NaCl

© В.Е. Аблесимов,<sup>1</sup> В.М. Карюк,<sup>1</sup> А.Н. Павлов,<sup>1</sup> А.А. Кирпичев,<sup>2</sup> А.А. Симчук<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ЗАО „Объединение БИНАР“,  
607189 Саров, Нижегородская область, Россия

<sup>2</sup> ООО „ГлобалТест“,  
607189 Саров, Нижегородская область, Россия  
e-mail: ablesimov\_v@mail.ru

(Поступило в Редакцию 13 февраля 2013 г. В окончательной редакции 9 июля 2014 г.)

Исследованы характеристики электрического разряда в растворе NaCl с удельной концентрацией до  $\sim 1.7\%$  (электропроводностью до  $0.032 \text{ Sm/cm}$ ). Разряд создан с помощью электроразрядного аппарата ЭРА-1 в емкости, заполненной водой или раствором NaCl. Получены зависимости от концентрации электролита максимального тока разряда, импульса давления и амплитуды давления на фронте ударной волны на расстоянии  $7 \text{ cm}$  от оси разряда.

Электрогидравлический эффект (ЭГЭ) — способ преобразования электрической энергии в механическую без посредства промежуточных звеньев — характеризуется большими концентрациями энергии, близкими к возникающим при взрывах ВВ. Суть способа состоит в осуществлении внутри объема жидкости специально сформированного импульсного электрического разряда. При этом вокруг зоны разряда возникают высокие гидравлические давления, используемые для совершения полезной механической работы. Разряд также сопровождается комплексом физических и химических явлений. Длительность импульса разрядного тока составляет несколько микросекунд.

Несмотря на более чем полувековую историю применения в технологической практике ЭГЭ, сих пор в основном подробно исследован электрический разряд в воде [1,2].

При промышленном применении обычно используется техническая вода с удельной электропроводностью  $3 \cdot 10^{-4} - 10^{-3} \text{ Sm/cm}$ . Промышленному применению ЭГЭ, процессам электроимпульсной обработки материалов, разрядно-импульсным технологиям посвящено значительное количество исследований [3–8].

ЭГЭ в электролитах до сих пор исследован слабо, хотя имеет большое прикладное значение. Например, удельные электропроводности водцементных смесей буровых растворов доходит до  $0.01 - 0.1 \text{ Sm/cm}$ . Разряды в электролитах посвящено несколько работ [9–11], основные выводы из которых и библиография приводятся в [2].

Из результатов работ [9,10], в частности, следует, что характеристики разряда в электролитах не зависят от растворенного вещества и определяются лишь его низковольтной электропроводностью.

В настоящей работе исследованы характеристики электрического разряда в воде и растворе NaCl с удельной электропроводностью от  $2.5 \cdot 10^{-4} \text{ Sm/cm}$  (вода) до  $3.2 \cdot 10^{-2} \text{ Sm/cm}$ . Электропроводность измерялась серийным кондуктометром. Разряд создавался с помощью

погружного электроразрядного аппарата ЭРА-1 [12] в емкости, заполненной водой или раствором NaCl с концентрацией до  $\sim 1.7\%$ .

Характеристики проведения испытаний:

- емкость накопительного конденсатора аппарата ЭРА-1  $C = 2 \mu\text{F}$ ,
- напряжение срабатывания коммутатора  $\sim 30 \text{ kV}$ ,
- энергозапас около  $900 \text{ J}$ ,
- геометрия электродов — катод и анод конической формы  $60^\circ$  с диаметром основания  $46 \text{ mm}$ ,
- поверхность анода вплоть до вершины конуса покрыта изолятором,
- рабочая емкость для растворов — нержавеющий бак емкостью  $40 \text{ l}$ .

Для измерения параметров ударной волны (УВ) электрического разряда были применены пьезоэлектрические датчики давления PS02-01 [13,14]. Для каждого значения электропроводности раствора измеряемые величины усреднялись по серии не менее 5 импульсов. Датчики давления размещались диаметрально противоположно от разрядного промежутка на расстоянии  $7 \text{ cm}$  от оси разряда. Напряжение на разрядном промежутке контролировалось с помощью емкостного делителя, ток разряда — поясом Роговского с чувствительностью  $1.4 \text{ kA/V}$ . Напряжение, ток разряда и сигналы датчиков давления регистрировались цифровым осциллографом.

Исследование фоновых условий измерений показало наличие электромагнитной наводки (ЭМН) на измерительный канал датчика давления в момент пробоя разрядного промежутка. Величина наводки становится пренебрежимо малой через несколько микросекунд после разряда и не влияет на измерения импульса давления.

В теории удара в качестве меры механического взаимодействия тел при ударе вместо самой ударной силы  $F$  вводится ее импульс за время удара  $\tau$ . Величина импульса  $S = F_{\text{av}}\tau$ , где  $F_{\text{av}}$  — среднее значение ударной силы за время  $\tau$ , равна изменению количества движения  $\Delta(mv)$  тела, подвергающегося удару. В проведенных исследованиях в качестве меры механического эффекта

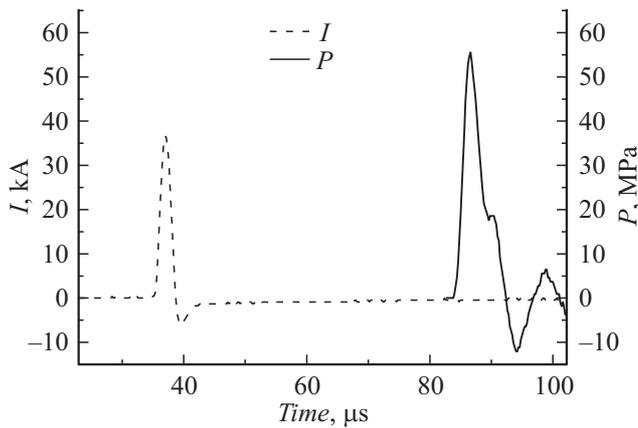


Рис. 1. Зависимости от времени тока  $I$  и давления  $P$ .

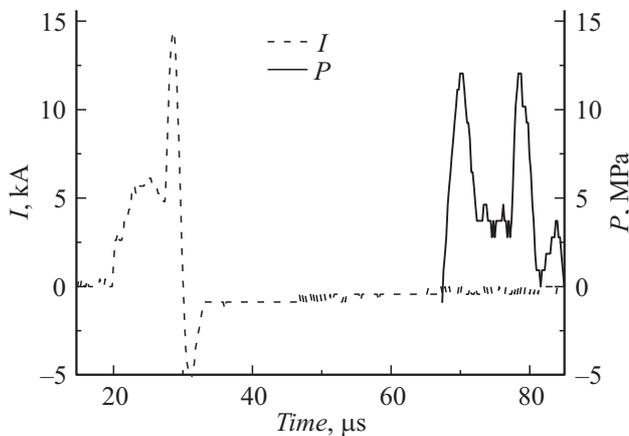


Рис. 2. Зависимости от времени тока  $I$  и давления  $P$ .

при разряде рассматривался импульс давления. Приведенные ниже значения импульса давления определялись интегрированием сигнала датчика давления по интервалу времени  $\sim 20 \mu\text{s}$ .

Предварительно были проведены измерения давления на фронте УВ при разряде в воде (электропроводность  $2.5 \cdot 10^{-4} \text{ Sm/cm}$ ) при величине разрядного промежутка  $15 \text{ mm}$  [14]. Осциллограмма сигналов для одного из разрядов приведена на рис. 1.

Форма импульса разрядного тока — аperiodическая, максимальное значение тока  $I_{\text{max}} = 37 \text{ kA}$ , амплитуда давления  $p$  на фронте УВ  $P = 55 \text{ MPa}$ , ударный импульс  $S = 2.1 \cdot 10^{-4} \text{ MPa} \cdot \text{s}$ .

Расчетная оценка, выполненная в соответствии с работой [2], дает для амплитуды давления в волне сжатия на расстоянии  $r = 7 \text{ cm}$  от оси разряда значение  $67 \text{ MPa}$ .

Результаты измерений в 5 разрядах, усредненные по 2 датчикам, показали, что для двух датчиков давления, расположенных диаметрально противоположно на расстоянии  $70 \text{ mm}$  от оси разрядного промежутка, среднее время прихода УВ и среднее значение давления на фронте УВ остаются практически постоянными —

$46\text{--}48 \mu\text{s}$  и  $65.5 \pm 5 \text{ MPa}$ . Измеренное значение давления хорошо согласуется с расчетной оценкой, средняя скорость ударной волны  $1.47 \cdot 10^3 \text{ m/s}$  близка к скорости звука в воде.

При величине разрядного промежутка  $8 \text{ mm}$  были проведены измерения характеристик разряда в воде и растворе NaCl с удельной электропроводностью от  $2.5 \cdot 10^{-4} \text{ Sm/cm}$  (вода) до  $3.2 \cdot 10^{-2} \text{ Sm/cm}$ . Осциллограмма сигналов для значения проводимости электролита  $3.2 \cdot 10^{-2} \text{ Sm/cm}$  (концентрация 1.7% по NaCl) приведена на рис. 2.

Форма импульса — аperiodическая,  $I_{\text{max}} = 14 \text{ kA}$ , амплитуда давления на фронте УВ  $P = 12.2 \text{ MPa}$ , импульс давления  $S = 0.87 \cdot 10^{-4} \text{ MPa} \cdot \text{s}$ .

На предпробной стадии за время  $\sim 10 \mu\text{s}$  выделяется существенная доля энергии разряда, достаточная, чтобы сформировать в среде ударную волну. В момент окончательного формирования разряда между электродами (замыкания канала) образуется вторая ударная волна. Амплитуды той и другой волн сравнимы и составляют  $10\text{--}15 \text{ MPa}$ . Интервал между их фронтами примерно  $10 \mu\text{s}$ . Импульс давления определяется их суммарным воздействием. Средняя скорость ударной волны  $1.45 \cdot 10^3 \text{ m/s}$  близка к скорости звука в воде.

Аналогичные измерения были проведены для значений удельной проводимости от  $2.5 \cdot 10^{-4} \text{ Sm/cm}$  (вода) до  $1 \cdot 10^{-2} \text{ Sm/cm}$ . По результатам измерений были получены зависимости от концентрации электролита максимального тока разряда, импульса и амплитуды давления на фронте ударной волны на расстоянии  $7 \text{ cm}$  от оси разряда.

Зависимость максимального тока разряда  $I_{\text{av}}$  для разрядного промежутка длиной  $8 \text{ mm}$  от удельной проводимости электролита приведена на рис. 3. До значения удельной проводимости  $1 \cdot 10^{-2} \text{ Sm/cm}$  разрядный ток практически не меняется, но для значения  $3.2 \cdot 10^{-2} \text{ Sm/cm}$  уменьшается почти в 3.5 раза.

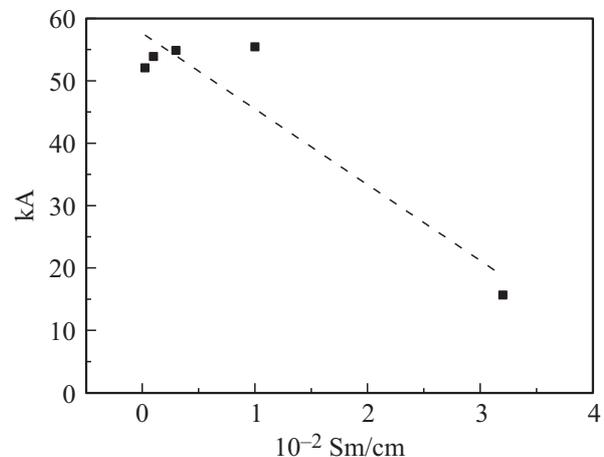
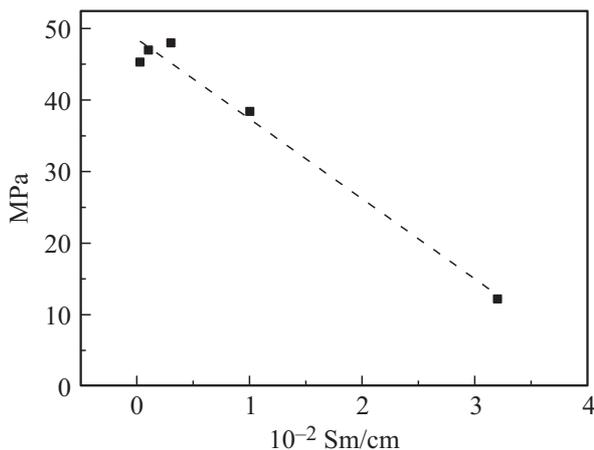
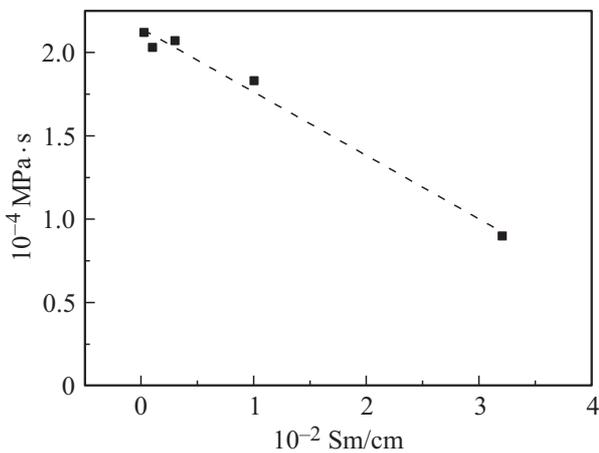


Рис. 3. Зависимость максимального тока разряда  $I_{\text{av}}$  (усреднение по 5 импульсам) от удельной проводимости электролита (пунктир — линейное приближение).



**Рис. 4.** Зависимость амплитуды давления на фронте УВ от удельной проводимости электролита (пунктир — линейное приближение).



**Рис. 5.** Зависимость импульса давления  $S$  от удельной проводимости электролита (пунктир — линейное приближение).

Результаты измерений механических характеристик разряда приведены на рис. 4 и 5. На рис. 4 представлена зависимость амплитуды давления на фронте УВ на расстоянии 7 см от оси разрядного промежутка длиной 8 мм от значения удельной электропроводности электролита.

Амплитуда давления для значения удельной проводимости  $3.2 \cdot 10^{-2}$  См/см уменьшается примерно в 4 раза по сравнению с соответствующей величиной для воды.

На рис. 5 приведена зависимость импульса давления  $S$  на расстоянии 7 см от оси разрядного промежутка длиной 8 мм от значения удельной проводимости электролита.

Величина импульса давления слабо уменьшается в исследованном диапазоне — примерно в 2 раза при возрастании удельной проводимости примерно в 100 раз.

В целом измеренные характеристики разряда уменьшаются с ростом удельной проводимости, однако в раз-

ной степени в зависимости от различного физического содержания.

Распространение полученных результатов на другие значения расстояний  $r$  от оси разряда, энергии конденсаторной батареи, величины разрядного промежутка не представляет затруднений.

## Список литературы

- [1] Юткин Л.А. // Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, 1986. 253 с.
- [2] Наугольных К.А., Рой Н.А. // Электрические разряды в воде. М.: Наука, 1971. 155 с.
- [3] Электрический разряд в жидкости и его применение / Под ред. Г.А. Гулый. Киев: Наукова думка, 1977. 174 с.
- [4] Разрядно-импульсная технология / Под ред. Г.А. Гулый. Киев: Наукова думка, 1978. 156 с.
- [5] Чачин В.Н., Богоявленский К.Н., Вагин В.А. и др. Электрогидроимпульсная обработка материалов в машиностроении. Минск: Наука и техника, 1987. 231 с.
- [6] Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. Киев: Наукова думка, 1990. 208 с.
- [7] Косенков В.М. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 10. С. 133–139.
- [8] Автореф. канд. дис. Юшков А.Ю. Исследование формирования набивных свай импульсными разрядами. 2004. Томск.
- [9] Мельников Н.П., Остроумов Г.А., Штейнберг А.А. // ДАН СССР. 1962. Т. 147. № 4. С. 822–825.
- [10] Мельников Н.П., Остроумов Г.А., Стояк М.Ю. // ДАН СССР. 1963. Т. 148. № 5. С. 1057–1059.
- [11] Мельников Н.П., Остроумов Г.А., Стояк М.Ю. // ЖТФ. 1964. Т. 34. Вып. 4. С. 949–951.
- [12] A.Ya. Kartelev et al. // Conf. on High-Power Particle Beams. Nagaoka, Japan, June. 2000. Vol. II. P. 950–955.
- [13] Глобалтест. Электронный ресурс. Режим доступа: [http://globaltest.ru/page/dat\\_davl\\_ps02/](http://globaltest.ru/page/dat_davl_ps02/)
- [14] Аблесимов В.Е., Павлов А.Н., Симчук А.А., Карюк В.М. // Сборник трудов Международной научно-технической конференции „Динамика и виброакустика машин“. Самара. 2012. Т. 2. С. 266–267.