

Экспериментальное исследование волн давления при электрическом взрыве проводника в условиях повышенного гидростатического давления

* 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*

Поступила 19.07.2018

После доработки 13.09.2018

Принята к публикации 14.09.2018

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния гидростатического давления, зарядного напряжения, запасенной энергии разряда и диаметра проводника на амплитуду волны давления при электрическом взрыве проводника в воде. Показано, что наблюдаются рост амплитуды генерированной в жидкости волны давления с увеличением величины запасенной энергии и зарядного напряжения и наличие оптимума по диаметру проводника, который обеспечивает максимальную амплитуду волны давления. При повышении гидростатического давления наблюдалось уменьшение амплитуды генерированной волны давления для «тонкого» иницирующего проводника (в работе диаметром 0,14 мм) и отсутствие влияния для «толстого» проводника (диаметром 0,5 мм и больше). Также отмечена необходимость обеспечения при электрическом взрыве проводника в жидкости хорошего жесткого контакта между электродами электродной системы и металлическим проводником, иначе происходит потеря эффективности механического воздействия за счет уменьшения амплитуды волны давления.

Ключевые слова: электрический взрыв проводника, амплитуда волны давления, гидростатическое давление, зарядное напряжение, запасенная энергия разряда.

УДК 537.528

DOI: 10.5281/zenodo.1968903

ВВЕДЕНИЕ

Электрический разряд в жидкости используется в различных сферах человеческой деятельности. Ярким примером может служить его эффективное применение в нефтедобывающей и металлургической промышленности, машиностроении [1]. Одновременно с этим постоянно проводятся работы, направленные на повышение эффективности и расширение границ практического использования электрического разряда в жидкости. Одним из перспективных направлений дальнейшего совершенствования электроразрядных технологий является использование электрического взрыва металлического проводника [2–4].

Как известно, одним из основных действующих факторов электроразрядного воздействия на объект является создаваемая электрическим взрывом в жидкости волна давления [5]. Электрический взрыв проводника (ЭВП) позволяет повысить амплитудные значения генерируемой волны давления, стабилизировать ее параметры, что позитивно сказывается на эффективности электроразрядных технологий [2].

Множество сфер использования электрического разряда в жидкости приводит к разнооб-

разию условий применения электроразрядных технологий и параметров разрядного контура. Все это сказывается и на характеристиках волны давления, которая генерируется ЭВП. Поэтому не вызывает удивления факт наличия большого количества работ по изучению параметров волны давления при ЭВП [6–8].

Так, в работе [6] выполнено исследование влияния электропроводности рабочей жидкости на амплитуду волны давления при электрическом взрыве медного проводника. Отмечено падение амплитуды при повышении электропроводности жидкости. Авторами также было отмечено, что повышение зарядного напряжения от 3 до 4,8 кВ приводит к росту амплитудного значения волны давления.

В работе [9] с помощью крешерных датчиков давления было выполнено исследование возможности использования ЭВП для испытания на прочность различных (например, сварных) конструкций, пробивания отверстий в прочных материалах, создания ударных нагрузок, разработки специальной медицинской техники. Попутно отмечалось, что для каждого режима ЭВП существует определенный диаметр проводника, которому соответствует максимальная амплитуда генерированной волны давления, а

для фиксированных параметров проводника повышение запасенной энергии разряда приводит к росту амплитудного значения волны давления. Подобные исследования по влиянию запасенной энергии и диаметра проводника на амплитуду волны давления были выполнены авторами работы [10]. В ней отмечалось увеличение амплитуды волны давления с ростом запасенной энергии. Авторами это связывалось с тем, что при повышении запасенной энергии происходит более полное испарение металлического проводника при его взрыве, в результате чего повышается амплитуда генерированной волны давления. В то же время в работе [11] не отмечается тесной взаимосвязи между запасенной энергией разряда и амплитудой волны давления.

В работе [12] отмечается, что на генерированную волну давления влияет режим (тип) разряда при ЭВП, который может быть определен по осциллограмме разрядного тока и зависит от характеристик взрывающегося проводника и параметров разрядного контура. В экспериментальной работе [13] авторы реализовывали различные режимы взрыва металлического проводника путем изменения его диаметра и исследовали влияние этих изменений на форму и параметры генерированной волны давления. При этом было отмечено, что максимальная амплитуда волны давления наблюдается на режимах, когда испарение (взрыв) металлического проводника происходит вблизи максимума тока.

Несмотря на большое количество работ по изучению волны давления при ЭВП, отсутствуют результаты исследований, которые проводились бы при повышенном гидростатическом давлении. В то же время некоторые перспективные электроразрядные технологии (например, электроразрядный способ декольматации скважин [14]) применяются в условиях повышенного гидростатического давления. В связи с этим цель данной работы – исследование волн давления при ЭВП при повышенном гидростатическом давлении, что представляет научный и практический интерес.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ ПРИ ЭВП

При проведении исследований использовался экспериментальный стенд, который состоит из трех частей: энергетической, технологической и измерительной [2].

Энергетическая часть стенда включает оборудование для осуществления высоковольтного электрического разряда: с помощью регулируемого трансформатора через выпрямитель-трансформатор и зарядное сопротивление заря-

жалась батарея импульсных конденсаторов до необходимого значения высоковольтного напряжения. Затем с помощью блока поджига осуществлялась коммутация воздушного разрядника, что приводило к подаче по коаксиальному высоковольтному кабелю импульса высокого напряжения на электродную систему.

Основу технологической части (рис. 1а) составляет разрядная камера высокого давления (1) диаметром 0,164 м (рис. 1б), в которой осуществляется электрический разряд. В технологическую часть также входит оборудование для обеспечения в разрядной камере необходимого повышенного гидростатического давления и его контроля – насос высокого давления с электроприводом (6) и манометр (7).

В разрядной камере высокого давления (1) закреплялась электродная система (2). Ее электроды замыкались металлическим проводником (4). С помощью насоса высокого давления (6) в разрядной камере создавалось необходимое гидростатическое давление. В результате подачи по импульсу высокого напряжения на электродную систему (2) между электродами (3) происходил ЭВП (4). Давление, вызванное ЭВП в жидкости, измерялось с помощью датчика давления (5), который передавал сигнал на цифровой запоминающий осциллограф. По окончании эксперимента гидростатическое давление в камере сбрасывалось с помощью системы сброса давления (8).

Измерительная часть стенда фиксирует протекание электрических и гидродинамических процессов, сопровождающих ЭВП в воде. Для регистрации электрических характеристик (напряжение на разрядном промежутке и разрядный ток) использовались емкостной делитель напряжения и омический коаксиальный шунт. Их калибровка выполнялась согласно методике, предложенной в [15]. Измерение генерированных при ЭВП волн давления осуществлялось пьезоэлектрическим волноводным датчиком для измерения импульсного давления типа ДТХ-1, разработанным в Институте импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины (г. Николаев) [16], который крепился на стенке камеры высокого давления. Схема крепления представлена на рис. 2. В ходе экспериментальных исследований использовалось несколько датчиков ДТХ-1, каждый из которых обладал собственной чувствительностью.

Измерительные датчики подключались к регистрирующей аппаратуре (четырёхканальный осциллограф Tektronix TDS 2024B), с помощью которой осуществлялось осциллографирование напряжения на разрядном промежутке, разряд-

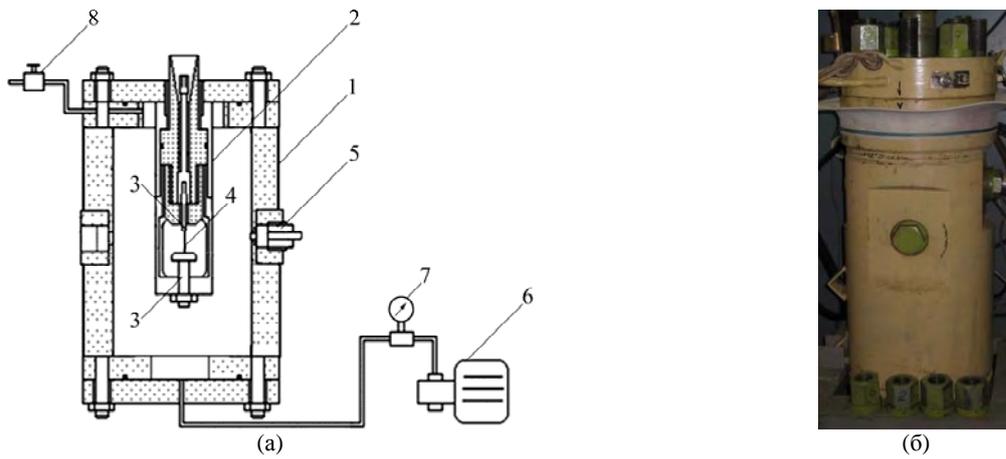
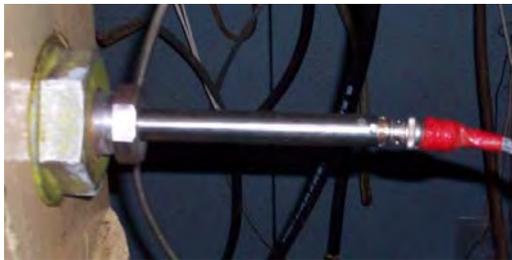
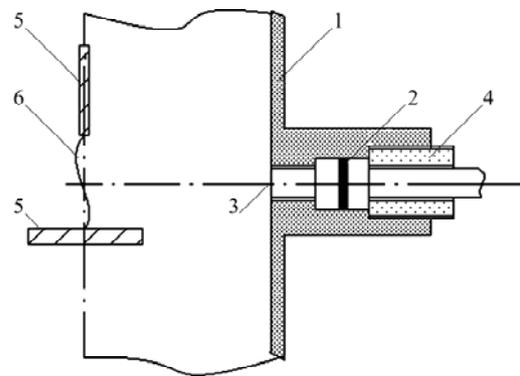


Рис. 1. Принципиальная схема технологической части испытательного стенда (а): 1 – камера высокого давления; 2 – коаксиальная электродная система; 3 – электроды; 4 – металлический проводник; 5 – датчик импульсного давления; 6 – насос высокого давления; 7 – манометр; 8 – система сброса давления; общий вид разрядной камеры высокого давления (б).



(а)



(б)

Рис. 2. Крепление датчика импульсного давления на корпусе разрядной камеры: внешний вид (а); схема крепления (б): 1 – корпус разрядной камеры; 2 – уплотнительное резиновое кольцо; 3 – доньшко датчика; 4 – прижимная гайка; 5 – электроды; 6 – канал электрического разряда.

ного тока и временного профиля волны давления.

Предварительно проведенные экспериментальные исследования показали, что на амплитуду генерированной ЭВП волны давления оказывает влияние степень начального прижима проводника к электродам электродной системы. На рис. 3 приведены осциллограммы для жесткого контакта между проводником и электродами, когда контакт обеспечивался пружинным прижимом (рис. 3а), и для отсутствия жесткого контакта (рис. 3б).

Анализ данных, приведенных на рис. 3, показывает, что в случае отсутствия жесткого контакта проводника и электрода происходит падение эффективности воздействия, которое выражается в уменьшении амплитуды волны давления на 35%. Это связано с тем, что при плохом контакте первоначально часть энергии затрачивается на пробой зазора между электродом и проводником (полка напряжения на рис. 3б), после чего уже осуществляется электрический взрыв проводника. Соответственно для получения максимальной эффективности воздействия при электрическом взрыве

проводника необходимо обеспечить его хороший контакт с электродами электродной системы.

В ходе проведения экспериментальных исследований крепление проводника в электродной системе осуществлялось с помощью подпружиненного контакта, что обеспечивало его натяжение и жесткий контакт с электродами электродной системы.

В работе исследовалось влияние на характеристики волны давления величин гидростатического давления рабочей жидкости, зарядного напряжения и запасенной энергии, которые принимали следующие значения:

- гидростатическое давление 0,1 МПа; 10 МПа; 20 МПа;
- зарядное напряжение 3 кВ; 7,5 кВ; 10 кВ;
- запасенная энергия ≈ 1 кДж; ≈ 2 кДж; ≈ 3 кДж; ≈ 4 кДж; ≈ 5 кДж.

Как известно, режим ЭВП и вклад факторов, определяющих формирование волны давления, зависит от диаметра проводника [5, 13]. При этом по основным факторам, формирующим волну давления, их можно разбить на две основные группы: взрыв «тонкого» инициирующего проводника (волна давления в основном форми-

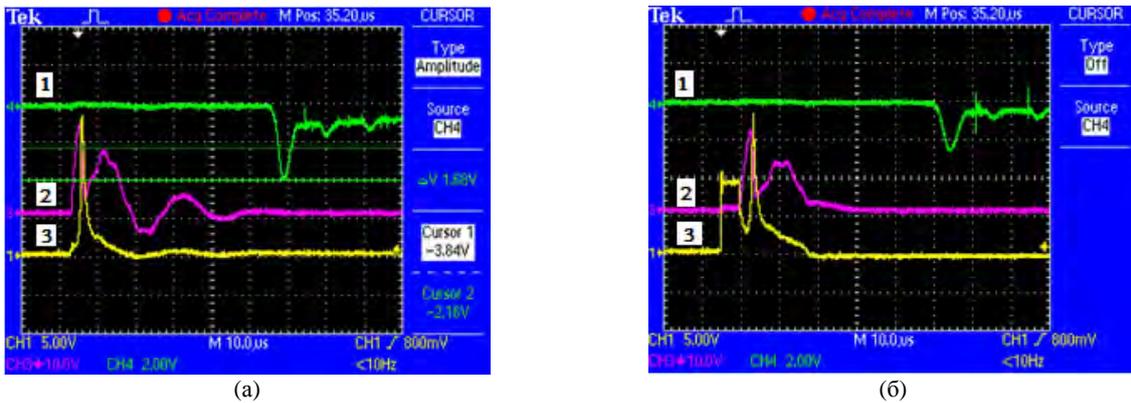


Рис. 3. Влияние степени контакта проводника и электродов электродной системы на временной профиль волны давления (1), ток в канале разряда (2) и напряжение на разрядном промежутке (3) при ЭВП: зарядное напряжение – 15 кВ; емкость конденсаторной батареи – 2,26 мкФ; индуктивность разрядной цепи – 4,288 мкГн; медный проводник диаметром 0,14 мм и длиной 50 мм; гидростатическое давление – 10 МПа.

руется за счет разряда в парах испарившегося металла, и взрыв проводника практически не изменяет форму разрядного тока) и взрыв «толстого» проводника (волна давления в основном формируется за счет непосредственно взрыва проводника). В связи с этим в рамках данной работы выполнялись исследования на тонком медном инициирующем проводнике диаметром 0,14 мм, а также проводниках большего диаметра – медном и алюминиевом диаметром 0,5 мм и алюминиевом диаметром 1 мм.

При проведении экспериментальных исследований длина медного инициирующего проводника диаметром 0,14 мм была выбрана из условия оптимизации (1) генерированной волны давления по ее амплитудному значению [17]:

$$l_0 = 0,36(r^2 z W_0 / A)^{0,25}, \quad (1)$$

где r – расстояние от оси разряда до стенки разрядной камеры, м; $z = \sqrt{L/C}$ – волновое сопротивление контура; $W_0 = 0,5CU_0^2$ – энергия разряда, Дж; C – емкость конденсаторной батареи, Ф; L – индуктивность разрядного контура, Гн; U_0 – зарядное напряжение, В; A – искровая постоянная (для инициируемых проводником разрядов $A = 0,25 \cdot 10^5$ В с/м²) [17, 18].

При электрическом взрыве проводников большего диаметра подобная зависимость отсутствует. Поэтому для определения длины проводника использовалось выражение из условия, обеспечивающего максимальную скорость выделения энергии в разрядном промежутке, которое включает в себя два согласованных выражения для определения длины и диаметра проводника [5]. В данной работе диаметр проводника являлся постоянной величиной, поэтому использовалось только выражение для определения длины (2):

$$l_0 = 2 \cdot 10^{-3} U_0 \sqrt{LC}. \quad (2)$$

В силу технологических и конструктивных особенностей разрядной камеры, а также для обеспечения нормального падения волны давления на доньшко датчика было введено ограничение по максимальной длине металлического проводника – 50 мм.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе экспериментальных исследований были получены результаты, которые позволили изучить влияние внешних условий (гидростатического давления), параметров разрядной цепи (зарядного напряжения и запасенной энергии) и характеристик металлического проводника (материал и диаметр проводника) на амплитуду волны давления, генерированной при ЭВП в жидкости. Данные экспериментальных исследований приведены на рис. 4 и 5. На рис. 4а–в длина проводника, используемого в экспериментальных исследованиях, определялась по выражению (1) и лежала в диапазоне от 28 до 46 мм. На рис. 4г и 5а,г длина проводника была вычислена по выражению (2) и лежала в диапазоне от 34 до 50 мм. На рис. 4д,е и 5б,в,д,е расчетная длина проводника превышала 50 мм, и поэтому, как было отмечено ранее, была принята равной 50 мм.

Анализ полученных результатов показывает, что влияние величины гидростатического давления жидкости на амплитуду волны давления, генерированной ЭВП, зависит от диаметра взрывающегося проводника и соответственно реализующегося при этом типа разряда.

Взрыв тонкого инициирующего проводника диаметром 0,14 мм мало изменяет форму разрядного тока (типичная осциллограмма приведена на рис. 6а). Большая часть запасенной в конденсаторах энергии выделяется в канале, образо-

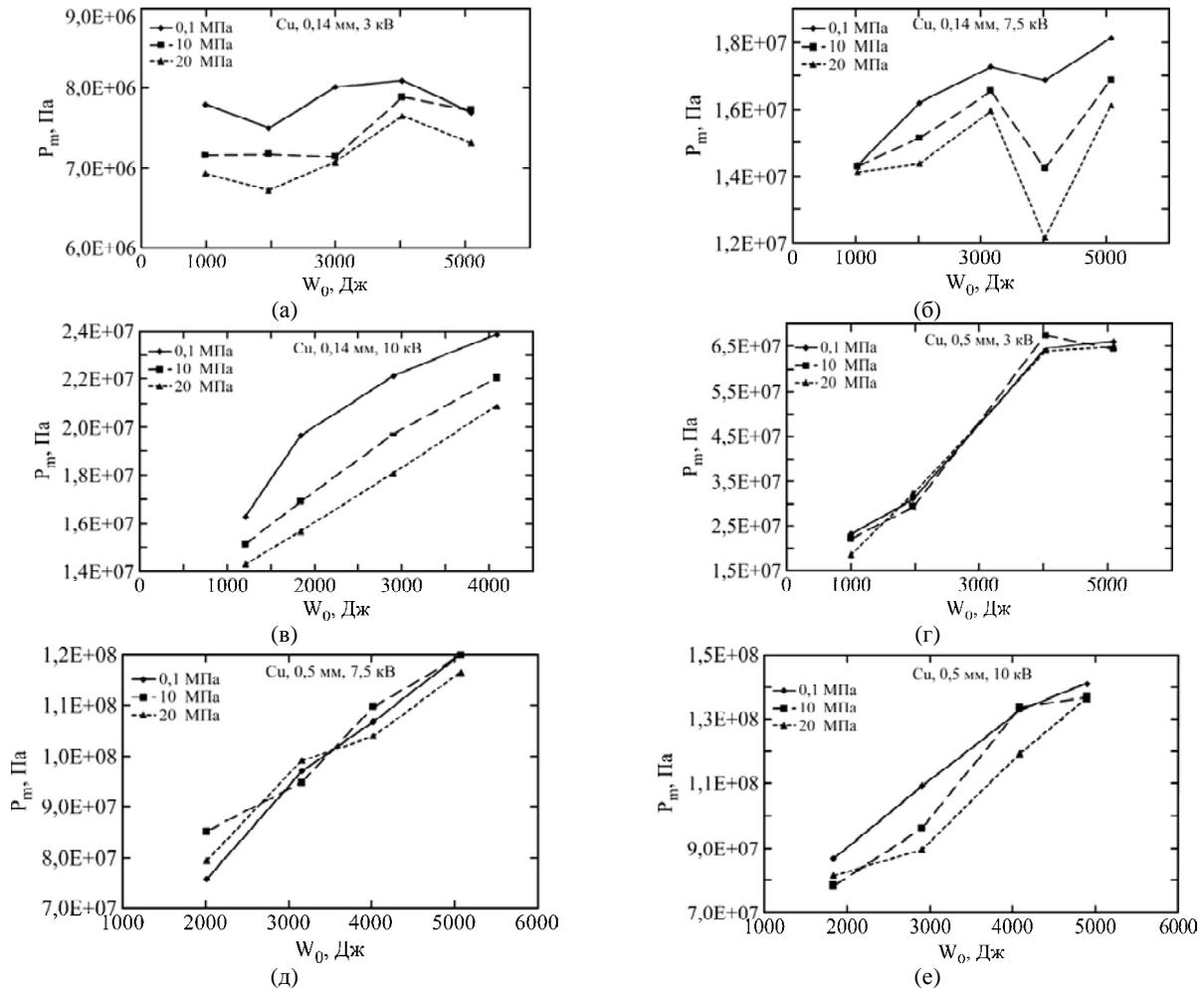


Рис. 4. Зависимости амплитуды волны давления, генерированной электрическим взрывом проводника, от запасенной энергии при различных значениях гидростатического давления: (а) – диаметр 0,14 мм, зарядное напряжение 3 кВ; (б) – диаметр 0,14 мм, зарядное напряжение 7,5 кВ; (в) – диаметр 0,14 мм, зарядное напряжение 10 кВ; (г) – диаметр 0,5 мм, зарядное напряжение 3 кВ; (д) – диаметр 0,5 мм, зарядное напряжение 7,5 кВ; (е) – диаметр 0,5 мм, зарядное напряжение 10 кВ.

ванном продуктами взрыва [5]. Волна давления формируется под действием двух факторов: непосредственно электрический взрыв (фазовое превращение) металлического проводника и последующий разряд в парах металла [13]. В этом случае наблюдается четкая тенденция уменьшения амплитуды генерированной волны давления при повышении величины гидростатического давления (рис. 4а–в).

Дальнейшее увеличение диаметра взрывающегося проводника (на рис. 6б приведена осциллограмма одного из режимов электрического взрыва медного проводника диаметром 0,5 мм) приводит к уменьшению роли разряда в парах металла в формировании волны давления [13]. Для электрического взрыва медного и алюминиевого проводников диаметром 0,5 мм можно отметить отсутствие влияния величины гидростатического давления на амплитуду волны давления, источником которой является ЭВП в жидкости (медный проводник – рис. 4г–д, алюминиевый проводник – рис. 5а–в). Отсутствие четкой тенденции влияния гидростати-

ческого давления на амплитуду волны давления наблюдается и для алюминиевого проводника диаметром 1 мм (рис. 5г–е).

Диаметр проводника оказывает влияние на амплитуду генерированной волны давления. Так, увеличение диаметра медного проводника от 0,14 до 0,5 мм приводит к значительному (в 2 раза и больше) росту амплитуды генерированной волны давления (рис. 4а и 4г, 4б и 4д, 4в и 4е). В то же время экспериментальные данные для электрического взрыва алюминиевого проводника показывают, что не всегда увеличение диаметра проводника сопровождается повышением амплитуды волны давления. Увеличение диаметра алюминиевого проводника от 0,5 до 1 мм при зарядных напряжениях 7,5 и 10 кВ и на большинстве режимов при зарядном напряжении 3 кВ (кроме режимов при гидростатическом давлении 10 и 20 МПа и запасенной энергии 5085 Дж) приводит к уменьшению амплитуды волны давления до $\approx 25\%$. Это хорошо согласуется с результатами работы [13]. В этой работе авторами отмечалось для конкрет-

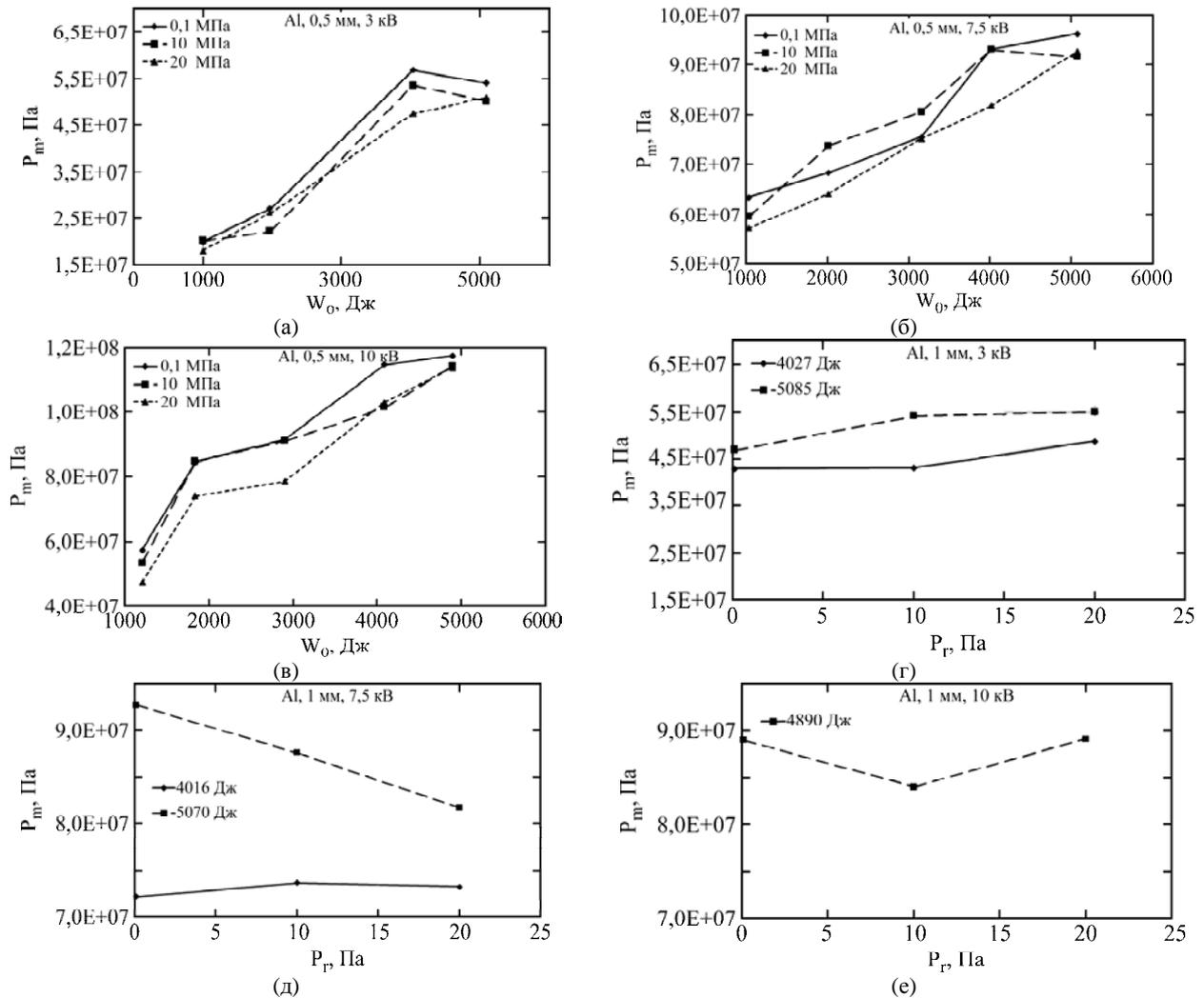


Рис. 5. Зависимости амплитуды волны давления, генерированной электрическим взрывом алюминиевого проводника диаметром 0,5 мм, от запасенной энергии при различных значениях гидростатического давления (а–в) и амплитуды волны давления, генерированной электрическим взрывом алюминиевого проводника диаметром 1 мм, от гидростатического давления при различных значениях запасенной энергии (г–е): (а) – зарядное напряжение 3 кВ; (б) – зарядное напряжение 7,5 кВ; (в) – зарядное напряжение 10 кВ; (г) – зарядное напряжение 3 кВ; (д) – зарядное напряжение 7,5 кВ; (е) – зарядное напряжение 10 кВ.

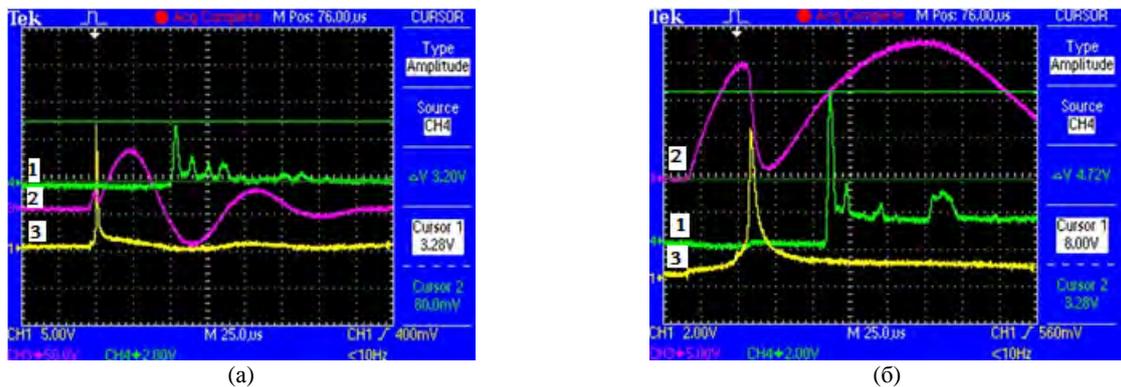


Рис. 6. Осциллограммы давления на стенке камеры высокого давления (1), тока в канале разряда (2) и напряжения на разрядном промежутке (3) при электрическом взрыве медного проводника: (а) – диаметр 0,14 мм, $l_0 = 36$ мм; $U_0 = 7,5$ кВ; $W_0 = 1$ кДж; гидростатическое давление 0,1 МПа; (б) – диаметр 0,5 мм, $l_0 = 50$ мм; $U_0 = 3$ кВ; $W_0 = 5$ кДж; гидростатическое давление 0,1 МПа.

ных параметров разрядного контура и проводника наличие оптимального значения диаметра металлического проводника, который обеспечивает максимальную амплитуду волны давления, соответственно превышение этого оптимального значения приводит к уменьшению амплитуды

генерированной волны давления. Скорее всего, это связано с тем, что при взрыве проводника, диаметр которого превышает оптимальную величину, большая часть энергии тратится на нагрев проводника, его плавление и нагрев в жидком состоянии (рис. 7б). При дальнейшем

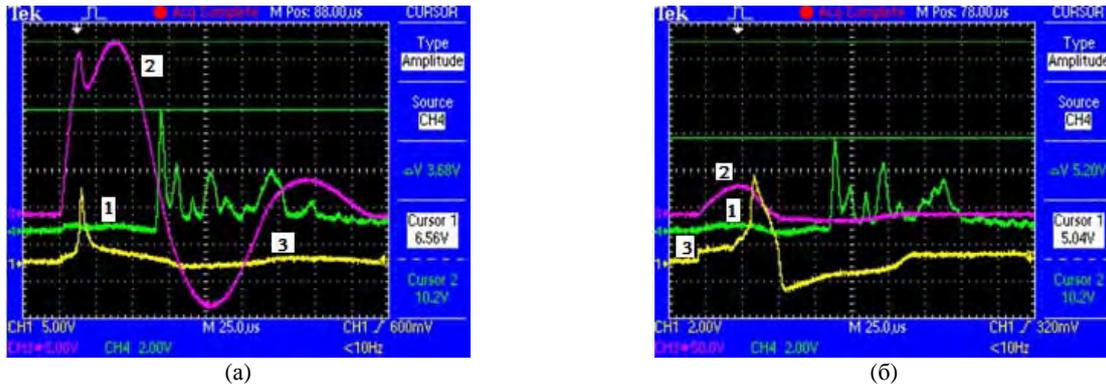


Рис. 7. Осциллограммы волны давления (1), разрядного тока (2), напряжения на разрядном промежутке (3) электрического взрыва алюминиевого проводника (зарядное напряжение 10 кВ, запасенная энергия 5 кДж, длина проводника 50 мм): (а) \varnothing 0,5 мм; (б) \varnothing 1 мм.

увеличении диаметра проводника происходят его быстрое плавление и разрушение с частичным испарением [13].

Результаты экспериментальных исследований (рис. 4 и 5) показывают, что повышение запасенной энергии приводит к увеличению амплитуды волны давления. При этом данная тенденция менее выражена для электрического взрыва медного проводника диаметром 0,14 при зарядном напряжении 3 и 7,5 кВ (рис. 4а–б) и четко прослеживается для режимов электрического взрыва медного проводника диаметром 0,14 мм при зарядном напряжении 10 кВ (рис. 4в), а также проводников диаметром 0,5 и 1 мм (рис. 4г–е, рис. 5). Это подтверждает заключение, сделанное авторами работ [9, 10].

Повышение запасенной энергии возможно за счет увеличения емкости конденсаторной батареи или повышения величины зарядного напряжения. При этом возникает вопрос, какой из этих путей является наиболее эффективным для повышения амплитуды генерированной ЭВП волны давления. Результаты проведенных экспериментальных исследований в своем большинстве показали, что повышение запасенной энергии за счет увеличения величины зарядного напряжения позволяет получить большую амплитуду волны давления, чем аналогичное повышение величины запасенной энергии за счет увеличения емкости конденсаторной батареи. То есть большая амплитуда волны давления при одинаковой запасенной энергии наблюдается на режимах с большей величиной зарядного напряжения и меньшей емкостью конденсаторной батареи (рис. 4а–в; г–е; 5а–в; г–е). Для примера рассмотрим несколько режимов электрического взрыва проводников разного диаметра и материала:

– электрическим взрывом медного проводника диаметром 0,14 мм при зарядном напряжении 3 кВ и емкости конденсаторной батареи 222 мкФ (запасенная энергия \approx 1 кДж) генерируется волна давления амплитудой 7,8 МПа.

Повышение запасенной энергии за счет емкости до \approx 4027 Дж (3 кВ, 895 мкФ) увеличивает амплитуду на \approx 4%, в то время как повышение запасенной энергии до \approx 4020 Дж за счет зарядного напряжения (143 мкФ, 7,5 кВ) увеличивает амплитуду на \approx 115%. Следует отметить, что для данного проводника при зарядном напряжении 10 кВ и нормальном гидростатическом давлении увеличение запасенной энергии за счет емкости более эффективно, чем при зарядном напряжении 3 кВ: так, увеличение запасенной энергии от 1121 (24,2 мкФ) до 4085 Дж (81,7 мкФ) дает повышение амплитуды на \approx 47%;

– электрическим взрывом медного проводника диаметром 0,5 мм при зарядном напряжении 3 кВ и емкости конденсаторной батареи 437 мкФ (запасенная энергия \approx 1970 Дж) генерируется волна давления амплитудой \approx 31 МПа. Повышение запасенной энергии за счет емкости до \approx 4027 Дж (3 кВ, 895 мкФ) увеличивает амплитуду на \approx 108%, в то время как повышение запасенной энергии за счет зарядного напряжения до \approx 4020 Дж (7,5 кВ, 143 мкФ) увеличивает амплитуду на \approx 244%. Если продолжать увеличивать зарядное напряжение и уменьшать емкость (10 кВ, 81,7 мкФ, 4085 Дж), то амплитуда волны давления увеличится на \approx 328% (в сравнении с режимами 3 кВ, 437 мкФ, 1970 Дж);

– электрическим взрывом алюминиевого проводника диаметром 0,5 мм при зарядном напряжении 3 кВ и емкости конденсаторной батареи 437 мкФ (запасенная энергия \approx 1970 Дж) генерируется волна давления амплитудой \approx 27 МПа. Повышение запасенной энергии за счет емкости до \approx 4027 Дж (3 кВ, 895 мкФ) увеличивает амплитуду на \approx 110%, в то время как повышение запасенной энергии за счет зарядного напряжения до \approx 4020 Дж (7,5 кВ, 143 мкФ) увеличивает амплитуду на \approx 245%. Последующее увеличение зарядного напряжения и уменьшение емкости (10 кВ, 81,7 мкФ,

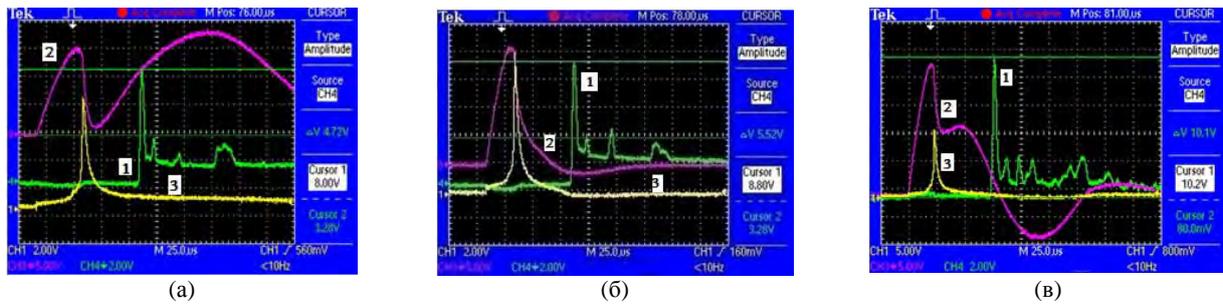


Рис. 8. Осциллограммы волны давления (1), разрядного тока (2) и напряжения на разрядном промежутке при электрическом взрыве медного проводника диаметром 0,5 мм: (а) $I_0 = 0,05$ м; $U_0 = 3$ кВ; $W_0 = 5$ кДж; гидростатическое давление 0,1 МПа; (б) $I_0 = 0,05$ м; $U_0 = 7,5$ кВ; $W_0 = 2$ кДж; гидростатическое давление 0,1 МПа; (в) $I_0 = 0,05$ м; $U_0 = 7,5$ кВ; $W_0 = 3$ кДж; гидростатическое давление 0,1 МПа.

4085 Дж) увеличивает амплитуду волны давления на $\approx 325\%$ (в сравнении с режимами 3 кВ, 437 мкФ, 1970 Дж).

В заключение следует отметить, что в процессе экспериментальных исследований из-за разнообразия начальных параметров были реализованы различные режимы ЭВП (рис. 8): близкий к критическому (рис. 8а), согласованный (рис. 8б), без паузы тока (рис. 8в). Режим ЭВП оказывает влияние на характеристики волны давления [12, 13].

Поэтому представляют интерес исследования, направленные на установление взаимосвязи между параметрами волны давления и характеристиками разрядного тока и напряжения на разрядном промежутке при ЭВП, которые соответствуют различным участкам фазового превращения металлического проводника [19, 20].

ВЫВОДЫ

В результате выполненных исследований установлено влияние гидростатического давления на амплитуду волны давления, генерируемой при электрическом взрыве металлического проводника. Показано, что влияние величины гидростатического давления жидкости на амплитуду волны давления, генерированной ЭВП, зависит от диаметра взрывающегося проводника. Так, для «тонкого» инициирующего проводника (в работе диаметром 0,14 мм) наблюдается тенденция уменьшения амплитуды генерированной волны давления при повышении гидростатического давления. При более «толстом» проводнике (в работе диаметром 0,5 мм и больше) гидростатическое давление не оказывает влияния на генерированную волну давления. Скорее всего, это связано с разными доминирующими факторами, определяющими формирование волны давления при взрыве «тонкого» и «толстого» металлического проводника.

Увеличение величины запасенной энергии разряда приводит к росту амплитуды волны

давления, генерированной при ЭВП. Причем повышение запасенной энергии за счет возрастания величины зарядного напряжения позволяет получить большую амплитуду волны давления, чем аналогичное повышение величины запасенной энергии за счет увеличения емкости конденсаторной батареи. Повышение зарядного напряжения (при прочих неизменных параметрах) также приводит к росту амплитуды генерируемой волны давления.

Исследования электрического взрыва проводников различных диаметров позволили установить существование оптимального их значения, которое обеспечивает максимальную амплитуду генерированной волны давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вовченко А.И. 50-летний путь развития: теория и практика электроразрядных процессов. В кн.: *Материалы XVI Международной научной конференции «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах» (19–22 августа 2013)*. Николаев: КП «Миколаївська обласна друкарня», 2013. С. 3–6.
2. Смирнов А.П., Жекул В.Г., Мельхер Ю.И., Тафтай Э.И., Хвоцан О.В., Швец И.С. *Электронная обработка материалов*. 2017, **53**(4), 47–52.
3. Суркаев А.Л., Кумыш М.М., Зубович С.О., Сухова Т.А., Усачев В.И. *Новый университет. Серия: Технические науки*. 2015, (9–10), 16–22. DOI: 10.15350/2221-9552.2015.9-10.
4. Krasik Ya., Fedotov A., Sheftman D., Efimov S., Sayapin A., Gurovich V., Veksler D., Bazalitski G., Gleizer S., Grinenko A., Oreshkin V. *Plasma Sources Science and Technology*. 2010, **19**(3), 034020. DOI: 10.1088/0963-0252/19/3/034020.
5. Кривицкий Е. В. *Динамика электровзрыва в жидкости*. Киев: Наукова думка, 1986. 208 с.
6. Ben Liu, Deguo Wang, Yanbao Guo. *Physics Letters A*. 2018, **382**(1), 49–54. DOI: 10.1016/j.physleta.2017.10.039.
7. Lisitsyn Igor V., Muraki Taishi, Akiyam Hidenori. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*. 1997, **18**(2), 89–91. <https://doi.org/10.1250/ast.18.89>

8. Кортхонджия В.П., Мдивнишвили М.О., Саралидзе З.К. *Журнал технической физики*. 2006, **76**(11), 43–46.
9. Гасанов И.С., Гусейнов Э.К., Салманов В.М., Агаева А.А. *Проблемы энергетики*. 2003, (5), 48–52.
10. Liuxia Li, Dun Qian, Xiaobing Zou, Xinxin Wang. *IEEE Transactions on Plasma Science*. March 2018, 6 p. DOI: 10.1109/TPS.2018.2811124.
11. Ruoyu Han, Haibin Zhou, Jiawei Wu, Aici Qiu, Weidong Ding, Yongmin Zhang. *Physics of Plasmas*. 2017, **24**(9), 093506. DOI: 10.1063/1.4989790.
12. Ruoyu Han, Jiawei Wu, Haibin Zhou, Weidong Ding, Aici Qiu, Thomas Clayson, Yanan Wang, Hang Ren. *Journal of Applied Physics*. 2017, **122**, 033302. DOI: 10.1063/1.4994009.
13. Коротков В.А., Несветайлов Г.А. *Физика горения и взрыва*. 1970, (2), 250–252.
14. Жекул В.Г., Литвинов В.В., Мельхер Ю.И., Смирнов А.П., Тафтай Э.И., Хвощан О.В., Швец И.С. *Нафтогазова енергетика*. 2017, **27**(1), 23–31.
15. Жекул В.Г., Поклонов С.Г., Смирнов А.П., Макаренко В.С. *Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений*. 2016, (14), 34–39.
16. Жекул В.Г., Смирнов А. П., Тафтай Э.И., Хвощан О.В., Швец И.С. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2017, (5), 55–59. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.5.09.
17. Шамко В.В., Кучеренко В.В. *Теоретические основы инженерных расчетов энергетических и гидродинамических параметров подводного искрового разряда*. Николаев: ИИПТ НАН Украины, 1991. 52 с.
18. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. *Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде*. Киев: Наукова думка, 1979. 208 с.
19. Коваль С.В., Кускова Н.И., Ткаченко С.И. *Теплофизика высоких температур*. 1997, **35**(6), 876–879.
20. Tkachenko S.I., Kuskova N.I. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 1999, **11**(10), 2223–2232.

Summary

The paper presents the results of experimental studies of the effect of hydrostatic pressure, charging voltage, stored discharge energy, and conductor diameter on the amplitude of the pressure wave in the electric wire explosion in water. It is shown that the amplitude of the pressure wave generated in a liquid increases with an increase in the stored energy and charging voltage, and with the optimum diameter of the wire, which provides the maximum amplitude of the pressure wave. When the hydrostatic pressure was raised, the amplitude of the generated pressure wave reduced for a thin initiating wire (0.14 mm dia. wire was used) and no effect on a thick wire (0.5 mm or larger diameter). Moreover, the paper indicates the need to ensure a good hard contact between the electrodes of the electrode system and the metallic wire during the electrical explosion of a wire in a liquid, otherwise there is the loss of the efficiency of the mechanical action due to a decrease in the amplitude of the pressure wave.

Keywords: electrical wire explosion, pressure wave amplitude, hydrostatic pressure, charging voltage, stored discharge energy.