

Влияние длины межэлектродного промежутка при подводном искровом разряде и длины проводника при его подводном электрическом взрыве на амплитуду генерированной волны давления

* А. П. Смирнов, В. Г. Жекул, О. В. Хвоцан,
В. В. Литвинов, А. А. Коваленко, С. В. Конотоп

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

Поступила 20.05.2019
После доработки 09.07.2019
Принята к публикации 12.07.2019

Представлены результаты экспериментальных исследований по влиянию длины разрядного промежутка при подводном искровом разряде и длины металлического проводника при его подводном электрическом взрыве. В обоих случаях зависимость амплитуды волны давления от длины межэлектродного промежутка или длины проводника имеет оптимум, при котором генерируется волна давления с максимальной амплитудой. В связи с этим необходимо стремиться к реализации режимов с оптимальным значением длины межэлектродного промежутка, что обеспечивает эффективное электроразрядное воздействие на объект обработки, а при подводном искровом разряде также позволяет реализовать режим, близкий к критическому, что положительно сказывается на ресурсе и долговечности электроразрядного оборудования. Показано, что изменение длины металлического проводника при его подводном взрыве при неизменных параметрах разрядного контура приводит к изменению режима подводного электрического взрыва проводника.

Ключевые слова: электрический взрыв проводника, подводный искровой разряд, амплитуда волны давления, длина проводника, межэлектродное расстояние.

УДК 537.528

DOI: 10.5281/zenodo.3522295

ВВЕДЕНИЕ

Электрический разряд в воде, который является источником импульсных давлений, находит все более широкое применение в различных отраслях промышленности. Электроразрядное оборудование используется для декольматации нефтяных и водозаборных скважин, тонколистовой штамповки, разрушения бетонных, железобетонных и монолитных конструкций, уменьшения остаточных напряжений в сварных соединениях, обеззараживания питьевой воды и стоков и многих других технологий [1]. Поэтому неудивительно, что работы, направленные на повышение эффективности существующих электроразрядных технологий и оборудования, являются актуальными и имеют практическую и научную ценность.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ

Основным действующим фактором электроразрядного воздействия считается волна давления [2], при этом наиболее часто эффективность воздействия характеризуется ее амплитудой. Подводное электровзрывное преобразование электрической энергии в энергию других видов может быть реализовано двумя методами – подводным искровым разрядом (ПИР) и

подводным электрическим взрывом проводника (ПЭВП) [3]. Величина амплитуды волны давления, генерируемой электрическим взрывом, зависит от параметров разрядной цепи (зарядное напряжение, емкость конденсаторной батареи, индуктивность и сопротивление разрядной цепи) и характеристик рабочей жидкости (электропроводность воды, гидростатическое давление). Преобразование электрической энергии в механическую осуществляется в электродной системе, которая является одним из наиболее важных элементов любого электроразрядного оборудования [4]. Соответственно параметры электродной системы (конфигурация электродов, длина межэлектродного промежутка или геометрические размеры проводника) оказывают существенное влияние на параметры генерируемой при электрическом взрыве волны давления. В предыдущих работах авторами было рассмотрено влияние параметров разрядного контура и рабочей жидкости на амплитуду волны давления, генерированную электрическим взрывом в воде [5–7]. При этом влияние такого параметра, как длина межэлектродного промежутка или металлического проводника, не рассматривалось. Учитывая все вышесказанное, цель данной работы – исследование влияния длины межэлектродного промежутка при ПИР и

длины металлического проводника при ПЭВП на амплитуду генерируемой волны давления.

ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ МЕЖЭЛЕКТРОДНОГО ПРОМЕЖУТКА НА АМПЛИТУДУ ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПОДВОДНОМ ИСКРОВОМ РАЗРЯДЕ

Как показал анализ научной литературы, влиянию длины межэлектродного промежутка на эффективность электроразрядных технологий в целом и на амплитуду волны давления в частности посвящено достаточно большое количество работ [2, 8–13]. Так, в работе [8] исследовался диапазон длин межэлектродных промежутков от 10 до 20 мм. Полученные результаты показали, что в данном диапазоне при заданных параметрах разрядного контура с ростом длины межэлектродного промежутка происходит увеличение амплитуды генерированной волны давления. Также авторами отмечалось, что при прочих равных условиях наибольшая амплитуда волны давления достигалась при режимах с большей длиной канала разряда.

В работах [9, 10] на основании полученных экспериментальных данных была определена зависимость амплитуды волны давления от длины межэлектродного промежутка. На рис. 1 приведен внешний вид этой зависимости, который свидетельствует о наличии ярко выраженного максимума. На этом рисунке величины давления и межэлектродного расстояния приведены относительно значений давления и длины межэлектродного промежутка в оптимальном режиме.

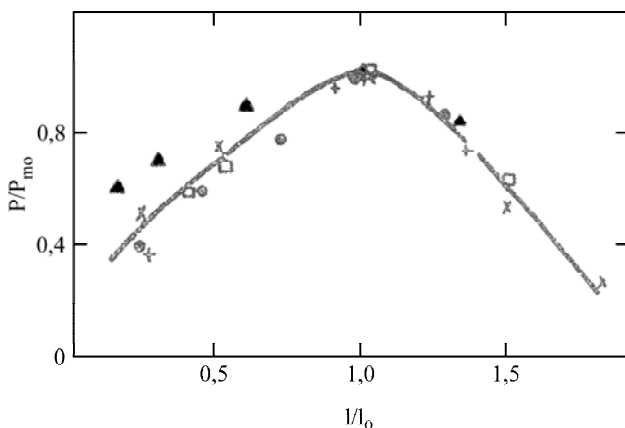


Рис. 1. Зависимость экспериментальных значений амплитуды давления от длины МЭП при: □ – $C = 0,56$ мкФ, $U_0 = 40$ кВ; + – $C = 0,56$ мкФ, $U_0 = 60$ кВ; ● – $C = 0,56$ мкФ, $U_0 = 80$ кВ; ▲ – $C = 0,56$ мкФ, $U_0 = 42,5$ кВ; × – $C = 3$ мкФ, $U_0 = 40$ кВ; $L = 3$ мкГн; сплошная линия – результат осреднения всех опытных данных [10].

Авторами [9, 10] было получено выражение для определения оптимальной длины межэлектродного промежутка, которая обеспечивает

максимальную амплитуду генерированной при ПИР волны давления:

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

где r – расстояние от оси разряда до стенки разрядной камеры, м; $z = \sqrt{L/C}$ – волновое сопротивление контура; $W_0 = 0,5CU^2$ – энергия разряда, Дж; C – емкость конденсаторной батареи, Ф; L – индуктивность разрядного контура, Гн; U – напряжение пробоя, В; A – искровая постоянная (величина искровой постоянной для ПИР – 10^5 В с/м²) [10].

Использование выражения (1) для определения длины межэлектродного промежутка в электроразрядных технологиях позволяет повысить их эффективность. Об этом говорят результаты, представленные в работах [2, 11] применительно к электроразрядному способу декольматации нефтяных скважин [14]. Приведенные результаты показывают, что обработку скважин необходимо проводить при длине межэлектродного промежутка, близкой к ее оптимальному значению по амплитуде волны давления. Это обеспечивает наиболее эффективное электроразрядное воздействие как на вязкие, так и на хрупкие отложения.

Еще одно достоинство режимов работы на оптимальном межэлектродном промежутке – большой декремент затухания разрядного тока. Это положительно сказывается на работе элементов электроразрядного оборудования, увеличивает их ресурс (например, высоковольтных импульсных конденсаторов электроразрядных погружных устройств для обработки нефтяных скважин).

На рис. 2 приведены осциллограммы разрядного тока и напряжения на разрядном промежутке электроразрядного погружного устройства «Скиф-100М» [14] при его работе на разных длинах межэлектродного промежутка.

Электрический разряд осуществлялся при следующих параметрах: индуктивность разрядной цепи – 0,7 мкГн, емкость конденсаторной батареи – 2,4 мкФ, напряжение пробоя ≈ 26 кВ. Считалось, что обработке подвергается скважина внутренним диаметром 125 мм. Для этих параметров оптимальная длина межэлектродного промежутка составила ≈ 24 мм. Для сравнения были выполнены разряды при более коротких длинах межэлектродного промежутка – 10 и 20 мм. Для измерения электрических характеристик использовалась разработанная в Институте импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины (ИИПТ НАН Украины) измерительная муфта (внешний вид приведен на рис. 3), которая включала в себя делитель напряжения для изме-

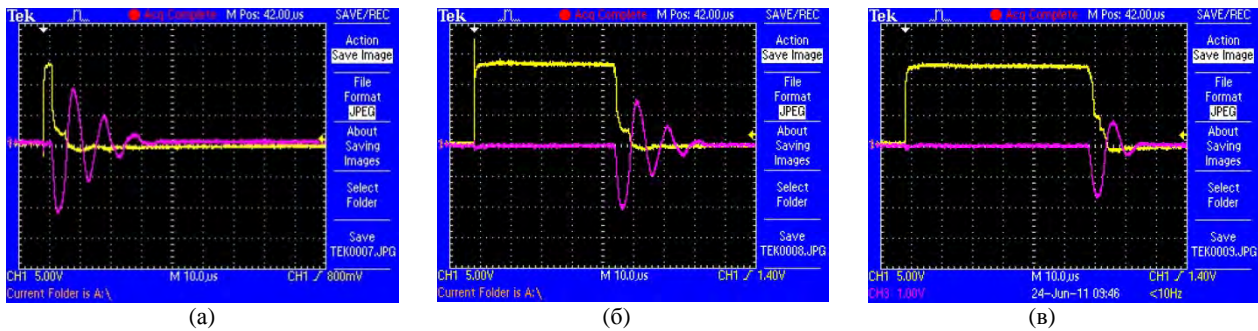


Рис. 2. Осциллограммы разрядного тока и напряжения устройства «Скиф-100М» при различных длинах межэлектродного промежутка l , мм: (а) $l = 10$; (б) $l = 15$; (в) $l = l_{opt} = 24$.

рения напряжения на разрядном промежутке и катушку Роговского для измерения разрядного тока.



Рис. 3. Внешний вид измерительной муфты.

Анализ результатов, приведенных на рис. 2, показывает, что при оптимальном промежутке реализуется режим ПИР, более близкий к критическому. Данный режим является более «предпочтительным» для электроразрядного оборудования (особенно для высоковольтных импульсных конденсаторов) с целью повышения сроков его эксплуатации, чем режим с меньшим декрементом колебаний с большими амплитудами тока, который реализуется при малых длинах межэлектродного промежутка.

В случае увеличения длины межэлектродного промежутка стоит ожидать еще большее приближение к критическому режиму ПИР. Однако в этом случае происходит падение эффективности воздействия за счет уменьшения амплитуды волны давления.

Учитывая все вышесказанное, можно заключить, что при применении электроразрядных технологий, основным действующим фактором которых является волна давления (например, электроразрядный метод интенсификации добычи нефти), необходимо стремиться к реализации режимов с оптимальным по амплитуде волны давления значением длины межэлектродного промежутка.

ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПРОВОДНИКА НА АМПЛИТУДУ ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПЭВП

В зависимости от диаметра взрываемого проводника можно выделить два случая – инициирование электрического разряда тонким металлическим проводником, в этом случае форма разрядного тока практически не искажается, и непосредственно взрыв металлического проводника большего диаметра [3, 15].

Для случая взрыва тонкого инициирующего проводника при определении оптимальной длины металлического проводника по амплитуде волны давления можно воспользоваться выражением (1). При взрыве тонкого металлического проводника значение искровой постоянной $A = 0,25 \cdot 10^5$ В·с/м² [9, 10].

Сложнее моделировать взрыв проводника большего диаметра. В работах [16, 17] указывается на наличие согласованных значений диаметра и длины взрываемого проводника, которые обеспечивают максимальную амплитуду генерируемой волны давления. Они с погрешностью порядка 10% [17] могут быть определены из условия, обеспечивающего максимальную скорость выделения энергии при ЭВП – согласованный режим взрыва металлического проводника (2) и (3) [3]:

$$l_1 = 2 \cdot 10^{-3} U_0 \sqrt[4]{LC}, \quad (2)$$

$$d_1 = 2 \cdot \left[\frac{W_0}{z\rho\sigma(\lambda + \gamma)} \right]^{1/4}, \quad (3)$$

где U_0 – зарядное напряжение, В; ρ – плотность материала проводника, кг/м³; σ – удельная электропроводность материала проводника, См/м; λ – удельная теплота плавления, Дж/кг; γ – удельная теплота парообразования, Дж/кг.

Стоит отметить, что авторы работ [16, 17] варьировали диаметр проводника, при этом его длина оставалась величиной неизменной. Опять же влияние изменения диаметра проводника на амплитуду волны давления при постоянной его

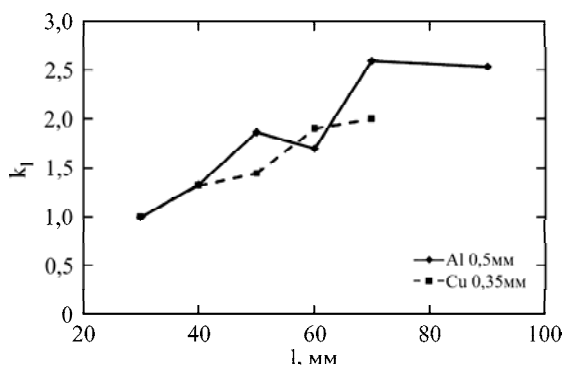


Рис. 4. Влияние длины проводника на амплитуду генерированной волны давления при ПЭВП (экспериментальный режим № 1).

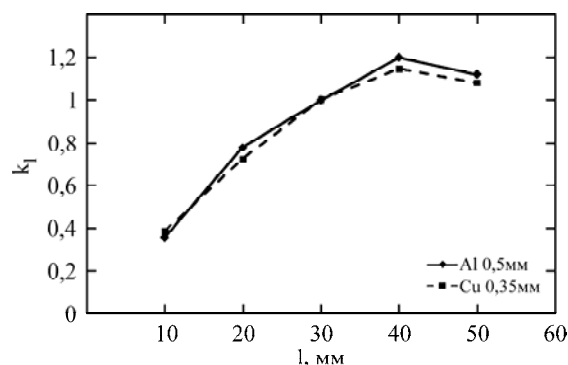


Рис. 5. Влияние длины проводника на амплитуду генерированной волны давления при ПЭВП (экспериментальный режим № 2).

Таблица. Параметры проводника для осуществления режима его согласованного взрыва

Проводник (диаметр)	Экспериментальный режим № 1		Экспериментальный режим № 2	
	d_1 , мм	l_1 , мм	d_1 , мм	l_1 , мм
Al	0,47	54,5	0,89	43,9
Cu	0,35	54,5	0,67	43,9

длине исследовалось в работе [18]. По ее результатам авторами был сделан вывод, что амплитуда волны давления, генерированной при ПЭВП, определялась массой испаренного металла. При этом для получения наибольшей амплитуды необходимо, чтобы запасенной энергии было достаточно для испарения всей массы металлического проводника.

Учитывая все вышеизложенное, в данной работе авторы провели экспериментальные исследования влияния длины металлического проводника на амплитуду волны давления при ПЭВП. Исследования проводились на специальном экспериментальном стенде и по методике, подробно описанной в [5, 7]. Измерение генерированных при ПЭВП волн давления осуществлялось пьезоэлектрическим волноводным датчиком для измерения импульсного давления типа ДТХ-1, разработанным в ИИПТ НАН Украины (г. Николаев) [19].

Исследования проводились в двух режимах.

Экспериментальный режим № 1: запасенная энергия – 1023 Дж; зарядное напряжение – 7,5 кВ; емкость конденсаторной батареи – 36,38 мкФ; индуктивность разрядной цепи – 4,724 мкГн. Длину проводника варьировали от 30 до 90 мм. Исследовали электрический взрыв алюминиевого проводника диаметром 0,5 мм и медного проводника диаметром 0,35 мм.

Экспериментальный режим № 2: запасенная энергия – 2992,5 Дж; зарядное напряжение – 3 кВ; емкость конденсаторной батареи – 665 мкФ; индуктивность разрядной цепи – 4,3 мкГн. Длину проводника изменяли от 10 до 50 мм с шагом 10 мм. Исследовали электрический взрыв алюминиевого и медного проводников диаметром 0,5 мм каждый.

Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 4 и 5. Все экспериментальные данные по амплитуде волны давления приведены относительно амплитуды при ПЭВП с длиной проводника 30 мм (минимальная длина проводника на первом экспериментальном режиме). Поэтому был введен специальный коэффициент k_l :

$$k_l = P_l / P_{30}, \quad (4)$$

где P_l – амплитуда волны давления при заданной длине металлического проводника; P_{30} – амплитуда волны давления при длине проводника 30 мм.

Анализ данных, приведенных на рис. 4 и 5, показывает, что вид зависимости амплитуды волны давления, генерированной при ПЭВП, от длины металлического проводника свидетельствует о наличии оптимального значения его длины, которое обеспечивает максимальную амплитуду воздействия. Если рассчитать параметры проводника для осуществления согласованного режима (см. таблицу) и сравнить с экспериментальными данными, можно отметить, что при экспериментальном режиме № 2 (рис. 5) возможный максимум амплитуды генерированной волны давления лежит в диапазоне длин проводника от 40 до 50 мм. Это хорошо согласуется с данными в таблице, даже несмотря на то что диаметр проводника, который использовался в экспериментальных исследованиях, меньше, чем диаметр проводника при согласованном режиме (см. таблицу). В то же время при экспериментальном режиме № 1, глядя на внешний вид кривой (рис. 4), оптимум ожидается при длине проводника более 70 мм, что отличается от расчетных данных по выражению (2) и приведенных в таблице, хотя в

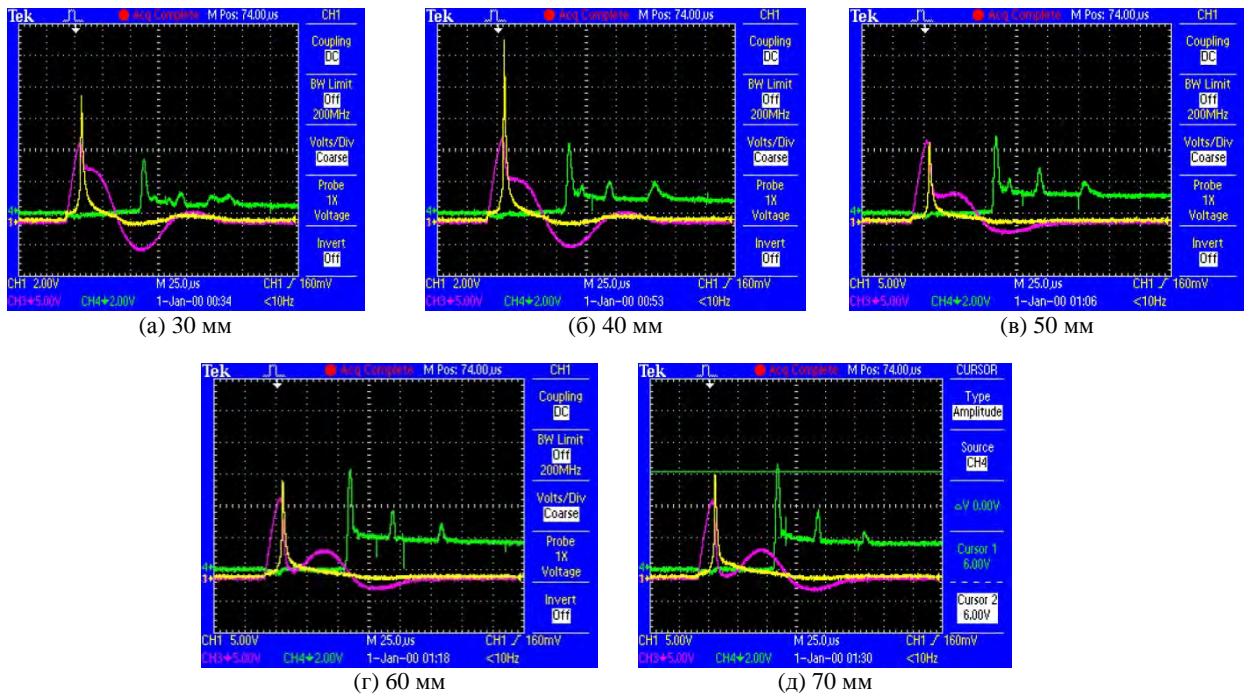


Рис. 6. Осциллограммы разрядного тока, напряжения на разрядном промежутке и временного профиля давления при электрическом взрыве медного проводника диаметром 0,35 мм различной длины при параметрах экспериментального режима № 1.

данном случае диаметр используемого в экспериментальных исследованиях проводника близок к диаметру проводника в согласованном режиме (см. таблицу). Это говорит о необходимости проведения дополнительных исследований, направленных на определение длины проводника, при которой генерируется волна давления с максимальной амплитудой.

В работе [20] было выделено несколько характерных типов режимов ПЭВП в зависимости от временного профиля разрядного тока. При этом авторами отмечалось, что при неизменных параметрах разрядного контура различные режимы ПЭВП могут быть реализованы изменением диаметра взрывающегося проводника. Об этом же свидетельствуют результаты работы [15]. Изменение длины проводника также оказывает влияние на форму разрядного тока. Для примера на рис. 6 даны осциллограммы ПЭВП медного проводника диаметром 0,35 мм разной длины.

Анализ результатов, представленных на рис. 6, показывает, что увеличение длины металлического проводника приводит к превращению режима ПЭВП без паузы тока (когда дуговая стадия разряда возникает до полного отключения тока, рис. 6а) в режим, близкий к режиму ПЭВП с паузой тока (реализуется при наличии после взрыва проводника остаточной энергии в конденсаторах, которая впоследствии выделяется в дуговой стадии при пробое расширяющихся продуктов взрыва, рис. 6д). При этом видно, что при длине проводника 60 мм (рис. 6г) реализуется режим с нулевой паузой тока.

ВЫВОДЫ

Как в случае ПИР, так и в случае ПЭВП зависимость амплитуды волны давления от длины межэлектродного промежутка или длины проводника соответственно имеет оптимум. При этом значении длины генерируется волна давления с максимальной амплитудой. Поэтому необходимо стремиться к реализации режимов с оптимальным по амплитуде волны давления значением длины межэлектродного промежутка. В этом случае обеспечивается эффективное электроразрядное воздействие на объект обработки, а при ПИР реализуется близкий к критическому режим, что положительно сказывается на ресурсе электроразрядного оборудования.

Изменение длины металлического проводника при ПЭВП при неизменных параметрах разрядного контура приводит к изменению типа режима ПЭВП. Так, увеличение длины медного проводника диаметром 0,35 мм от 30 до 70 мм позволяет трансформировать режим ПЭВП без паузы тока в режим с паузой тока.

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. Zhekul V.G., Poklonov S.G., Smirnov A.P. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2011, **47**(1), 89–93.
3. Кривицкий Е.В. *Динамика электровзрыва в жидкости.* Киев: Наукова думка, 1986. 208 с.
4. Гулый Г.А., Малюшевский П.П. *Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах.* Киев: Наукова думка, 1977. 176 с.
5. Smirnov A.P., Zhekul V.G., Mel'kher Yu.I., Taftai E.I. et al. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2018, **54**(5), 475–480. DOI: 10.3103/S1068375518050101
6. Смирнов А.П., Жекул В.Г., Тафтай Э.И., Хвощан О.В. и др. *ЭОМ.* 2018, **54**(1), 58–62. DOI: 10.5281/zenodo.1168366
7. Смирнов А.П., Жекул В.Г., Тафтай Э.И., Хвощан О.В. и др. *ЭОМ.* 2018, **54**(6), 30–38. DOI: 10.5281/zenodo.1968903
8. Yi Liu, Zhi-Yuan Li, Xian-Dong Li, Si-Wei Liu et al. *Phys Plasmas.* 2017, **24**, 043510. <https://doi.org/10.1063/1.4980848>
9. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. *Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде.* Киев: Наукова думка, 1979. 208 с.
10. Шамко В.В., Кучеренко В.В. *Теоретические основы инженерных расчетов энергетических и гидродинамических параметров подводного искрового разряда.* Николаев: ИИПТ НАН Украины, 1991. 52 с.
11. Смирнов А.П., Жекул В.Г., Поклонов С.Г. *Геотехническая механика.* 2012, (58), 155–165.
12. Kosenkov V.M., Vyckov V.M., Zhekul V.G., Poklonov S.G. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2013, **49**(3), 241–246. DOI: 10.3103/S1068375513030071
13. Kosenkov V.M. *Tech Phys+.* 2011, **56**(10), 1513–1519.
14. Жекул В.Г., Литвинов В.В., Мельхер Ю.И., Смирнов А.П. и др. *Нафтогазова енергетика.* 2017, **27**(1), 23–31.
15. Коротков В.А., Несветайлов Г.А. *Физика горения и взрыва.* 1970, (2), 250–252.
16. Гасанов И.С., Гусейнов Э.К., Салманов В.М., Агаева А.А. *Проблемы энергетики.* 2003, (5), 48–52.
17. Кортхонджия В.П., Мдивнишвили М.О., Тактакишвили М.И. *Журнал технической физики.* 1999, **69**(4), 41–43.
18. Liuxia Li, Dun Qian, Xiaobing Zou, Xinxin Wang. *IEEE Transactions on Plasma Science.* 2018, **46**(10), 3444–3449. DOI: 10.1109/TPS.2018.2811124
19. Жекул В.Г., Смирнов А.П., Тафтай Э.И., Хвощан О.В. и др. *Електротехніка і Електромеханіка.* 2017, (5), 55–59. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.5.09
20. Ruoyu Han, Jiawei Wu, Haibin Zhou, Weidong Ding, Aici Qiu, Thomas Clayson, Yanan Wang, Hang Ren. *J Appl Phys.* 2017, **122**, 033302. DOI: 10.1063/1.4994009

Summary

The results of experimental studies on the effect of the length of the discharge gap in an underwater spark discharge and the length of a metallic conductor during its underwater electrical explosion are presented. It is noted that in both cases the dependence of the amplitude of the pressure wave on the length of the interelectrode gap or the length of the conductor has an optimum at which the pressure wave with the maximum amplitude is generated. In this regard, it is necessary to strive to implement modes with a given optimum value of the length of the interelectrode gap, which provides an effective electrical discharge effect on the processing object and with an underwater spark discharge also allows for a near-critical mode, which positively affects the life and durability of electrical discharge equipment. The results of experimental studies also showed that a change in the length of a metallic conductor during its underwater explosion with unchanged parameters of the discharge circuit leads to a change in the mode of the underwater electrical explosion of a conductor.

Keywords: electrical wire explosion, underwater spark discharge, pressure wave amplitude, length of conductor, interelectrode gap.