

Экспериментальное исследование волн давления, генерированных электрическим взрывом в закрытом объеме жидкости

* А. П. Смирнов, В. Г. Жекул, Ю. И. Мельхер, Э. И. Тафтай, О. В. Хвоцан, И. С. Швец

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Богоявленский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина,
e-mail: iipt@iipt.com.ua; *e-mail: smirnovap1978@gmail.com*

Выполнены экспериментальные исследования амплитуды волны давления, генерированной электрическим взрывом в закрытом объеме жидкости при повышенных гидростатических давлениях. В процессе экспериментов проведены оценка влияния характеристик разрядного контура на амплитуду волны давления при подводном искровом разряде и сравнение искрового разряда с электрическим взрывом проводника по этому параметру. Полученные результаты показали, что уменьшение индуктивности и увеличение зарядного напряжения приводят к увеличению амплитуды волны давления, генерированной подводным искровым разрядом. Применение электрического взрыва проводника стабилизирует параметры генерируемой волны давления, позволяет увеличить ее амплитуду и одновременно снизить уровень зарядного напряжения.

Ключевые слова: электрический взрыв проводника, подводный искровой разряд, амплитуда волны давления, параметры разрядного контура, закрытый объем жидкости.

УДК 537.528

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время электрический взрыв в жидкости нашел широкое применение в решении практических задач во многих отраслях промышленности [1–3]. Он с успехом используется для интенсификации добычи нефти, декольматации водозаборных скважин, разрушения и обработки материалов давлением.

Электровзрыв в жидкости характеризуется комплексным воздействием на объект обработки [2]. При этом одним из основных действующих факторов является генерируемая взрывом волна давления [3–5]. Известно, что максимальное механическое действие волны давления при электровзрыве в жидкости для некоторых технологических процессов, например дробления и измельчения, обеспечивается ее амплитудой [6]. В электроразрядном способе обработки нефтедобывающих, нагнетательных и артезианских скважин [7–9] также определяющую роль играет амплитуда волны давления [10].

Электровзрывное преобразование энергии в жидкости может быть реализовано двумя методами: подводным искровым разрядом (ИР) и подводным электрическим взрывом проводника (ЭВП) [5].

В большинстве современных электроразрядных технологий (ЭТ) применяется ИР. При ИР на параметры возникающей волны давления влияют как условия окружающей среды (например, гидростатическое давление), так и параметры разрядного контура. В некоторых ЭТ возможно обеспечение параметров жидкой

среды, которые нивелируют влияние внешних условий. Примером может служить закрытая электродная система, которая применяется в электроразрядном способе обработки скважин [11]. В этом случае амплитуда волны давления, а соответственно и эффективность ЭТ, определяется параметрами разрядного контура [5, 12]. Как показывают результаты исследований [5], наиболее существенное влияние на амплитуду волны давления при электровзрыве оказывают напряжение и индуктивность разрядного контура.

ЭВП является одним из наиболее перспективных методов формирования волн давления в жидкости [13]. В настоящее время проводится довольно много работ, целью которых является изучение электрического взрыва проводника в целом [14, 15] и генерированной им волны давления [13, 16] в частности.

Основным сдерживающим фактором замены ИР на ЭВП в преобладающем большинстве ЭТ является отсутствие надежного механизма непрерывной или дискретной подачи проводника в межэлектродное пространство. Следует отметить, что особый интерес представляют исследования, которые направлены на сравнение ИР и ЭВП по их главному действующему фактору – волне давления, генерированной электровзрывом в закрытых объемах жидкости.

Таким образом, экспериментальные исследования волн давления, возбужденных электровзрывом в закрытых объемах при высоких давлениях, являются актуальными, имеют научное и практическое значение и преследуют своей

целью оценку влияния характеристик разрядного контура на амплитуду волны давления при ИР в жидкости и сравнение ИР с ЭВП по этому параметру.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ В ЗАКРЫТЫХ ОБЪЕМАХ ЖИДКОСТИ

При проведении экспериментальных исследований использовался лабораторный стенд, схема которого приведена на рис. 1. Он состоит из энергетической и технологической частей, а также средств регистрации параметров.

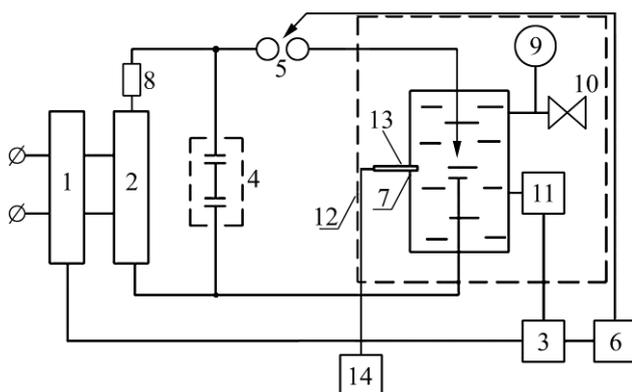


Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда: 1 – регулировочный трансформатор РГТ 25/0,5; 2 – высоковольтный трансформатор выпрямитель ВТМ 15/50; 3 – пульт управления; 4 – батарея импульсных конденсаторов; 5 – воздушный управляемый разрядник; 6 – блок поджига; 7 – камера высокого давления; 8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

Энергетическая часть стенда включает оборудование для осуществления высоковольтного электрического разряда. Она позволяет с помощью регулировочного трансформатора (1) через выпрямитель-трансформатор (2) и токоограничивающее сопротивление (8) зарядить батарею импульсных конденсаторов (4) до необходимого значения напряжения. После достижения требуемого напряжения с пульта управления (3) с помощью блока поджига (6) коммутируется воздушный разрядник (5) и осуществляется электрический разряд в камере высокого давления (7).

Основу технологической части (12) составляет разрядная камера высокого давления (7), в которой осуществляется электрический разряд. Также в технологическую часть входит оборудование для обеспечения в разрядной камере гидростатического давления и его контроля – манометр (9), клапан (10), насос высокого давления с электроприводом (11).

Для исследования волн давления использовали две камеры высокого давления с внутренним диаметром 0,12 (рис. 2а) и 0,164 м (рис. 2б). Камеру меньшего диаметра использовали для исследования волн давления при ИР, а камеру большего диаметра – при ЭВП.

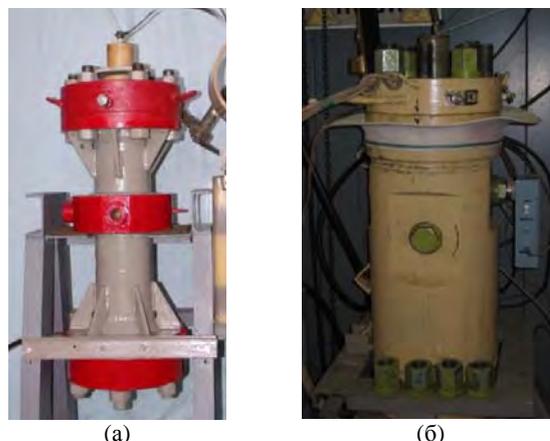


Рис. 2. Экспериментальные камеры высокого давления.

Для регистрации электрических характеристик (напряжения на разрядном промежутке и разрядного тока) исследуемых процессов использовали емкостной делитель напряжения и омический коаксиальный шунт. Их калибровку выполняли по методике, предложенной в [17].



Рис. 3. Волноводный датчик давления.

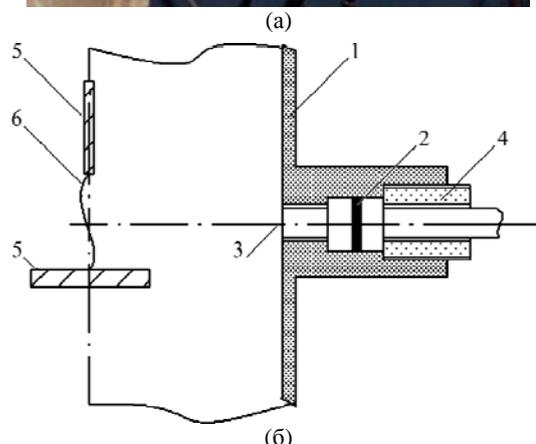
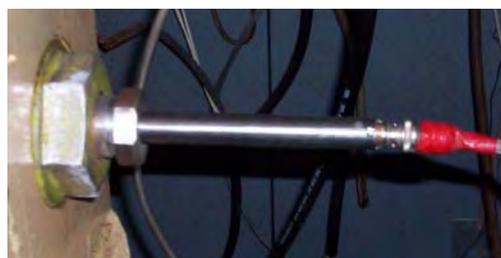


Рис. 4. Схема крепления датчика на корпусе разрядной камеры: (а) внешний вид; (б) схема крепления. 1 – корпус разрядной камеры; 2 – уплотнительное резиновое кольцо; 3 – доннышко датчика; 4 – прижимная гайка; 5 – электроды; 6 – канал электрического разряда.

Измерение давления осуществлялось волновым датчиком давления (ВДД) (рис. 3). Гальваническая развязка пьезоэлемента ВДД и его конструкция обеспечили достаточное соотношение сигнал/наводка при электрическом разряде в воде. Калибровка ВДД осуществлялась с помощью датчиков импульсного давления DPX 101-5K фирмы «OMEGA» (США) и PS-02 фирмы ООО «ГлобалТест» (Россия). Датчик крепился на стенке разрядной камеры, общий вид и схема крепления приведены на рис. 4.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАЗРЯДНОГО КОНТУРА НА АМПЛИТУДУ ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ, ГЕНЕРИРОВАННОЙ ИСКРОВЫМ РАЗРЯДОМ

В малой камере высокого давления (рис. 2а) были выполнены измерения амплитуды волны давления (P_{max}) при подводном ИР. Для привязки к реально существующим технологиям параметры базового экспериментального режима были близки к характеристикам электроразрядного оборудования для обработки нефтедобывающих, нагнетательных и артезианских скважин: зарядное напряжение $U_0 = 30$ кВ; емкость конденсаторной батареи $C = 2,3$ мкФ; запасенная энергия $W \approx 1$ кДж [18].

В ходе экспериментальных исследований рассматривалось влияние на амплитуду волны давления индуктивности разрядного контура (L) и величины зарядного напряжения. Во всех режимах неизменной поддерживалась энергия разряда (1 кДж). Величина межэлектродного промежутка l_0 рассчитывалась из условия (1) [6]:

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

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 (величина искровой постоянной для ИР – 10^5 В с/м²) [6, 19].

Электропроводность рабочей жидкости выбиралась согласно [11, 20]. Эксперименты проводились при повышенном гидростатическом давлении (в данном случае 2 МПа), что позволило исключить влияние растворенного в жидкости газа на полученные результаты.

Для каждого режима выполнялось 10 повторных измерений и определялось среднеквадратическое отклонение полученных результатов (Δ). Результаты экспериментов приведены в табл. 1.

Анализ полученных результатов показывает, что при прочих равных параметрах:

– увеличение напряжения в $\approx 1,3$ раза приводит к росту амплитудного значения волны давления в 1,44 раза;

– уменьшение индуктивности разрядного контура более чем в 4 раза приводит к увеличению среднего значения амплитуды генерированной волны давления в 1,16 раза.

Таблица 1. Влияние параметров разрядного контура на амплитуду волны давления

U_0 , кВ	L , мкГн	P_{max} , МПа	Δ , %
30	4	32,1	16,7
30	0,9	37,3	11,3
40	0,9	53,8	20,1

Таким образом, для увеличения амплитуды волны давления при неизменной энергии разряда, предпочтительнее повышать величину зарядного напряжения. Уменьшение же индуктивности является менее эффективным.

Обсуждая результаты экспериментов, следует обратить внимание на большой разброс полученных данных. Это связано со стохастичностью процесса электрического пробоя жидкости – каждый электрический разряд характеризуется своим пространственным расположением и внутренним объемом канала разряда.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ

Один из способов стабилизации параметров гидродинамического воздействия при электрическом разряде – электрический взрыв металлического проводника. Поэтому в рамках данной работы были выполнены исследования по определению амплитуды волны давления, генерированной ЭВП, и ее сравнение с ИР. Исследования проводились на камере высокого давления диаметром 0,164 м при гидростатическом давлении 10 МПа. Для сравнения в качестве базового режима был выбран режим ИР со следующими параметрами: $U_0 = 30$ кВ; емкость конденсаторной батареи $C = 2,3$ мкФ; запасенная энергия $W \approx 1$ кДж, что близко к параметрам электроразрядного оборудования для обработки скважин [18].

В работах [21, 22] отмечается, что при ЭВП в результате экзотермической реакции испаряющегося металла с продуктами разложения жидкости увеличивается амплитуда волны давления. Сделанный авторами вывод предполагает, что применение ЭВП позволит снизить рабочее напряжение без ущерба для эффективности ЭТ. Поэтому в рамках данной работы проводились исследования на уровне зарядного напряжения – 3, 7,5 и 10 кВ, при неизменной энергии разряда – 1 кДж.

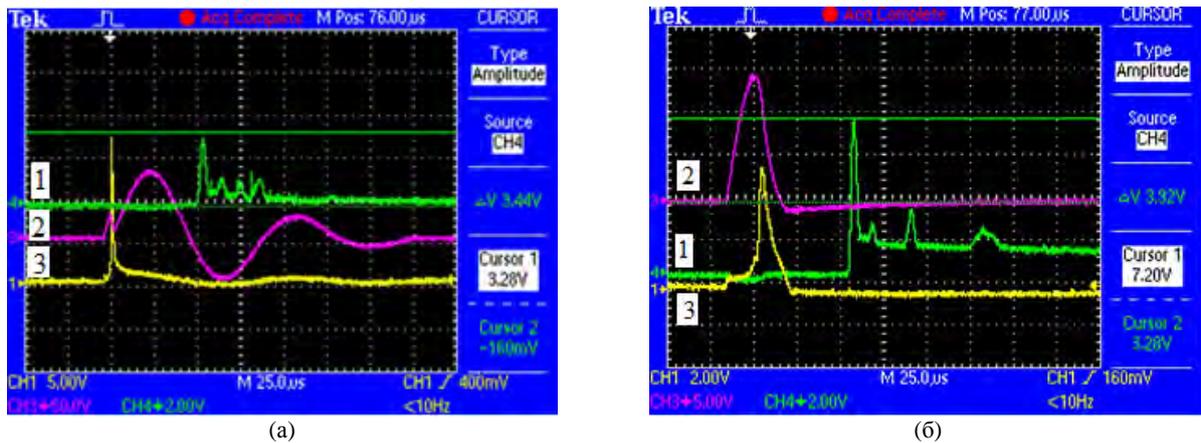


Рис. 5. Характерные осциллограммы гидродинамических (1 – генерированная волна давления) и электрических (2 – разрядный ток; 3 – напряжение на разрядном промежутке) при ЭВП: (а) – медный проводник диаметром 0,14 мм; (б) – алюминиевый проводник диаметром 0,5 мм.

Таблица 2. Результаты экспериментальных исследований амплитуд волн давления, генерированных электрическим взрывом в жидкости

Искровой разряд/ЭВП (материал; диаметр, мм)	U_0 , кВ	P_{hs} , МПа	P_{max} , МПа	Δ , %	P_{MAX} , МПа	P_{MIN} , МПа	δP_{MM} , %
Искровой разряд	30	10	14,6	18,7	17,1	8,3	51,5
ЭВП (Al; 0,5)	3	10	20,4	6,9	22,4	18,7	16,3
	7,5	10	59,5	3,9	62,2	56,8	8,6
	10	10	53,3	8	61	49,2	19,3
ЭВП (Cu; 0,14)	3	10	7,2	9,2	7,7	6	21,4
	7,5	10	14,3	5,8	15,3	13,3	12,8
	10	10	15,1	3,5	15,6	14,4	7,8
ЭВП (Cu; 0,5)	3	10	22,1	9	24,5	19,2	21,7

Как известно, на протекание процесса электровзрыва существенное влияние оказывает диаметр проводника. При взрыве тонкого иницирующего проводника почти вся запасенная в конденсаторах энергия выделяется в канале, образованном продуктами взрыва [5]. При взрыве металлического проводника большего диаметра картина меняется, что отображается на протекании электрических процессов. Поэтому в рамках данной работы проводились исследования на проводниках двух диаметров: 0,14 и 0,5 мм. На рис. 5 приведены характерные осциллограммы некоторых режимов взрывов проводников разных диаметров (на разных режимах использовались волноводные датчики с разной чувствительностью).

При проведении экспериментальных исследований длина медного иницирующего проводника диаметром 0,14 мм была выбрана из условия оптимизации (1) генерированной волны давления по ее амплитудному значению (величина искровой постоянной для иницируемых проводником разрядов $0,25 \cdot 10^5$ В с/м²) [6]. При электрическом взрыве проводников большего диаметра (в нашем случае 0,5 мм) подобная зависимость отсутствует. Поэтому для определения его длины использовалось выражение из условия, обеспе-

чивающего максимальную скорость выделения энергии в разрядном промежутке, которое включает в себя два согласованных выражения для определения длины и диаметра проводника [5]. В данной работе было принято фиксированное значение диаметра проводника, поэтому использовалось только выражение для определения длины (2):

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

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

Исследования проводились на алюминиевых и медных проводниках. Для каждого режима выполнялось по пять измерений (исключением являлся базовый режим, где выполнено 10 повторений) и определялось среднеквадратическое отклонение полученных результатов (Δ). Результаты экспериментов приведены в табл. 2.

В табл. 2 приняты следующие обозначения: U_0 – зарядное напряжение, кВ; P_{hs} – величина гидростатического давления, МПа; P_{max} – амплитуда генерированной волны давления; Δ – сред-

неквадратическое отклонение полученных экспериментальных данных, %; P_{MAX} , P_{MIN} – максимальное и минимальное значения измеренной амплитуды волны давления в данной серии экспериментов соответственно, МПа; $\delta P_{MM} = 100(P_{MAX} - P_{MIN})/P_{MAX}$.

Анализ представленных в табл. 2 результатов показывает, что использование ЭВП в сравнении с ИР значительно стабилизирует параметры генерированной волны давления за счет сохранения постоянства пространственного расположения канала разряда и его характеристик. Так, во всех экспериментальных режимах среднеквадратичное отклонение полученных результатов по амплитуде волны давления при ЭВП менее 10%, тогда как при искровом разряде оно составляет 18,7%. Еще более показателен в этом плане введенный нами параметр δP_{MM} – отношение разности между максимальным и минимальным значениями измеренной на одном экспериментальном режиме амплитуды волны давления к ее максимальному значению. Для всех режимов ЭВП он не превышает 22%, а в случае искрового разряда – 51,5%.

При сравнении амплитуд генерированных ИР и ЭВП волн давления с помощью искрового разряда и ЭВП можно отметить, что даже в случае взрыва инициирующего медного проводника диаметром 0,14 мм при зарядном напряжении 7,5 и 10 кВ амплитуда волны давления соизмерима с амплитудой при ИР, но на напряжении 30 кВ. В случае ЭВП диаметром 0,5 мм при зарядном напряжении 3 кВ наблюдается увеличение амплитуды ($\approx 40\%$ при случае взрыва алюминиевого проводника и $\approx 50\%$ в случае взрыва медного проводника по сравнению с базовым режимом). Повышение зарядного напряжения до 7,5 кВ при взрыве алюминиевого проводника диаметром 0,5 мм приводит к увеличению амплитуды воздействия \sim в 3 раза по сравнению с ИР.

Значительное повышение амплитуды генерированной волны давления с увеличением диаметра взрывающегося проводника скорее всего связано с тем, что при взрыве тонкого проводника (осциллограмма тока приведена на рис. 5а) вся запасенная в конденсаторах энергия выделяется в канале разряда, который служит практически единственным источником волны давления. С увеличением диаметра проводника (рис. 5б) повышается влияние непосредственно взрыва проволоки на процесс образования волны давления. Это подтверждает вывод, сделанный в [23].

Отдельный интерес представляет замеченное влияние зарядного напряжения на амплитуду волны давления при ЭВП (рис. 6).

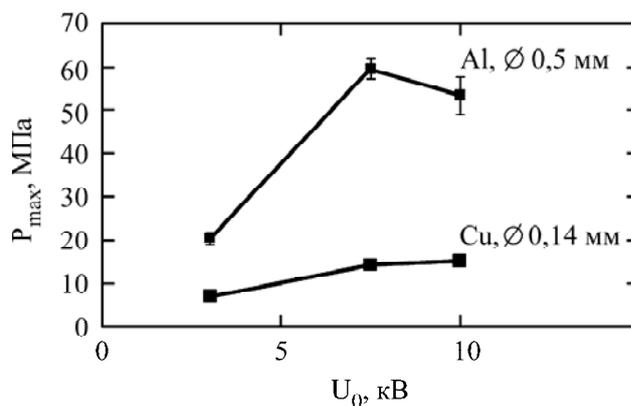


Рис. 6. Зависимость амплитуды волны давления от зарядного напряжения при ЭВП.

Анализ полученных зависимостей показывает, что при изменении напряжения от 3 до 7,5 кВ происходит увеличение амплитуды волны давления. Последующий рост зарядного напряжения не приводит к ее увеличению. По нашему мнению, это связано с тем, что при ЭВП для определенных параметров разрядного контура и типа его материала существуют свои оптимальные значения геометрических размеров проводника, которые определяют максимальную амплитуду волны давления. Об этом напрямую и косвенно свидетельствуют результаты ряда работ [5, 6, 23]. В нашем случае возможен вариант, когда режим при 7,5 кВ был ближе к оптимальному по амплитуде генерированной волны давления, чем при 10 кВ. Однако этот результат требует проведения дальнейших исследований, которые позволят сделать окончательный вывод.

ВЫВОДЫ

Результаты проведенных экспериментальных исследований позволяют сделать вывод, что уменьшение индуктивности и увеличение зарядного напряжения приводят к увеличению амплитуды волны давления, генерированной ИР в жидкости. При этом для увеличения амплитуды генерированной волны давления при неизменной энергии разряда предпочтительнее повышение уровня зарядного напряжения.

Сравнение волн давления генерированных ЭВП и ИР показало, что использование ЭВП стабилизирует параметры генерируемой волны давления – среднеквадратичное отклонение полученных результатов по амплитуде волны давления при электрическом взрыве проводника менее 10%, тогда как при искровом разряде оно составляет 18,7%. Кроме того, ЭВП по сравнению с ИР при той же запасенной энергии позволяет повысить амплитуду волны давления (взрыв алюминиевого проводника диаметром 0,5 мм увеличивает амплитуду волны давления \sim в 3 раза) и одновременно снизить уровень зарядного напряжения.

При проведении дальнейших исследований по ЭВП представляет интерес влияние длины проводника (при прочих его фиксированных параметрах) на амплитуду волны давления в замкнутых объемах при высоких давлениях для различных параметров разрядного контура с выбором его оптимального значения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вовченко А.И. *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. Гулый Г.А. *Основы разрядно-импульсных технологий*. Киев: Наукова думка, 1990. 208 с.
3. Курец В.И., Соловьев М.А., Жучков А.И., Барская А.В. *Электроразрядные технологии обработки и разрушения материалов*. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2012. 272 с.
4. Кудимов Ю.Н., Казуб В.Т., Голов Е.В. *Вестник ТГТУ*. 2002, **8**(2), 253–264.
5. Кривицкий Е.В. *Динамика электровзрыва в жидкости*. Киев: Наукова думка, 1986. 208 с.
6. Шамко В.В., Кучеренко В.В. *Теоретические основы инженерных расчетов энергетических и гидродинамических параметров подводного искрового разряда*. Николаев: ИИПТ НАН Украины, 1991. 52 с.
7. 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.
8. Смирнов А.П., Швец И.С., Жекул В.Г., Поклонов С.Г. и др. *Геотехническая механика*. 2014, **114**, 132–141.
9. Сизоненко О.Н. *Электроразрядный метод воздействия на структуру пористых материалов*. Киев: НПП Интерсервис, 2015. 300 с.
10. Zhekul V.G., Poklonov S.G., Smirnov A.P. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2011, **47**(1), 89–93.
11. Жекул В.Г., Поклонов С.Г., Швец И.С. *Нефтяное хозяйство*. 2006, (2), 89–91.
12. Yan D., Bian D., Zhao J., Niu S. *Shock and Vibration*. 2016, Article ID, 6412309.
13. Li X., Chao Y., Wu J., Han R. et al. *J Appl Phys*. 2015, **118**(2), 023301.
14. Krasik Ya., Fedotov A., Sheftman D., Efimov S. et al. *Plasma Sources Sci Technol*. 2010, **19**(3), 034020.
15. Хайнацкий С.А. *ЭОМ*. 2009, (5), 57–64.
16. Кортхонджия В.П., Мдивнишвили М.О., Саралидзе З.К. *ЖТФ*. 2006, **76**(11), 43–46.
17. 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.
18. Швец И.С., Курашко Ю.И., Хвоцан О.В., Литвинов В.В. и др. *Наука та інновації*. 2008, **4**(6), 54–59.
19. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. *Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде*. Киев: Наукова думка, 1979. 208.
20. Щерба А.А., Косенков В.М., Жекул В.Г., Поклонов С.Г. *Техническая электродинамика*. 2004, (3), 23–26.
21. Кортхонджия В.П., Мдивнишвили М.О., Тактакишвили М.И. *ЖТФ*. 1999, **69**(4), 41–43.
22. Мдивнишвили М. О., Кортхонджия В.П. *Письма в ЖТФ*. 1999, **25**(13), 10–14.
23. Коротков В.А., Несветайлов Г.А. *Физика горения и взрыва*. 1970, (2), 250–252.

Поступила 10.11.16

Summary

The experimental investigations of the amplitude of the pressure wave carried out as generated by an electrical explosion in a closed volume of liquid at elevated hydrostatic pressures. In the process of experiments, the influence of characteristics of the discharge circuit on the amplitude of the pressure wave in underwater spark discharge is evaluated, and the spark discharge is compared with the electric explosion of a conductor by this parameter. The results showed that the decrease in inductance and increase in the charging voltage lead to an increase in the amplitude of the pressure wave generated by the underwater spark discharge. The application of an electric explosion of a conductor stabilizes the parameters of the generated pressure wave and allows increasing the amplitude, meanwhile reducing the charging voltage rate.

Keywords: electric explosion of conductor, underwater spark discharge, amplitude of pressure wave, discharge circuit parameters, closed volume of liquid.