

обработки, не позволяет достичь такой же глубины протекания реакции растворения, как при совместном применении обоих вариантов обработки. Это свидетельствует о наличии *синергидного эффекта* в изучаемом процессе.

Таким образом, показана принципиальная возможность замены высококонцентрированных агрессивных растворов процесса обогащения алмазных спеков экологически более безвредным реагентом (нитрат аммония – это, как известно, удобрение) при совместном использовании электро-разрядной обработки и химического реагента.

Авторы выражают благодарность В.М. Скидану за предоставление возможности использования электроразрядной установки “Лабораторная”.

ЛИТЕРАТУРА

1. Синтетические сверхтвердые материалы. В 3-х т. Т. 1. Синтез сверхтвердых материалов. Киев, 1986.

Поступила 09.10.2000

Summary

In the paper the possibility of electrodischarge processing is studied with the purpose of intensification of process of dissolution of metal catalysts which are included in a structure of synthetic diamond. It has been shown, that in this case replacement of strong solutions of acids for ecological more harmless solution of ammonium nitrate is possible. With usage of a methods of a raster submicroscopy and photometric analysis the satisfactory condition of diamond after electrodischarge treatment and practical full deleting of metals - catalysts were demonstrated. The existence of *synergistic* effect at combined using of a chemical reactant and electrodischarge treatment upon metal components diamond has been supposed.

В.В. Кучеренко, Ж.Н. Ищенко, В.В. Сидорук, Л.З. Богуславский

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ДАВЛЕНИЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ПОДВОДНОГО ИСКРОВОГО И КОРОННОГО РАЗРЯДОВ.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-а, 54018, г. Николаев, Украина*

1. Введение

Подводный искровой разряд (ПИР) характеризуется полным пробоем межэлектродного промежутка. Образованный при этом плазменный канал сплошной проводимости расширяется под действием выделенной в нем энергии разрядного контура, создавая волны давления в окружающей жидкости [1, 2]. В отличие от ПИР при коронном разряде в сильных электролитах (КР) происходит частичный пробой межэлектродного промежутка. Начиная с некоторого предельного значения проводимости жидкости ($\sigma_0 \geq 3$ См/м), разветвленная лидерная система превращается в сплошное плазменное образование, повторяющее форму поверхности острия положительного электрода и расширяющееся под действием выделенной в нем энергии [3]. Механическое действие ПИР и КР может быть сравнимым из-за сравнимого у них времени выделения энергии в разрядном промежутке. Интерес к КР возрос в связи с возможностью его практического использования [4–6].

Экспериментальные данные об импульсе давления $P(t)$ в ближней зоне ПИР и КР представляют значительный интерес при разработке технологий импульсной обработки различных матери-

лов, а также для корректного математического моделирования процесса с целью определения гидродинамических характеристик разряда. Особенно это относится к КР, слабо изученному по сравнению с ПИР.

Измерение давлений вблизи канала разряда, а особенно в его плазменной области, представляет значительные трудности. Это связано прежде всего с механическим разрушением датчика под действием высоких давлений и температур, а также с искажениями измеряемого сигнала высоким уровнем электромагнитных помех.

Наиболее достоверные сведения о гидродинамических характеристиках ПИР получены при использовании миниатюрных турмалиновых датчиков давления объемного действия (ТДД), помещаемых на значительном расстоянии от канала разряда [7–9]. Волна давления от разряда действует непосредственно на пьезоэлемент ТДД через защитный слой из затвердевшей эпоксидной смолы. Однако на показания ТДД сильно влияют высокая электропроводность электролита и пирозлектрический эффект турмалина.

Для регистрации волн давления вблизи канала ПИР [10] и КР [11, 12] пьезоэлектрические волноводные датчики давления (ПВДД), в которых пьезоэлектрический диск располагается в центре составного стержня, имеют ряд преимуществ по сравнению с другими конструкциями датчиков. Это возможность защиты пьезоэлемента от высоких давлений и температур, агрессивных и проводящих сред, электромагнитных полей и пр. [13–15].

Цель настоящей работы – исследовать возможность использования ПВДД для регистрации волн давления в ближней зоне ПИР и КР и оценки давлений в плазменном образовании КР.

2. Методика экспериментов

Апробация датчиков ПВДД проводилась с помощью ПИР, как более изученного процесса. Для сравнения использовались показания датчиков ТДД, рассчитывались значения амплитуды давления P_m по известным аналитическим зависимостям для ПИР, проводились численные расчеты P_m и $P(t)$ по известным математическим моделям ПИР и КР. Контроль режима энергетических и временных характеристик разрядов осуществлялся с помощью осциллограмм разрядного тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ на межэлектродном промежутке l_p .

Регистрация волн давления, образующихся при ПИР, проводилась в разрядной камере размером 0,4·0,4·0,5 м³ с системой электродов типа "стержень – стержень". Камера заполнялась водой с удельной электропроводностью $\sigma_0 \approx 3 \cdot 10^{-2}$ См/м. Стабилизация положения канала разряда осуществлялась с помощью микропроводника диаметром 0,01 мм. Предпробивные потери энергии при этом отсутствовали. Датчик давления располагался на расстоянии $r = 75$ мм над межэлектродным промежутком в его экваториальной плоскости. Такое расстояние выбрано, исходя из условия, чтобы время прихода волн сжатия к датчику было несколько больше времени протекания тока в разрядной цепи, что позволяло значительно уменьшить влияние электромагнитного поля разряда на регистрируемый сигнал. Вариация режимов разряда при запасенной энергии $W_0 = 50$ Дж осуществлялась за счет изменения длины промежутка l_p от 6,5 до 38 мм. Это позволило реализовать режимы от сильно колебательного с большой амплитудой до критического (близкого к апериодическому).

Измерение давлений, возникающих в жидкости при КР, производилось в разрядной камере цилиндрической формы, диаметром 0,12 м и высотой 0,38 м, которая заполнялась водным раствором NaCl с электропроводностью $\sigma_0 = 5–8,4$ См/м. В качестве положительного электрода использовался металлический стержень в полиэтиленовой изоляции с радиусом закругления стержня $r_s = 2,5–5$ мм. Отрицательным электродом при КР служил металлический корпус разрядной камеры.

Датчик давления располагался вертикально над электродом, соосно с ним и на расстоянии r от него. При этом r изменялось от 0 до 75 мм.

Электротехнические параметры разрядного контура изменялись в диапазоне: зарядное напряжение $U_0 = 10–30$ кВ, емкость батареи конденсаторов $C = 1–3$ мкФ, индуктивность разрядного контура $L = 2,4–3,8$ мкГн.

Измерение давлений проводилось сериями из 3–5 разрядов, результаты усреднялись. При этом отклонение от среднего значения амплитуды P_m не превышало 10%.

3. Датчики давления

В используемом для сравнения датчике ТДД чувствительный элемент состоял из двух турмалиновых пластинок размером 0,3·0,5·0,2 мм³, которые расположены под определенным углом друг к другу и приклеены к медным электродам. Корпус датчика изготовлен из эпоксидной смолы с наполнением кварцевым песком [7].

Датчик ПВДД состоял из двух цилиндрических стержней-волноводов одинакового диаметра, между которыми находилась таблетка из пьезокерамики ЦТС-19 толщиной 0,5–0,7 мм (рис. 1). Параметры использованных ПВДД (датчики Д1–Д4) приведены в таблице: длина первого волновода (предволновода) l_1 и второго l_2 ; их диаметр d , толщина пьезокерамики δ , материал, из которого выполнены волноводы, чувствительность датчиков γ .

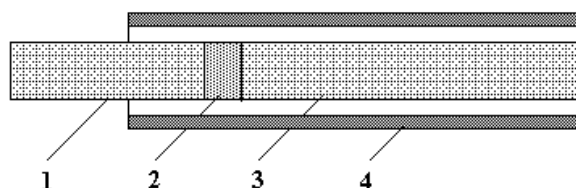


Рис. 1. Схема пьезоэлектрического волноводного датчика давления:

1 – первый волновод (предволновод); 2 – пьезокерамика; 3 – второй волновод; 4 – корпус-экран.

В предволноводе формируется плоский фронт волны с тем, чтобы обеспечить равномерное по сечению давление на пьезокерамику. Второй волновод должен обеспечить условие, при котором отраженная от его торца волна не будет вносить искажений в регистрируемый сигнал.

Значения акустического сопротивления (импеданса) материалов, из которых изготовлены волноводы и пьезоэлемент, выбирались по возможности близкими с целью значительного уменьшения колебаний сигнала за счет отражения продольных волн от границ раздела сред (медь – $3,3 \cdot 10^7$ кг/м²·с, латунь – $2,9 \cdot 10^7$ кг/м²·с, керамика – $1,7 \cdot 10^7$ кг/м²·с, пьезокерамика – $2,1 \cdot 10^7$ кг/м²·с). Однако, как отмечалось в [16], даже при идеальном совпадении импедансов материалов стержней и пьезокерамики наблюдаются радиальные колебания сигнала с датчика как следствие трехмерного эффекта механических напряжений в твердом теле. Чем меньше отношение модуля Пуассона ν к модулю Юнга E материала второго волновода, тем меньше эти колебания. Из использованных волноводов (см. таблицу) наименьшее отношение ν/E у латуни, а наибольшее – у керамики.

Параметры ПВДД

Датчик	I волновод		II волновод		d , мм	δ , мм	γ , 10^{-6} В/Па
	материал	l_1 , мм	материал	l_2 , мм			
Д1	керамика	140	керамика	140	10	0,7	7,5
Д2	медь	12	медь	100	2,5	0,5	0,96
Д3	керамика	30	керамика	107	10	0,7	5,8
Д4	керамика	24	латунь	97	4	0,7	0,91

Для уменьшения влияния электромагнитных полей датчик помещался в металлический корпус – экран. У датчика Д2 экран покрывал оба волновода, а зазор между экраном и волноводами заливался силиконовым каучуком [17]. У датчиков Д1, Д3, Д4 предволновод выступал из корпуса (см. рис. 1). Это позволяло устранить возможность электрического пробоя на корпус датчика при малых r , а особенно при $r \approx 0$.

Согласно сведениям, приведенным в [17], при $l_1/d \gg 1$ время нарастания сигнала τ_m зависит от размеров и материала стержня как

$$\tau_m \approx \nu^{2/3} (l_1/d)^{1/3} (d/c_0). \quad (1)$$

Здесь c_0 – скорость распространения продольных волн в стержне. Из расчетов по этой зависимости следует, что для датчика Д2 время $\tau_m \approx 0,5$ мкс в 8 раз меньше, чем для Д1. Соответственно значения t_ϕ – время достижения амплитуды волны давления P_m , определенные датчиком Д2, должны быть более точными.

Относительная длина предволновода l_1 , согласно сведениям из [17], должна быть $l_1 \approx (2-4)d$. Для датчика Д2, имеющего металлические волноводы, это условие выполняется. Датчик Д4, имеющий керамический предволновод малого диаметра, быстро выходил из строя из-за механического разрушения предволновода, особенно в месте крепления его к пьезокерамике.

Калибровка датчиков производилась на специальной установке для динамической калибровки широкополосных датчиков давления, работающей на принципе соударения баллистического маятника с волноводной системой [18]. При тарировке датчиков наблюдалась зависимость

чувствительности датчика от глубины его погружения в жидкость h . При $h > 30-40$ мм такая зависимость исчезала, и полученные γ использовались при экспериментальном определении $P(t)$.

Согласно [13, 14] при регистрации давления с помощью ПВДД погрешность измерений может быть обусловлена дифракцией волны на датчике, внутренними отражениями в волноводе, конечными размерами его приемной поверхности, электрическими переходными процессами в пьезокерамике и измерительной цепи, конструктивным исполнением датчика, качеством контакта пьезокерамика – волновод и пр.

4. Результаты экспериментов

Характерные осциллограммы давления $P(t)$ для ПИР, полученные с помощью датчиков ТДД (а, г) и ПВДД (б, в, д, е) для критического (а, б, в) и колебательного (г, д, е) режимов, приведены на рис. 2.

В случае критического режима ПИР осциллограмма давления представляет собой полуволну с последующими слабо выраженными колебаниями. Очевидно, что причина этих колебаний кроется в отмеченных выше погрешностях измерений давлений датчиками. В случае колебательного режима амплитуда этих колебаний значительно увеличивается.

С помощью осциллограмм тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ установлено, что основная доля энергии разрядного контура W_I выделяется за время первого полупериода колебаний тока τ_I . Энергия W_I и скорость ее выделения определяют амплитуду волны давления P_m и время ее достижения t_ϕ . При $l_p = 38$ мм время $\tau_I = 9,7$ мкс при длительности протекания разрядного тока $\tau_p = 22$ мкс. А при $l_p = 6,5$ мм время $\tau_I = 6,2$ мкс, $\tau_p = 70$ мкс. Различие времен τ_I и τ_p отразилось соответственно на осциллограммах $P(t)$.

Наибольшая крутизна фронта волны давления наблюдалась для сигнала с датчика Д2 (см. рис. 2, в, е). Времена t_ϕ для датчиков ТДД и Д2 близки и практически совпадают со временем достижения максимума электрической мощности N_m , рассчитанной из осциллограмм $I(t)$ и $U(t)$.

Изменение времени t_ϕ для сигналов с разных датчиков ПВДД находилось в соответствии с зависимостью (1). Так, датчик Д1, у которого диаметр волновода в 4 раза, а длина l_1 почти на порядок больше, чем у Д2 (см. таблицу), увеличивает t_ϕ в ~ 2 раза (см. рис. 2, д, е).

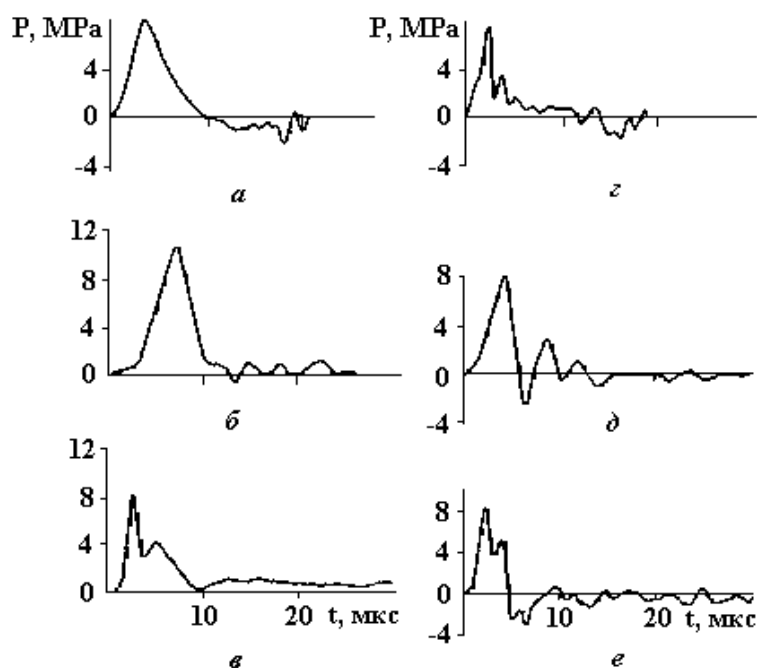


Рис. 2. Характерные осциллограммы давления в ближней зоне ПИР.

$U_0 = 10$ кВ, $C = 1$ мкФ, $r = 75$ мм: а – ТДД, $l_p = 38$ мм; б – Д1, $l_p = 38$ мм; в – Д2, $l_p = 38$ мм; г – ТДД, $l_p = 6,5$ мм; д – Д1, $l_p = 6,5$ мм; е – Д2, $l_p = 6,5$ мм.

Давление P_m для ПИР при $l_p = 38$ мм, измеренное датчиками ТДД, Д1 и Д2 составляло 8,1–11 МПа, а при $l_p = 6,5$ мм давление $P_m = 7,5-9,7$ МПа. Кривые $P(t)$ для этих режимов существенно отличаются.

В отличие от ПИР, осциллограммы $I(t)$ и $U(t)$ для КР в сильных электролитах ($\sigma_0=5-8$ См/м) имели аperiodический характер (без колебаний). Энергия разрядного контура выделялась в разрядном промежутке в течение ~ 50 мкс, причем основная ее часть, как и для ПИР, – в течение первых 10 мкс.

Характерные осциллограммы давления $P(t)$ в ближней зоне КР, полученные с помощью ПВДД (рис. 3), имеют колебательный характер, особенно с датчика Д1. По виду они близки к осциллограммам $P(t)$ для ПИР при колебательном режиме (см. рис. 2, *d, e*), сдвинутым вправо вдоль оси времени. Уменьшение радиуса электрода от 5 до 2,5 мм ведет к значительному уменьшению давления P_m амплитуды колебаний сигнала. Общим для процессов КР и ПИР при $l_p=6,5$ мм является значительно большее, по сравнению с ПИР при $l_p=38$ мм, время электрического процесса τ_p , соответственно дольше действие электромагнитного поля на сигнал с датчика.

Для КР время достижения амплитуды P_m в 2–3 раза больше, чем для ПИР, за счет нарастающих давлений перед основным сигналом (см. рис. 2, 3). Возможно, что из-за более высокого уровня давлений на осциллограммах $P(t)$ для ПИР такие низкие давления могли не фиксироваться осциллографом. Тогда t_ϕ для ПИР и КР должны быть близкими, что находится в соответствии с временем достижения амплитуды N_m на кривых мощности для этих разрядов.

Сравнение показало, что давление P_m для КР значительно ниже, чем для ПИР, при одинаковых режимах и расстояниях r . Однако при реализации КР уменьшение радиуса электрода и увеличение напряжения U_0 ведет к значительному повышению P_m .

Время появления отрицательных давлений на осциллограммах с датчика Д2 (см. рис. 3, *z, d, e*) близко ко времени двойного пробега звуковой волной давления длины медного предволновода ($\sim 6,5$ мкс).

Это свидетельствует о сильном влиянии на импульс давления граничной поверхности предволновода – вода из-за низкого акустического импеданса воды (в 22 раза ниже, чем у меди). При взаимодействии внутренних отраженных волн с торцом предволновода, граничащим с водой, внутрь стержня распространяется волна разгрузки (разрежения), которая догоняет полезный сигнал и интерферирует с ним. Это необходимо учитывать при выборе параметров предволновода l_1 .

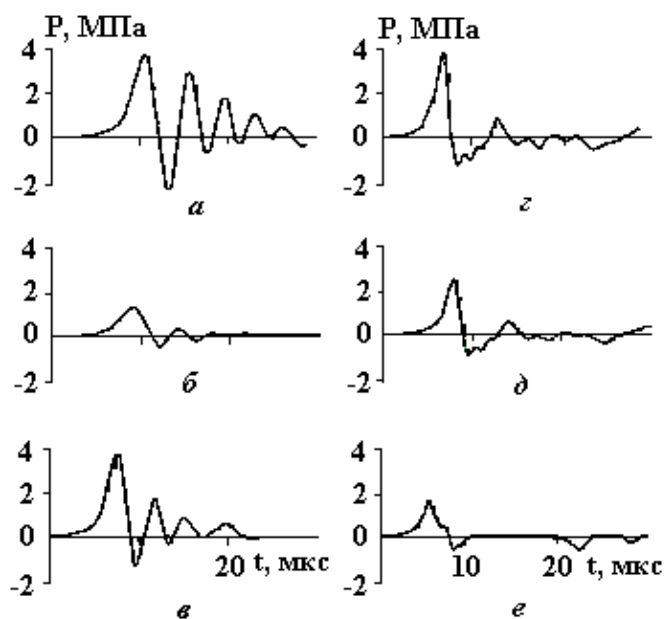


Рис. 3. Характерные осциллограммы давления в ближней зоне КР при различных режимах ($\sigma_0=5$ См/м): *a* – Д1, $U_0=15$ кВ, $C=1$ мкФ, $r_3=2,5$ мм, $r=15$ мм; *б* – Д1, $U_0=30$ кВ, $C=1$ мкФ, $r_3=5$ мм, $r=33$ мм; $U_0=15$ кВ, $C=1$ мкФ, $r_3=2,5$ мм; *в* – Д3, $r=33$ мм; *г* – Д2, $r=20$ мм; *д* – Д2, $r=30$ мм; *е* – Д2, $r=50$ мм.

Увеличение расстояния от электрода r (рис. 4) приводит к резкому уменьшению давления P_m при $r < 20$ мм. Затем скорость падения P_m значительно снижается, особенно при $r > 40$ мм. Такая зависимость характерна и для ПИР. По сравнению с датчиком Д1 зависимость $P_m=f(r)$ для датчика Д2 лежит несколько выше.

Характерные осциллограммы давления $P(t)$, полученные датчиком с неметаллическим волноводом Д1 при КР для $r=0$, приведены на рис. 5. Они в какой-то степени характеризуют давление в плазменной области коронного разряда $P_k(t)$ КР при различных режимах и радиусах электрода. Здесь, как и на рис. 3, с уменьшением радиуса r , от 5 до 2,5 мм увеличиваются максимальное давление P_k^m и колебания кривой $P_k(t)$.

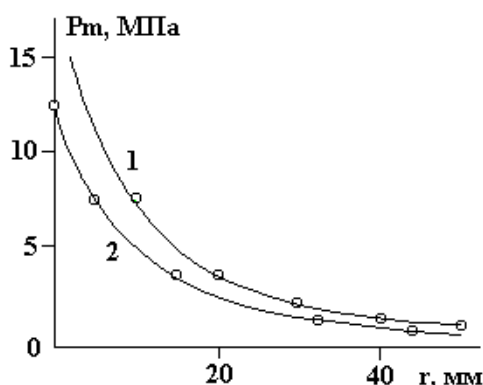


Рис. 4. Зависимость давления P_m при КР от расстояния до электрода. $U_0=15$ кВ, $C=1$ мкФ, $L=2,4$ мкГн, $r_3=5$ мм, $\sigma_0=5$ См/м; 1 – Д2; 2 – Д1.

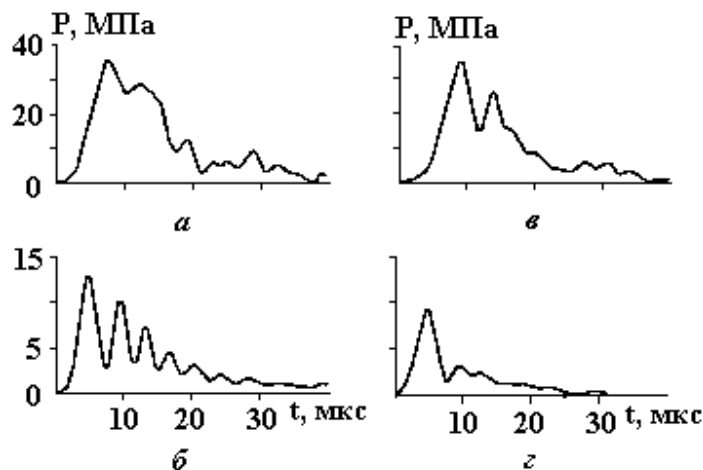


Рис. 5. Характерные осциллограммы давления КР при $r=0$ (датчик Д1): а, в – $U_0=11$ кВ, $C=3$ мкФ, $r_3=3$ мм, $\sigma_0=8,4$ См/м; $U_0=15$ кВ, $C=1$ мкФ, $\sigma_0=5$ См/м: б – $r_3=2,5$ мм, з – $r_3=5$ мм.

Следует указать на довольно быстрое разрушение пьезокерамики датчиков ПВДД, особенно при повышении напряжения U_0 . Жесткий корпус из нержавеющей стали, как у Д2, делал датчик более стойким. В проведенных исследованиях датчики выдерживали до ремонта от 10 до 60 разрядов. Чтобы избежать дополнительного искажения сигнала приходилось убирать пузырьки воздуха с торца предволновода перед каждым разрядом.

Измеренные датчиками ПВДД давления в плазменной области P_k^m для различных режимов и радиусов r , составили $1,3 \cdot 10^7 - 1,1 \cdot 10^8$ Па. Наибольшее значение P_k^m получено с помощью датчика Д4.

Авторы выражают признательность В.М. Павлихину за изготовление датчиков давления Д2 и ТДД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект. М.–Л., 1955.
2. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта / Под ред. Г.А. Гулого. М., 1977.
3. Богуславский Л.З., Кривицкий Е.В., Петриченко В.Н. Коронный разряд в водных электролитах // Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий. Вып.1. Киев, 1993. С. 8–13.

4. Электроискровой источник упругих волн для целей сейсморазведки / Под ред. А.В.Калинина. М., 1989.
5. Богуславский Л.З., Кривицкий Е.В., Петриченко В.Н. Плазменные фильтры для обеззараживания сточных вод // Электронная обработка материалов. 1995. № 1. С. 22–26.
6. Рогов И.А., Афанасьев Э.Э., Гавриленкова Т.Е. Применение импульсных электрических разрядов в сильных электролитах для интенсификации массообменных процессов // Там же. 1977. № 1. С. 35–36.
7. Синани И.Б. Турмалиновые индикаторы ударных волн в жидкостях // Приборы и техника эксперимента. 1957. № 4. С.85–89.
8. Синани И.Б. Устранение некоторых искажений при регистрации ударных волн в воде // Журн. прикл. механ. и техн. физики. 1960. № 2. С. 128–131.
9. Окунь И.З. Исследование волн сжатия, возникающих при импульсном разряде в воде // Журн. техн. физики. 1971. Т. 41. Вып. 2. С. 292–301.
10. Кучеренко В.В. Экспериментальные исследования гидродинамических явлений электрического разряда в воде // Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий. Вып. 2. Киев, 1995. С. 20–25.
11. Богуславский Л.З., Кучеренко В.В., Кривицкий Е.В. Динамика импульсного коронного разряда в водных электролитах. Николаев, 1993. (Препринт/НАН Украины, ИИПТ №22).
12. Глуценко В.Ж., Жекул В.Г., Трофимова Л.П. Динамика импульсного электрического разряда в сильнопроводящих водных электролитах в условиях высоких гидростатических давлений // Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий. Вып. 2. Киев, 1995. С. 4–7.
13. Бескаравайный Н.М., Поздеев В.А. Теоретические основы измерения импульсных давлений в жидких средах. Киев, 1981.
14. Джонс и Власс. Датчики давления для исследований в области динамики плазмы и детонации // Приборы для научных исследований. 1967. № 8. С. 30–34.
15. Годонюк В.А., Журавлев Б.В., Шедько И.П. Широкополосный пьезоэлектрический датчик давления // Приборы и техника эксперимента. 1984. № 5. С. 214–217.
16. Йорк. Динамика напряжений в безынерционных пьезоэлектрических датчиках давления // Приборы для научных исследований. 1970. № 4. С. 31–33.
17. Рэгланд и Куллен. Пьезоэлектрический датчик давления с акустическим стержнем // Там же. 1967. № 6. С. 18–20.
18. Теляшов Л.Л., Чеканов Ю.С., Гнатенко Е.К. Установка для динамической калибровки широкополосных датчиков давления // Физические основы электрогидравлической обработки материалов. Киев, 1978. С.160–165.

Поступила 06.12.2000

Summary

The possibility of pressure measuring with the help of piezoelectric waveguide sensors (PWGS) in the near zone of underwater spark discharge (USD) and corona discharge (CD) in water electrolites with high values of the electrical conductivity was studied. The sensors used were distingwished by their dimensions and the waveguide material as well as by their screening. Comparison of the pressure oscillograms obtained with the use of the PWGD and the microsensor operating on the principle of volume action (Synany sensors) was conducted. Experimental data on the pressure distribution in water obtained with the use of the PWGS for USD and CD including the plasma region are presented.
