

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ДАВЛЕНИЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ПОДВОДНОГО ИСКРОВОГО И КОРОННОГО РАЗРЯДОВ ЧАСТЬ 2. СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ С РАСЧЕТНЫМИ

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

Данная работа является продолжением [1].

1. Расчеты

Представляет интерес сравнение экспериментальных значений амплитуды давления P_m , полученных в [1], с рассчитанными по полуэмпирическим зависимостям, приведенным в [2, 3].

Формула И.З. Окуня [2] получена для подводного искрового разряда (ПИР) и цилиндрической симметрии волны давления, когда расстояние от канала разряда $r < 2,5 \cdot l_p$, где l_p – длина разрядного промежутка. Тогда

$$P_m \approx \frac{0,46}{\sqrt{r}} \rho_0^{3/8} \left(\frac{W_1}{l_p} \right)^{5/8} T_1^{-3/4}, \quad [\text{Н/м}^2]. \quad (1)$$

Здесь ρ_0 – плотность невозмущенной жидкости; W_1 – энергия, выделенная в разрядном промежутке за время первого полупериода колебаний тока T_1 .

В отличие от (1), формула, приведенная в [3], позволяет рассчитать давление для волн соответственно цилиндрической, переходной к сферической и сферической симметрии в зависимости от величины отношения r/l_p :

$$P_m = P_0 \cdot b_1(\eta_1) \begin{cases} \bar{r}^{-0,6} & \text{при } r \leq 2,5 \cdot l_p, \\ 1,3 \bar{r}^{-0,5} (1 - 0,1r/l_p) & \text{при } 2,5 \cdot l_p \leq r \leq 5,5 \cdot l_p, \\ 1,7 \Pi_1 \bar{r}^{-1,1} & \text{при } 5,5 \cdot l_p \leq r \leq 200 \cdot l_p. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь P_0 , $b_1(\eta_1)$, Π_1 – функции от параметров разрядного контура, вид которых приведен в [3]; \bar{r} – безразмерное расстояние до канала разряда.

Рассчитывались значения P_m для режима ПИР: $U_0=10$ кВ, $C=1$ мкФ, $L=3,8$ мкГн, $r=75$ мм (см. таблицу) для критического ($l_p=38$ мм) и колебательного ($l_p=6,5$ мм) режимов по формуле (2) и только для критического – по формуле (1).

Наряду с этими значениями P_m в таблице приведены также экспериментальные величины P_m , полученные с помощью пьезоэлектрического волноводного датчика давления (ПВДД) Д1 (см. [1]), а также с помощью миниатюрного турмалинового датчика давления (ТДД) объемного действия.

Из таблицы следует удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных значений P_m как для критического, так и для колебательного режимов.

2. Восстановление сигнала

И.Б.Синани [4] предложил методику устранения искажений сигнала с датчиков ТДД. В таблице для $l_p=38$ мм приведено (в скобках) значение P_m , полученное согласно этой методики. Оно ближе по величине к определенной датчиком Д1. Применение этой методики для устранения искажений сигнала с датчиков ПВДД не представляется возможным из-за принципиальных различий конструкций ТДД и ПВДД. Волна давления в ПВДД не обтекает чувствительный элемент датчика. Кроме того, для ПИР аппроксимирование волны $P(t)$ экспонентой не всегда корректно.

Экспериментальные и расчетные значения давления P_m для ПИР

Датчик или литературный источник	$P_m, 10^6$ Па		Примечание
	$l_p=6,5$ мм	$l_p=38$ мм	
Эксперимент			
ПВДД	8,28	11,02	Датчик Д1
ТДД	7,5	8,10 (11.3)	
Расчет по формулам			
[3]	6,96	9,02	
[2]	-	10,26	
Восстановленное давление			
[5]	2,68	4,78	$d_{31}=-1,5 \cdot 10^{-10}$ К/Н
[5]	4,10	7,40	$d_{31}=-1,0 \cdot 10^{-10}$ К/Н
Математическое моделирование			
[7]	3,71	10,10	
[11]	3,81	7,12	

Поскольку устранение в полной мере на практике факторов, вносящих погрешность в процесс измерения импульсных давлений с помощью ПВДД, не представляется возможным, сделана попытка восстановления неискаженного профиля волны сжатия по результатам измерений согласно методике [5].

Математическая модель измерения давления с помощью ПВДД [5] включает задачу дифракции линейной акустической волны на абсолютно твердом теле датчика, линейную задачу распространения механических волн в составном волноводе, модель линейного пьезогенератора и описание процессов в линейной электрической цепи с сосредоточенными реактивными элементами.

В силу линейности каждой из задач искомое решение обратной задачи представлялось линейным интегральным оператором вида

$$P(t) = \int_0^t G(t-\tau) \cdot U_d(\tau) d\tau. \quad (3)$$

Здесь t – время; τ – параметр интегрирования; $G(t-\tau)$ – функция Грина обратной задачи измерения (вид этой функции приведен в [5]); U_d – напряжение, зарегистрированное прибором.

В качестве исходных данных использовались плотность материала и геометрические размеры составных волноводов и пьезокерамики, скорость звука в них, диэлектрическая проницаемость и пьезомодуль пьезокерамики, входные характеристики осциллографа (входное сопротивление и емкость). Расчеты выполнялись с помощью ПЭВМ по программе, разработанной автором методики Н.М. Бескаравайным.

Как следует из таблицы, давление P_m восстановленного сигнала ниже измеренных экспериментально и рассчитанных по аналитическим зависимостям.

Значение пьезоэлектрического модуля пьезокерамики d_{31} , используемой при изготовлении ПВДД, экспериментально не определялось, поэтому расчеты провели вблизи верхнего и нижнего значений границ диапазона изменения d_{31} в зависимости от состава пьезокерамики $d_{31} = (-93,5 - (-171)) \cdot 10^{-12}$ К/Н из [6]. При этом восстановленное давление P_m изменилось в $\sim 1,5$ раза (см. таблицу).

Известно, что величина пьезоэлектрического модуля может изменяться под действием многократных интенсивных нагрузений. Это сложно учесть при расчетах и приводит к необходимости тарировки датчика до и после серии измерений.

На рисунке показаны кривые $P(t)$ восстановленного сигнала по осциллограммам напряжения с датчика Д1, соответствующие экспериментальным кривым давления, приведенным на рис. 2,б,д из [1], для критического и колебательного режимов.

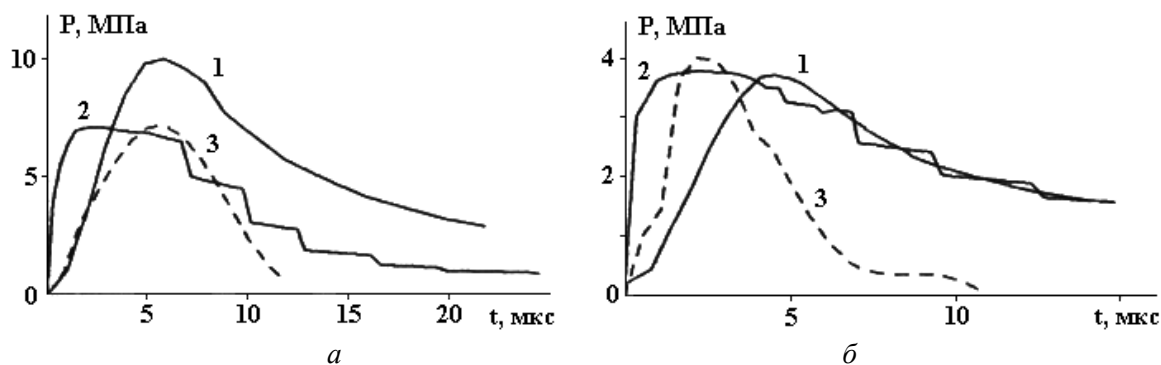
3. Численные расчеты по математическим моделям

Экспериментальные значения P_m для ПИР сравнивались с рассчитанными по гидродинамической модели ПИР в одномерной постановке [7]. В этой модели, как и в [8], движение жидкости описывалось известными уравнениями механики сплошных сред и уравнением состояния воды в форме Тэта. В качестве граничного условия использовалось уравнение баланса энергии в канале разряда [9]. Скорость выделения энергии в канале разряда (мощность) $N(t)$ определялась с помощью осциллограмм $I(t)$ и $U(t)$.

Гидродинамическую часть задачи в [7] решали численно методом характеристических направлений [10]. При этом шаг по пространству при удалении от канала разряда не превышал 0,5 мм. Полученные значения P_m близки к экспериментальным для критического, но занижены для колебательного режимов (см. таблицу). Очевидно, занижение вызвано использованием в расчетах при $l_p = 6,5$ мм сферической симметрии волны давления без учета областей цилиндрической и переходной к сферической симметрии.

Расчитанные по этой гидродинамической модели ПИР давления $P(t)$ для критического и колебательного режимов показаны на рисунке (кривые 1). На расчетных кривых (1) перед основным сигналом наблюдалось наличие постепенно нарастающих давлений, что, очевидно, обусловлено начальным участком кривой мощности $N(t)$.

В таблице и на рисунке приведены также соответственно значения P_m и кривые $P(t)$, полученные при решении гидродинамической задачи в двухмерной постановке с выделением ударной волны согласно методике [11]. При расчетах использовалась та же кривая мощности $N(t)$, что и в предыдущей задаче.



Давление $P(t)$, рассчитанное по гидродинамическим моделям [7] – (1) и [10] – (2) и восстановленное по [5] из осциллограммы напряжения с датчика ПВДД – (3). $U_0=10$ кВ, $C=1$ мкФ, $L=3,8$ мкГн, $r=75$ мм: а – критический режим; б – колебательный режим.

В основу решения гидродинамической задачи положена схема С.К. Годунова [12]. Расчетные (1, 2) и восстановленная (3) кривые $P(t)$ практически совпали по амплитуде давления для колебательного режима, при этом кривая (3) спадает гораздо круче. Экспериментальные кривые $P(t)$ в [1] ближе к расчетным по амплитуде для критического режима (см. таблицу).

Численное исследование гидродинамических характеристик коронного разряда в сильных электролитах проведено в [13]. Согласно гидродинамической модели, КР рассматривался как полусферический плазменный поршень, расширяющийся в сжимаемой жидкости под действием выделенной в нем энергии, рассчитанной с учетом экспериментальных данных.

Как и в эксперименте, численные исследования показали сильное влияние радиуса r_s на давление P_m . Увеличение же колебаний на экспериментальной кривой $P(t)$ при уменьшении r_s (см. [1]): может быть связано с отличием в формировании плазменной области при разных r_s . Это тем более вероятно, что выбранные режимы для КР находятся вблизи критического, когда полусферический плазменный поршень формируется полностью.

Осциллограммы $P(t)$ в плазменной области КР в [1] качественно совпадают (при сглаживании колебаний на спадающей части кривой) с расчетными кривыми давления в плазменной области КР, приведенными в [13, 14].

Расчетные значения амплитуды давления в плазменной области P_k^m , полученные в [13], для режима $U_0=30$ кВ, $C=2$ мкФ, $L=2,3$ мкГн, $\sigma_0=20$ См/м составили при $r_s=5$ мм и $r_s=2$ мм соответственно $7,1 \cdot 10^7$ Па и $2,5 \cdot 10^8$ Па. В работе [14] при несколько иной постановке задачи, чем в [13], для такого же режима при $\sigma_0=9$ См/м и $r_s=2$ мм получено расчетное значение $P_k^m = 6 \cdot 10^7$ Па. С увеличением σ_0 растет и P_k^m . Учитывая различия в исходных данных, приведенные расчетные значения P_k^m находятся в соответствии с полученными в настоящей работе с помощью ПВДД.

4. Заключение

С помощью ПВДД для нескольких режимов получены экспериментальные данные по давлению в ближней зоне ПИР и КР, в том числе и в плазменной области КР. Амплитуда давлений в

плазменной области КР на исследованных режимах составляла $1,3 \cdot 10^7 - 1,1 \cdot 10^8$ Па, что находится в соответствии с расчетными значениями этой величины.

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования показали, что датчики ПВДД могут использоваться для оценки уровня давлений в ближней зоне ПИР и КР, а также в плазменной области КР. Однако для определения импульса давления остаются актуальными вопросы устранения искажений или восстановления неискаженного сигнала по результатам измерений. При выборе параметров предволновода помимо прочих условий необходимо учитывать влияние на сигнал волн разгрузки от границы раздела предволновод – жидкость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кучеренко В.В., Ищенко Ж.Н., Сидорук В.В., Богуславский Л.З. Использование волноводных датчиков для регистрации давления в ближней зоне подводного искрового и коронного разрядов. 1. Экспериментальные исследования // Электронная обработка материалов. 2001. № 3. С. 36–42.
2. Окунь И.З. Исследование волн сжатия, возникающих при импульсном разряде в воде // Журн. техн. физики. 1971. Т.41. Вып. 2. С. 292–301.
3. Шамко В.В., Кучеренко В.В. Теоретические основы инженерных расчетов энергетических и гидродинамических параметров подводного искрового разряда. Николаев, 1991. (Препринт / НАН Украины, ИИПТ N20).
4. Синани И.Б. Устранение некоторых искажений при регистрации ударных волн в воде // Журн. прикл. механ. и техн. физики. 1960. № 2. С. 128–131.
5. Бескаравайный Н.М., Поздеев В.А. Теоретические основы измерения импульсных давлений в жидких средах. Киев, 1981.
6. Яффе Б., Кук У., Яффе Г. Пьезоэлектрическая керамика. М., 1974.
7. Ищенко Ж.Н., Семко А.Н. Гидродинамические давления от разряда внутри оболочки из резиноподобного материала за время расширения пузыря // Теория, эксперимент, практика электроразрядных процессов. Киев, 1992. С. 28–37.
8. Ищенко Ж.Н., Поздеев В.А., Семко А.Н. и др. Расчет гидродинамических давлений внутри цилиндрической оболочки при действии импульсного источника // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн.наук. 1985. N 1. С. 11–17.
9. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. М., 1971.
10. Атанов Г.А. Эффективный метод численного решения нестационарных уравнений газовой динамики. Донецк. 1988. Деп. в УкрНИИТИ. 10.08.88. N1879-УК88.
11. Барбашова Г.А., Иванов А.В. Расчет двухмерного нестационарного течения жидкости при подводном электрическом взрыве проволочек конечной длины // Гидромеханика. 1986. Вып. 53. С. 16–19.
12. Численное решение многомерных задач газовой динамики / Под ред. С.К. Годунова. М., 1976.
13. Ищенко Ж.Н. Численное исследование гидродинамических характеристик коронного разряда в высокопроводящей жидкости // Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий. Киев, 1995. Вып. 2. С. 51–59.
14. Богуславский Л.З., Кучеренко В.В., Кривицкий Е.В. Динамика импульсного коронного разряда в водных электролитах. Николаев, 1993. (Препринт / НАН Украины, ИИПТ N22).

Поступила 06.12.2000

Summary

Experimental data on the pressure distribution in the liquid medium obtained with the use of PWGS for USD and CD including the CD plasma region were compared with calculation results. An attempt was undertaken to restore the non-distorted pressure wave profile according to the measurement results. Comparison of the experimental data with the results of pressure pulse numerical calculation as well as with the calculated values of the pressure amplitude obtained with the use of the known analytical dependencies for USD has been conducted.