

**А. С. ТОРПАКОВ**, мл. науч. сотр., Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

**О. Н. СИЗОНЕНКО**, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

**Е. М. ШЕРЕГИЙ**, prof., PhD, DSc., Центр микроэлектроники и нанотехнологий Жешувского университета, Польша;

**С. В. ПРОХОРЕНКО**, dr.hab.inż., PhD, prof., Центр микроэлектроники и нанотехнологии Жешувского университета, Польша; Национальный университет «Львовская политехника», Львов;

**Э. И. ТАФТАЙ**, мл. науч. сотр., Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

## **ВЛИЯНИЕ СОСТАВА РАБОЧЕЙ СРЕДЫ НА АМПЛИТУДУ ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА**

Приведены результаты экспериментальных исследований амплитуды волны давления с помощью волноводного пьезоэлектрического датчика при высоковольтном электрическом разряде в воде, воде с добавлением порошка Ti, керосине и керосине с добавлением порошка Ti. Выполнено сравнение экспериментальных значений амплитуды давления с расчетными. Экспериментально установлено влияние типа дисперсионной среды, концентрации дисперсной фазы и параметров разрядного контура на амплитуду давления.

**Ключевые слова:** электрический разряд, порошок титана, концентрация, амплитуда давления, дисперсная система.

**Введение.** При разработке материалов, обладающих улучшенными физико-механическими и функциональными свойствами, используется подход, который связан с диспергированием частиц порошков и уменьшением размеров элементов структуры. Основные достижения и перспективы использования высокодисперсных порошков в порошковой металлургии связаны с разработкой высокоэнергетических методов их получения при использовании высококонцентрированных потоков энергии.

**Анализ основных достижений и литературы.** Наиболее распространены в настоящее время механические методы обработки порошков, однако им свойственна высокая энергоемкость и загрязнение шихты продуктами износа мелющих тел [1]. Таких недостатков лишены методы обработки порошков высококонцентрированными потоками энергии, которые вызывают интенсивное протекание физико-химических процессов в зоне их локального воздействия [1]. Высокая удельная энергия и быстротечность процессов приво-

дит к формированию термодинамически неравновесных структур, вплоть до аморфных и наноструктур.

Одним из таких методов является высоковольтный электрический разряд (ВЭР) в дисперсной системе «порошок- жидкость» [2]. ВЭР в жидкости характеризуется быстрым (характерный период от  $5 \cdot 10^{-6}$  до  $15 \cdot 10^{-6}$  с) выделением энергии в первоначально малом объеме канала разряда, проложенного стримером, появившимся под действием высокого электрического потенциала между противостоящими электродами. ВЭР позволяет получать плотную плазму, температура которой достигает  $5 \cdot 10^4$  К, давление – 1000–2000 МПа, плотность энергии –  $10^8 - 10^9$  Дж/м<sup>3</sup>.

В результате высокой концентрации энергии, развиваемые в канале высокие давления и температуры приводят к быстрому ( $2 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^2$  м/с) расширению канала и возникновению ударных волн, которые трансформируются в акустические с широким спектром частот, мощными гидротоками, кавитацией, электромагнитными и термическими полями [3].

Такая совокупность процессов приводят к возникновению в кристаллах порошка многочисленных трещин и микротрещин, а многократные циклические динамические нагрузки способствуют дальнейшему развитию радиальных трещин, вызываемых тангенциальными напряжениями от падающих ударных волн [4].

Установлено, что ВЭР воздействие на частицы порошков металлов и их смесей приводит к существенному измельчению (до  $d_{cp} = 0,5$  мкм) и синтезу упрочняющих микро- и наноразмерных фаз карбидов, интерметаллидов (в случае обработки порошковых смесей) и боридов (в случае обработки смесей, содержащих бор) [5–7].

В качестве рабочих жидкостей в электроразрядных установках чаще всего используются техническая вода, но при необходимости используют углеводородные жидкости, в частности при обработке металлических порошков. Применение углеводородной жидкости позволяет исключить окисление частиц обрабатываемых порошков [5–7].

Поскольку возникающая при расширении канала разряда ударная волна является одним из основных факторов воздействия ВЭР, возникла необходимость теоретической оценки полей давлений в камере-реакторе при обработке порошков. Для этого была адаптирована математическая модель пространственного распределения амплитуд волны давления при ВЭР в воде [8] к условиям в дисперсной системе «порошок – углеводородная жидкость (керосин)» [5].

Однако во всех известных работах (в частности, [3-7]) не учитывалось влияние дисперсионной среды и концентрации дисперсной фазы на амплитуду давления ударной волны при ВЭР обработке порошков, что затруднило оценить корректность использования данной математической модели.

В связи с этим, **целью** данной работы является исследование влияния

состава рабочей среды при ВЭР в дисперсной системе «порошок – жидкость» на амплитуду импульсов давления.

**Методика исследований.** Исследования выполнялись в разрядной камере волноводным датчиком давления (ВДД) (см. рис. 1). Схема разрядного контура соответствует схеме, приведенной в работе [5].

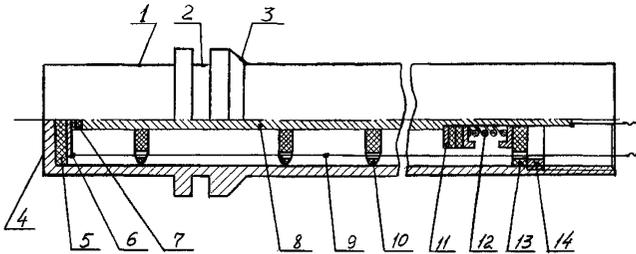


Рисунок 1 – Конструкция волноводного датчика давления: 1 – корпус; 2 – канавка; 3 – упорная поверхность; 4 – приемное доньшко; 5 – изоляционная прокладка; 6 – токосъемник; 7 – пьезоэлемент; 8 – волновод; 9 – проводник; 10 – амортизаторы; 11 – металлическая шайба; 12 – пружина; 13 – изоляционная шайба; 14 – гайка

На рис. 2 показано расположение ВДД в камере относительно элементов электродной системы, которое поддерживалось неизменным для всех рабочих сред.

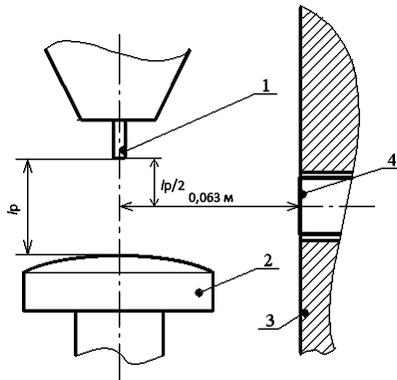


Рисунок 2 – Расположение волноводного датчика давления:  
1 – электрод-анод; 2 – электрод-катод; 3 – внутренняя поверхность камеры высокого давления; 4 – приемное доньшко волноводного датчика давления

Схема соединений ВДД с запоминающим осциллографом представлена на рис. 3. В схеме емкость  $C$  номиналом 2400 пФ совместно с емкостью из-

мерительного кабеля определяла коэффициент передачи сигнала ВДД, а резистор  $R$  номиналом 3,16 кОм обеспечивал разряд емкости  $C$  в паузах между сигналами.

Определение чувствительности ВДД производилось на установке для динамической калибровки широкополосных датчиков давления [9]. Соединение ВДД с запоминающим осциллографом при калибровке на установке осуществлялось тем же измерительным кабелем с RC-цепью, что и при исследованиях в разрядной камере. Полученное значение чувствительности ВДД составило  $k_d = 0,2938$  В/МПа.

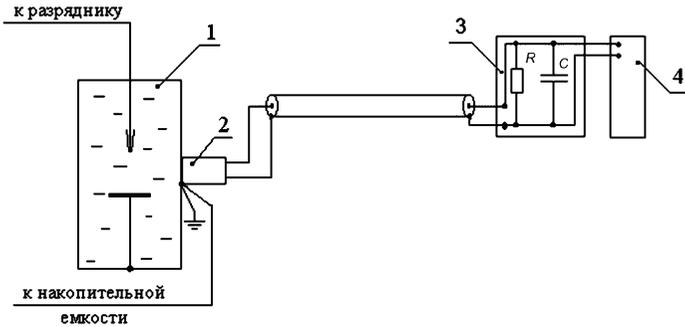


Рисунок 3 – Схема измерения импульсов давления волноводным датчиком давления:  
 1 – камера высокого давления; 2 – волноводный датчик давления; 3 – RC-цепь;  
 4 – запоминающий осциллограф

Исследования влияния состава рабочей жидкости на амплитуду импульсов давления выполнялись при следующих условиях:

- объем рабочей жидкости 5,5 дм<sup>3</sup>;
- в качестве рабочей среды использовались дистиллированная вода, дистиллированная вода с добавлением порошка  $Ti$  ( $d_{cp} = 17$  мкм) массой 500 г (массовое соотношение Т:Ж – 1/11), керосин, керосин с добавлением порошка  $Ti$  ( $d_{cp} = 17$  мкм) массой 250 и 500 г (массовое соотношение Т:Ж 1/18 и 1/9 соответственно).

Параметры контура были выбраны согласно [5] при постоянном рабочем напряжении 50 кВ:

- емкость накопителя варьировалась от 0,4 до 1,6 мкФ;
- разрядный промежуток составлял 28 мм для режимов с использованием дистиллированной воды и 12 мм для режимов с использованием керосина.

В каждом из режимов производилось 30 разрядов и для каждого разряда выполнялась запись осциллограмм разрядных тока, напряжения и осциллограммы сигнала с датчика давления.

Полученные данные усреднялись и статистически обрабатывались, определялись среднее арифметического значение амплитуды давления и значение стандартного отклонения. По осциллограммам тока и напряжения произ-

водилось определение расчетных значений амплитуды давления согласно методике, изложенной в [5, 8].

**Результаты исследований.** Анализ полученных при ВЭР в дистиллированной воде данных (см. рис. 4) свидетельствует о достаточной корреляции экспериментальных данных с расчетными (учитывая погрешность использованной модели в 20 %), что подтверждает корректность постановки эксперимента. Тем не менее, в диапазоне емкостей менее 1 мкФ наблюдается завышение расчетных значений давления в среднем на 36 % относительно экспериментальных. Вероятнее всего это связано с тем, что авторы математической модели [9] в процессе ее разработки не проводили собственных экспериментов с использованием емкости менее 1 мкФ, а использовали экспериментальные данные работы [10] (диапазон значений емкости от 0,24 до 1 мкФ).

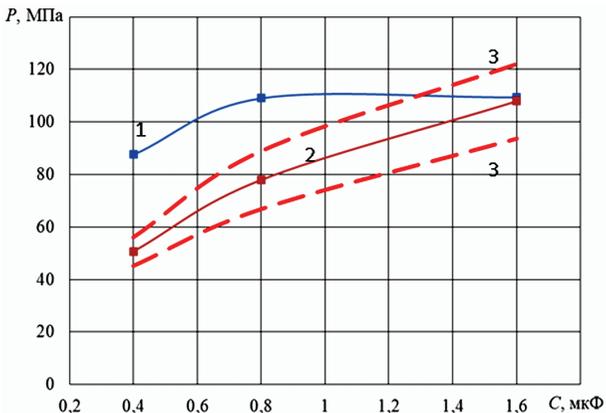


Рисунок 4 – Амплитуда давления при ВЭР в дистиллированной воде:  
1 – расчетные значения амплитуды давления; 2 – экспериментальные значения амплитуды давления; 3 – стандартное отклонение экспериментальных данных

Добавление порошка  $Ti$  (соотношение Т:Ж 1/11) в дистиллат не оказывает существенного влияния на экспериментально регистрируемую амплитуду давления, но способствует возрастанию доли энергии  $\eta_1$ , выделенной в первом полупериоде тока ВЭР в среднем на 26 %. В свою очередь, возрастание значения  $\eta_1$  привело к увеличению расчетных значений амплитуды давления в среднем на 3 %.

Экспериментальные значения амплитуды импульсов давления при ВЭР в дистиллате с добавлением порошка  $Ti$  во всем диапазоне исследований оказались ниже расчетных (см. рис. 5). При этом повышение емкости накопителя от 0,4 до 1,6 мкФ приводит к увеличению значений экспериментальной амплитуды давления с ~31 до ~111 МПа и улучшению корреляции с расчетными

ми данными.

Завышение расчетных значений давления относительно экспериментальных во всем исследованном диапазоне, может быть вызвано тем, что в реальных условиях происходит поглощение энергии волны давления частицами порошка  $Ti$ , находящимися во взвешенном состоянии в рабочей жидкости, а математическая модель [8], по которой определялись расчетные значения давления, представленные на рис. 5 (кривая 1), не учитывает взаимодействие волн давления с частицами порошка.

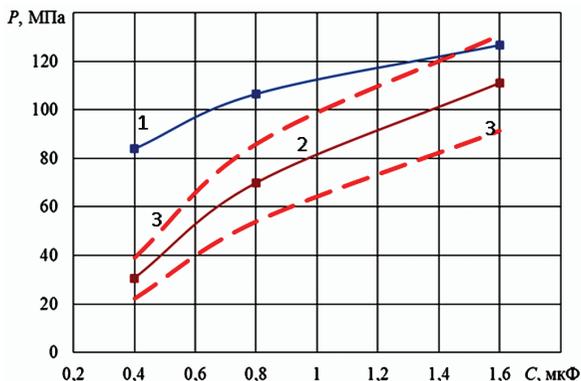


Рисунок 5 – Амплитуда давления при ВЭР в дистиллированной воде с добавлением порошка  $Ti$  (соотношение Т:Ж 1/11) : 1 – расчетные значения амплитуды давления; 2 – экспериментальные значения амплитуды давления; 3 – стандартное отклонение экспериментальных данных

Сравнение экспериментальных значений амплитуды давления при ВЭР в дистиллате (см. рис. 4, кривая 2) и ВЭР в дистиллате с добавлением порошка  $Ti$  (см. рис. 5, кривая 2) концентрацией  $1/11 \text{ кг/дм}^3$  показывает их совпадение в диапазоне  $C \geq 0,8 \text{ мкФ}$  в пределах погрешности, тогда как расчетные значения в аналогичных режимах различаются (см. рис 4, кривая 1 и рис. 5, кривая 1). Это может быть связано с диссипацией энергии волны давления на находящиеся во взвешенном состоянии частицах порошка  $Ti$  (что приводит к снижению амплитуды давления, регистрируемой датчиком) и возрастанием доли энергии, выделенной в первом полупериоде тока (что приводит к возрастанию расчетного значения амплитуды давления).

Использование керосина в качестве рабочей среды привело к значительному (в  $\sim 6$  раз) снижению амплитуды давления, по сравнению с дистиллатом, регистрируемой датчиком, относительно расчетных значений (см. рис. 6). На наш взгляд, это может быть обусловлено отсутствием учета вязкости рабочей жидкости в математической модели [5, 8]. При этом, также как и в дистиллате, сохраняется тенденция увеличения амплитуды давления при увеличении емкости накопителя в диапазоне от 0,4 до 1,6 мкФ.

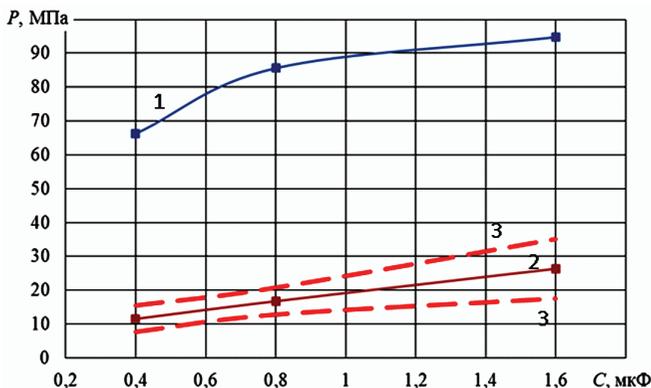


Рисунок 6 – Амплитуда давления при ВЭР в керосине: 1 – расчетные значения амплитуды давления; 2 – экспериментальные значения амплитуды давления; 3 – стандартное отклонение экспериментальных данных

Коэффициент вариации  $V_d$  (отношение среднеквадратического отклонения выборки и среднего значения амплитуды давления) при ВЭР в керосине значительно превышает (в среднем в 2,5 раза) коэффициент вариации при ВЭР в дистиллате с аналогичными параметрами контура (см. табл. 1), что может быть связано с увеличением разброса геометрических положений канала разряда по отношению к ВВД

Таблица 1 – Коэффициент вариации значений амплитуды давления при ВЭР в различных средах

| Дисперсионная среда | Концентрация дисперсной фазы | C, мкФ | $V_d$ |
|---------------------|------------------------------|--------|-------|
| Дистиллат           | –                            | 0,4    | 0,10  |
| Дистиллат           | –                            | 0,8    | 0,14  |
| Дистиллат           | –                            | 1,6    | 0,13  |
| Дистиллат           | 1/11                         | 0,4    | 0,27  |
| Дистиллат           | 1/11                         | 0,8    | 0,22  |
| Дистиллат           | 1/11                         | 1,6    | 0,17  |
| Керосин             | –                            | 0,4    | 0,33  |
| Керосин             | –                            | 0,8    | 0,23  |
| Керосин             | –                            | 1,6    | 0,33  |
| Керосин             | 1/9                          | 0,8    | 0,63  |
| Керосин             | 1/18                         | 0,4    | 0,54  |
| Керосин             | 1/18                         | 0,8    | 0,39  |
| Керосин             | 1/18                         | 1,6    | 0,21  |

Также следует отметить, что в режимах с аналогичными уровнями параметров контура и дисперсионными средами, отличающихся лишь наличием, либо отсутствием дисперсной фазы порошка  $Ti$ , коэффициент вариации

также отличается (в среднем в 1,9 раза больше для режимов с Ti в дистиллате и в 1,3 раза больше для режимов с Ti в керосине), что свидетельствует о влиянии слоя порошка Ti на геометрическое положение канала разряда.

Дальнейшая проверка корректности применения адаптированной математической модели гидродинамических характеристик ВЭР в воде [5] к случаю ВЭР в керосине выполнялась путем увеличения индуктивности разрядного контура с 0,83 до 2,76 мкГн, при неизменных остальных параметрах контура:  $U = 50$  кВ,  $C = 0,8$  мкФ,  $l_p = 12$  мм, так как согласно [8], амплитуда давления обратно пропорциональна квадратному корню значения индуктивности разрядного контура. Установлено, что увеличение индуктивности в  $\sim 3,3$  раза с 0,83 до 2,76 мкГн привело к снижению расчетного значения давления с 85,59 до 47,28 МПа (в  $\sim 1,81$  раза, то есть  $1,81 \approx \sqrt{3,3}$ ), а экспериментального – с 16,75 до 10,05 МПа (в  $\sim 1,67$  раз), что свидетельствует о корректном учете влияния индуктивности разрядного контура в адаптированной математической модели [5]. Различие в  $\sim 6$  раз между экспериментальными и расчетными значениями амплитуды давления в керосине при варьировании индуктивностью разрядного контура сохраняется.

Далее было выполнено исследование ВЭР в керосине с добавлением порошка Ti (соотношение Т:Ж 1/9) при режиме с параметрами  $U = 50$  кВ,  $C = 0,8$  мкФ,  $L = 0,8$  мкГн, обработка в котором показывает наилучшие среди рассмотренных режимов результаты с точки зрения сочетания диспергирования и карбидизации порошка Ti [5 – 7]. Установлено, что добавление в керосин порошка Ti при соотношении масс твердой и жидкой фаз 1/9 приводит снижению амплитуды давления относительно аналогичного режима ВЭР в керосине с  $\sim 16,8$  до  $\sim 5$  МПа, то есть в  $\sim 3,36$  раза (см. рис. 7). Стандартное отклонение выборки, соответствующей данному значению, составляло 1,08 МПа. При этом, в отличие от описанного выше случая ВЭР в дистиллате, добавка порошка Ti в рабочую среду приводит к снижению расчетного значения амплитуды давления в режиме с  $C = 0,8$  мкФ с  $\sim 86$  до  $\sim 23$  МПа ( $\sim 3,7$  раза). Такие изменения амплитуды давления связаны со снижением пробивного напряжения с  $\sim 45$  до  $\sim 16$  кВ вследствие значительного уменьшения эффективного значения межэлектродного промежутка.

С учетом установленного влияния частиц порошка в исследуемых дисперсионных средах на амплитуду волны давления ВЭР (см. рис. 5 и 7), представляло интерес исследовать влияние образующихся в процессе обработки мелкодисперсных частиц порошка Ti и нанougлерода различных аллотропных форм, находящихся во взвешенном состоянии [5–7, 11].

Для этого было произведена серия в 100 разрядов (см. рис. 7), после чего были записаны и статистически обработаны амплитуды давления последующей серии разрядов. При этом значение амплитуды давления снизилось до  $\sim 2$  МПа. Стандартное отклонение соответствующей выборки составляло 1,45 МПа, то есть отличие от предыдущего значения выходило за пределы

статистической погрешности. Такое изменение амплитуды давления может быть объяснено тем, что уже после 100 разрядов возрастает количество мелкодисперсных частиц порошка  $Ti$ , и наноуглерода различных аллотропных форм [11], время оседания которых превышает паузу между разрядами.

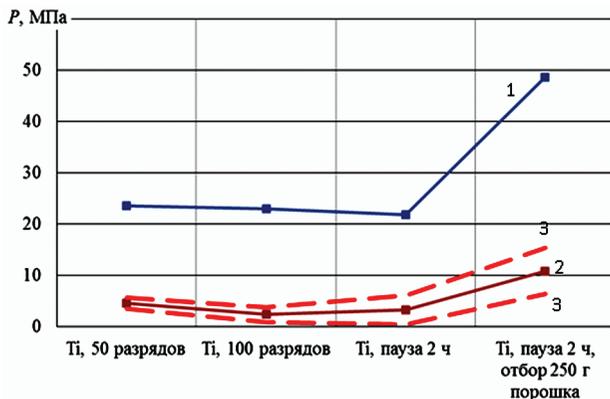


Рисунок 7 – Амплитуда давления при ВЭР в керосине с добавлением порошка  $Ti$ : 1 – расчетные значения амплитуды давления; 2 – экспериментальные значения амплитуды давления; 3 – стандартное отклонение экспериментальных данных

После паузы длительностью 2 часа, достаточной для полного оседания частиц порошка  $Ti$  на дно камеры, была выполнена серия разрядов (см. рис. 7), которая показала возрастание амплитуды давления до  $\sim 3$  МПа, увеличилось и стандартное отклонение соответствующей выборки (до  $\sim 2,81$  МПа). Такие изменения амплитуды давления после образования мелкодисперсных частиц и их последующего оседания подтверждают гипотезу о диссипации энергии волны давления на частицах порошка

Снижение содержания порошка  $Ti$  в дисперсионной среде в 2 раза (соотношение твердой и жидкой фаз 1/18) приводит к значительному увеличению амплитуды давления до  $\sim 11$  МПа, то есть в  $\sim 2$  раза (см. рис. 7). При этом расчетное значение давления также возрастает до  $\sim 49$  МПа (также в  $\sim 2$  раза). На взгляд связано это с тем, что уменьшение количества порошка  $Ti$  в разрядной камере увеличивает эффективное значение межэлектродного промежутка, что приводит к возрастанию пробивного напряжения до  $\sim 43$  кВ.

При варьировании емкостью накопителя от 0,4 до 1,6 мкФ с случае ВЭР в керосине с порошком  $Ti$  (соотношение Т:Ж 1/18) значения амплитуды давления (см. рис. 8, кривая 2) снижаются относительно ВЭР в керосине в аналогичных режимах (см. рис. 6, кривая 2) в среднем в  $\sim 1,8$  раза. Так, экспериментальные значения амплитуды давления в режиме с  $C = 1,6$  мкФ при ВЭР в керосине и в керосине с добавлением  $Ti$  (соотношение Т:Ж 1/18) составляют  $\sim 26$  и  $\sim 13$  МПа соответственно (различие на 13 МПа), тогда как стандартные

отклонения соответствующих выборок составляют 8,84 и 2,76 МПа соответственно.

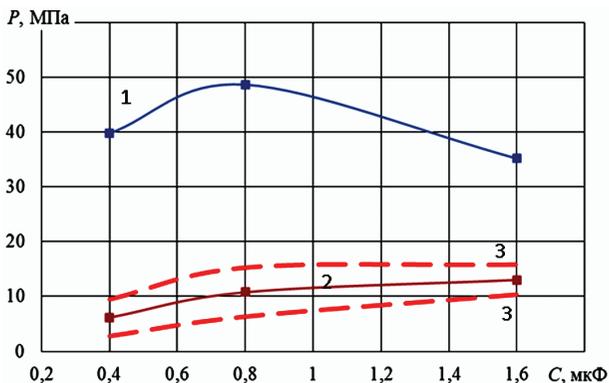


Рисунок 8 – Амплитуда давления при ВЭР в керосине с добавлением порошка Ti (соотношение T:Ж 1/18) : 1 – расчетные значения амплитуды давления; 2 – экспериментальные значения амплитуды давления; 3 – стандартное отклонение экспериментальных данных

**Выводы.** Экспериментально установлена связь амплитуды давления с составом рабочей среды при ВЭР в дисперсной системе «порошок – жидкость» - типом дисперсионной среды, концентрацией дисперсной фазы и параметрами разрядного контура. Установлено, что добавка в дистиллат порошка Ti концентрацией 1/11 приводит к увеличению доли энергии, выделенной в первом полупериоде тока в канале разряда, но не оказывает существенного влияния на экспериментально регистрируемую амплитуду давления. Добавка в керосин порошка Ti с массовым соотношением твердой и жидкой фаз 1/9 приводит к снижению амплитуды давления на ВДД в ~3 раза, а с соотношением 1/18 – в ~1,5 раза по сравнению со случаем ВЭР в керосине. Ранее адаптированная модель гидродинамических характеристик ВЭР в дисперсных системах «порошок металла – керосин» должна быть доработана с учетом роли вязкости рабочей среды, емкости накопителя в диапазоне менее 1 мкФ и отклонения экваториальной плоскости разряда.

**Список литературы.** 1. Сизоненко, О.Н. Перспективные процессы изготовления порошковых материалов / О.Н. Сизоненко, А.И. Ивлиев, Г.А. Баглюк. – Николаев: НУК, 2014. – 376 с. 2. Infimovsky, Yu.Yu. Prospects for obtaining fine powder using a pulsed electrical discharge in liquid / Yu.Yu. Infimovsky, M.A. Strokov // Engineering Journal: Science and Innovation. – 2013. – № 8(20). – P. 30-45. 3. Гулый, Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. / Г.А. Гулый. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с. 4. Бакуль В.Н. Способ дробления сверхтвердых материалов / В.Н. Бакуль, Ю.И. Микитин и др. // Электронная обработка материалов. – 1976. – Вып. 2. – С. 18-22. 5. Sizonenko O. N. Variation in the Particle Size of Fe–Ti–B<sub>4</sub>C Powders Induced by High-voltage Electrical Discharge / O. N. Sizonenko, G. A. Baglyuk, A. I. Raichenko et al. // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2012. – Vol. 51, iss. 3. – P. 129-136. 6. Sizonenko O. Plasma technologies for obtainment

of composite materials dispersion hardened by nanostructured particles / O. Sizonenko, V. Tregub, N. Pristash, A. Zaichenko, A. Torpakov // International virtual journal for science, technics and innovations for the industry. – Year IX Issue 1/2015. – P. 32-35. **7.** Sizonenko O. N. Dispersion and Carburization of Titanium Powders by Electric Discharge / O. N. Sizonenko, G. A. Baglyuk, E. I. Taftai et al. // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2013. – Vol. 52, iss. 5-6. – P. 247–253. **8.** Шамко, В. В. Теоретические основы инженерных расчетов энергетических и гидродинамических параметров подводного искрового разряда / В. В. Шамко, В. В. Кучеренко. – Николаев: Ин-т импульсных процессов и технологий НАН Украины, 1991. – 51 с. – (Препринт / НАН Украины, Ин-т импульсных процессов и технологий; № 20). **9.** Теляшов, Л. Л. Установка для динамической калибровки широкополосных датчиков давления / Л. Л. Теляшов, Ю. С. Чеканов, Е. К. Гнатенко // Физические основы электрогидравлической обработки материалов. – К.: Наукова думка, 1978. – С. 160-165. **10.** Окунь, И. Э. Исследование волн сжатия, возникающих при импульсном разряде в воде / И. Э. Окунь // Журн. техн. физики. – 1971. – № 41, вып. 2. – С. 292-301. **11.** Богуславский, Л.З. Электровзрывной метод получения фуллеренов / Л.З. Богуславский, И.П. Гук, Н.И. Кускова, С.А. Хайнацкий, А.Н. Щербак // Электронная обработка материалов. – 2002. – № 4. – С. 30-34.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Sizonenko, O.N., A.I. Ivliev and G.A. Bagljuk. Perspektivnye processy izgotovlenija poroshkovykh materialov. Nikolaev: NUK, 2014. Print. **2.** Infimovsky, Yu.Yu. and M.A. Stokov «Prospects for obtaining fine powder using a pulsed electrical discharge in liquid» Engineering Journal: Science and Innovation. No. 8(20). 2013. 30–45. Print. **3.** Gulyj, G.A. Nauchnye osnovy razrjadno-impul'snyh tehnologij. Kiev: Naukova dumka, 1990. Print. **4.** Bakul', V.N. et. al. «Sposob droblenija sverhtverdyh materialov» Jelektronnaja obrabotka materialov. Vol. 2. 1976. 18-22. Print. **5.** Sizonenko, O. N. et al. "Variation in the Particle Size of Fe–Ti–B<sub>4</sub>C Powders Induced by High-voltage Electrical Discharge." Powder Metallurgy and Metal Ceramics. Vol. 51, Issue 3. 2012. 129–136. Print. **6.** Sizonenko, O. et al. «Plasma technologies for obtainment of composite materials dispersion hardened by nanostructured particles.» International virtual journal for science, technics and innovations for the industry. Year IX, Issue 1/2015. 2015. 32–35. Print. **7.** Sizonenko, O. N. et al. «Dispersion and Carburization of Titanium Powders by Electric Discharge.» Powder Metallurgy and Metal Ceramics. Vol. 52, Issue 5-6. 2013. 247–253. Print. **8.** Shamko, V. V. and V. V. Kucherenko. Teoreticheskie osnovy inzhenernyh raschetov jenergeticheskikh i gidrodinamicheskikh parametrov podvodnogo iskrovogo razrjada. Nikolaev: In-t impul'snyh processov i tehnologij NAN Ukrainy, 1991. Print. **9.** Teljashov, L. L., Ju. S. Chekanov and E. K. Gnatenko «Ustanovka dlja dinamicheskoy kalibrovki shirokopolosnyh datchikov davlenija.» Fizicheskie osnovy jelektrogidravlicheskoy obrabotki materialov. Kiev: Naukova dumka, 1978. 160-165. Print. **10.** Okun', I. Je. «Issledovanie voln szhatija, vznikajushhij pri impul'snom razrjade v vode.» Zhurn. tehn. fiziki. No. 41, Issue 2. 1971. 292-301. Print. **11.** Boguslavskij, L.Z. et al. «Jelektrovzryvnoj metod polucheniya fulerenov» Jelektronnaja obrabotka materialov. No.4. 2002. 30-34. Print.

*Поступила (received) 12.03.2015*