

ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧНОСТИ ВВОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В КАНАЛ ПОДВОДНОГО ИСКРОВОГО РАЗРЯДА

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
Октябрьский пр-т, 43-а, 54018, г. Николаев-18, Украина*

Введение

Многочисленные эксперименты по фоторегистрации развития канала подводного искрового разряда (ПИР) (см., например, [1, 2]) показывают, что фронт генерируемой в жидкости волны давления отделяется от канала на начальной стадии его развития. Поэтому аналитические [3] и эмпирические [4, 5] зависимости параметров излучаемой ПИР волны давления (амплитуды P_m и длительности положительной фазы τ_+) выражаются, как правило, через энергетические и временные характеристики вводимой в канал электрической мощности. В подавляющем большинстве случаев аналитические решения [3, 6] и результаты численных экспериментов [2, 7] базировались на моноимпульсном задании вводимой в разрядный канал мощности. Вопросу влияния последующих импульсов мощности при колебательных режимах разряда на гидродинамические процессы уделялось значительно меньше внимания [5, 8]. Считалось априори, что это влияние незначительно, а в физическом эксперименте [5] не было выявлено однозначного соответствия между режимом колебательности ПИР (циклическостью ввода электрической энергии) и параметрами излучаемой первичной волны давления. Поэтому в настоящей работе ставилась задача на основе физического и численного экспериментов выяснить влияние последующих за первым импульсов электрической мощности на гидродинамику колебательных режимов ПИР.

Физический эксперимент

Для исследования энергетических характеристик ПИР использовалась методика экспериментальных исследований, подробное описание которой приведено в работе [9]. Энергетический источник представлял собой генератор импульсных токов с емкостью $C = 3 \cdot 10^{-6}$ Ф, заряженной до напряжения $U_0 = 2 \cdot 10^4$ В, и управляемый воздушным разрядником. Индуктивность разрядного контура $L = 3,4 \cdot 10^{-6}$ Гн, а запасаемая энергия $W_0 = C \cdot U_0^2 / 2 = 600$ Дж.

Разряд проводился в заполненной дистиллированной водой емкости размером $0,5 \times 0,5 \times 0,5$ м³. Для устранения потерь энергии на стадии формирования плазменного канала и придания ему цилиндрической формы разряд инициировался алюминиевым проводником диаметром 11 мкм. Выделяемые в разрядном канале электрическая мощность $N(t)$ и энергия $W(t)$ определялись по регистрируемому методом осциллографирования разрядному току и напряжению. Точность определения контролировалась по балансу энергии в канале разряда путем сопоставления суммы выделившейся в плазменном канале и ошиновке контура электрической энергии с запасенной W_0 . Баланс энергии в эксперименте выполнялся с точностью, не превышающей 8%, что и принималось за верхнюю границу погрешности эксперимента.

Соответствующие двум колебательным режимам ПИР энергетические характеристики приведены на рис. 1. Режимы различаются длиной межэлектродного промежутка l : $l = 0,04$ м (режим I, сплошная кривая мощности) и $l = 0,055$ м (режим II, штриховая линия $N(t)$).

В исследуемых режимах пульсации мощности с энергией i -й пульсации $W_i \leq 0,01 \cdot W_0$ не учитывались. В результате в режиме I энергия вводится за шесть циклов мощности, а энергетический критерий [5] $\eta = W_1 / W_0 \approx 0,4$, в режиме II число циклов энерговода равно 4, а $\eta \approx 0,7$. Характерной особенностью режима I по сравнению с режимом II является меньшая крутизна нарастания мощности первого импульса ($1,6 \cdot 10^{13}$ Вт/с против $2,3 \cdot 10^{13}$ Вт/с) и более высокая (в 1,4–2 раза) – в последующих пульсациях. Причем удельные (на единицу длины разрядного промежутка) значения крутизны нарастания мощности первых импульсов практически совпадают, а последующих – более высокие (примерно в 2–3 раза) у первого режима.

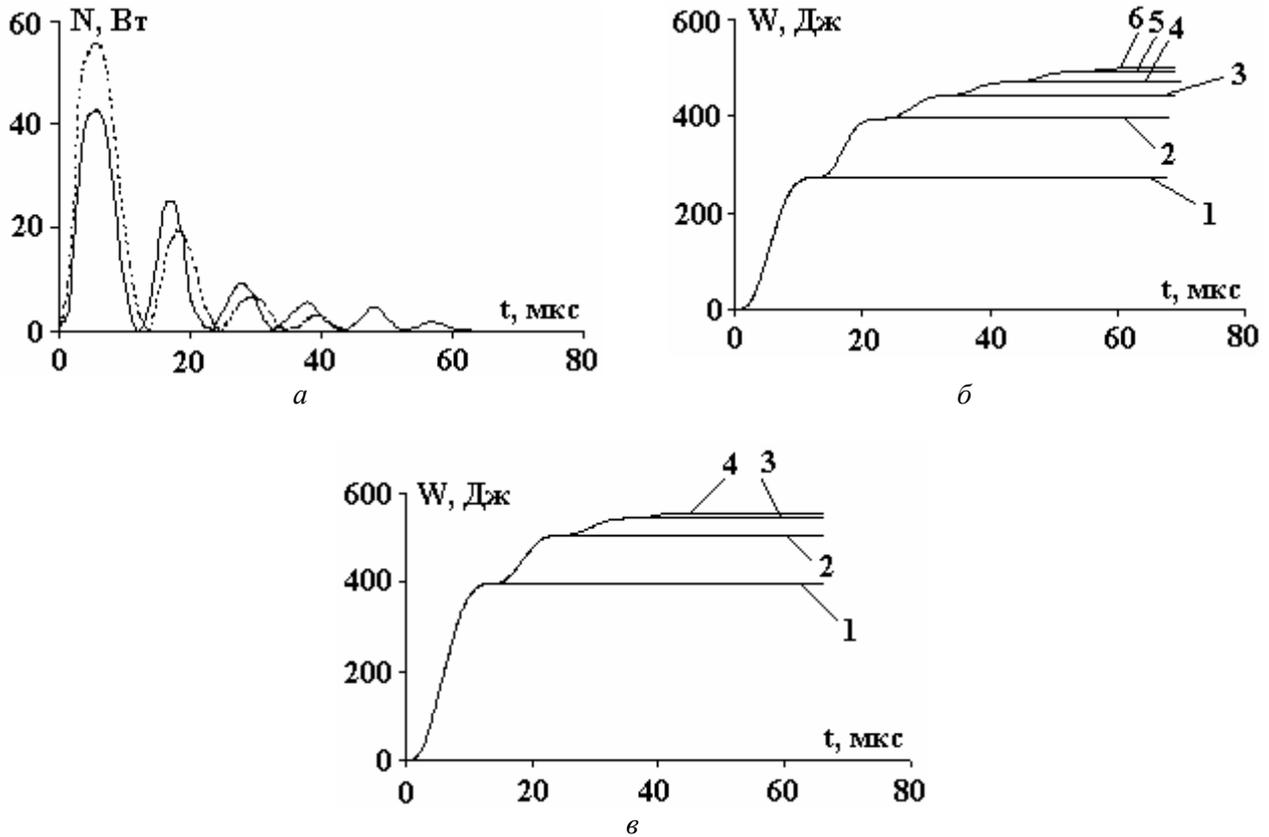


Рис. 1. Электрическая мощность (а) и выделяемая в разрядном канале энергия (б – базовый режим I, в – базовый режим II) в зависимости от времени и числа учитываемых пульсаций мощности

Математическая постановка задачи и результаты численного эксперимента

Плазменный разрядный канал моделировался акустическим цилиндрическим излучателем конечной длины, в который в процессе расширения в течение времени t вводится электрическая мощность $N(t)$. В области, ограниченной контактными разрывами плазма–вода и ударной волной, решалась система двумерных нелинейных уравнений газовой динамики в постановке [10]:

$$\begin{cases} \frac{\partial (r \cdot \rho)}{\partial t} + \frac{\partial (r \cdot \rho \cdot v_z)}{\partial z} + \frac{\partial (r \cdot \rho \cdot v_r)}{\partial r} = 0, \\ \frac{\partial (r \cdot \rho \cdot v_r)}{\partial t} + \frac{\partial (r \cdot \rho \cdot v_z \cdot v_r)}{\partial z} + \frac{\partial [r \cdot (\rho \cdot v_r^2 + P)]}{\partial r} = P, \\ \frac{\partial (r \cdot \rho \cdot v_z)}{\partial t} + \frac{\partial [r \cdot (\rho \cdot v_z^2 + P)]}{\partial z} + \frac{\partial (r \cdot \rho \cdot v_z \cdot v_r)}{\partial r} = 0, \\ \frac{\partial (r \cdot e)}{\partial t} + \frac{\partial [r \cdot (e + P) \cdot v_z]}{\partial z} + \frac{\partial [r \cdot (e + P) \cdot v_r]}{\partial r} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где t – время; r, z – цилиндрические координаты; v_r, v_z – радиальная и осевая компоненты вектора скорости жидкости; P – давление; ρ – плотность; $e = \rho \left[\varepsilon + (v_r^2 + v_z^2)/2 \right]$; ε – внутренняя энергия единицы массы жидкости: $\varepsilon = [p - c_0^2 (\rho - \rho_0)] / [\rho (\kappa - 1)]$; ρ_0, c_0 – плотность и скорость звука в покоящейся жидкости; $\kappa = 7,15$.

На внутренней границе расчетной области – контактном разрыве плазма–вода – ставится условие баланса энергии [2]:

$$\frac{1}{(\gamma-1)} \cdot \frac{d(P_a V_a)}{dt} + P_a \cdot \frac{dV_a}{dt} = N(t), \quad (2)$$

а на внешней границе – ударной волне – условия динамической совместности [10]:

$$[\rho] D - [\rho v_n] = 0,$$

$$[\rho v_n] D - [\rho v_n^2 + P] = 0, \quad (3)$$

$$[\rho (\varepsilon + v_n^2 / 2)] D - [\rho v_n (\varepsilon + v_n^2 / 2) + P v_n] = 0,$$

где P_a, V_a – давление в канале разряда и его объем; $\gamma = 1,26$; v_n – нормальная составляющая вектора скорости жидкости; D – скорость ударной волны; $[f] = f_1 - f_2$; f_1, f_2 – значения функции слева и справа от ударной волны.

Начальные значения гидродинамических параметров окружающей канал жидкости равны их значениям в невозмущенной среде, а начальные значения радиуса, скорости расширения и давления в канале разряда вычислялись по методике [11].

Задача (1)–(3) решалась конечно-разностным методом Годунова по разработанному ранее ([10]) алгоритму. Анализ, в частности, подвергались гидродинамические характеристики разрядного канала (радиус $a(t)$ и скорость расширения $\dot{a}(t)$ срединного сечения, давление $P_a(t)$ и удельный

импульс силы давления $I_a(t) = \int_0^t P_a(\tau) d\tau$ и жидкости (давление $P(t)$ и удельный импульс силы

давления $I(t) = \int_0^t P(\tau) d\tau$) в точке, находящейся в экваториальной плоскости канала разряда на рас-

стоянии $r = 0,08$ м от оси симметрии канала.

Выбор вариантов энерговыделения для условия (2) производился таким образом, чтобы можно было проанализировать влияние на исследуемые характеристики каждого последующего импульса вводимой электрической энергии. Поэтому для приведенных на рис. 1,а экспериментальных режимов энерговыделения, принимаемых за базовые, формировались дополнительные варианты, номера которых соответствуют количеству учитываемых циклов ввода электрической энергии в разрядный канал. Данные рис. 1,б,в дают информацию о величине введенной в канал электрической энергии в каждом варианте. Для удобства сравнения результатов расчета удельного импульса силы давления верхний предел интеграла от давления ограничивался временем ввода энергии базовых режимов. Это допустимо, поскольку в дальнейшем давление затухает слабо и, следовательно, величина интеграла давления растет медленно. Удельный импульс силы давления стремится к значению, достигаемому в момент времени, примерно равный 1/10 периода пульсации электровзрывной каверны [12].

Расчетные гидродинамические характеристики электрического разряда для шести и четырех вариантов, сформированных на основе базовых режимов I и II соответственно, представлены на рис. 2–6. На всех рисунках номера кривых равны количеству учитываемых импульсов мощности.

Из анализа зависимостей кривых $a(t)$ (см. рис. 2) следует, что радиус канала разряда заметно «реагирует» на дополнительный подвод энергии в том случае, когда величина вводимой энергии составляет не менее 10% от уже введенной в канал энергии (см. варианты 1–3 на рис. 2,а и 1–2 на рис. 2,б). Причем ощутимое увеличение радиуса имеет место при вводе примерно половины энергии очередной пульсации. Так, кривые радиусов четвертого (см. рис. 2,а) и третьего (см. рис. 2,б) вариантов, энергия которых увеличилась на 6 и 7,5% соответственно, практически совпадают с кривыми предшествующих вариантов. Использование моноимпульсного приближения шестиимпульсного режима энерговыделения приводит к уменьшению радиуса канала разряда на 15% в момент окончания выделения энергии базового режима, и разница увеличивается с ростом времени. С уменьшением ко-

личества циклов ввода энергии (степени колебательности разряда) величина отклонения уменьшается. Следует отметить, что основную поправку к расчетному радиусу моноимпульсного приближения вносит учет второй добавки энергии, а учет всех последующих пульсаций мощности приводит к увеличению радиуса не более чем на 5%.

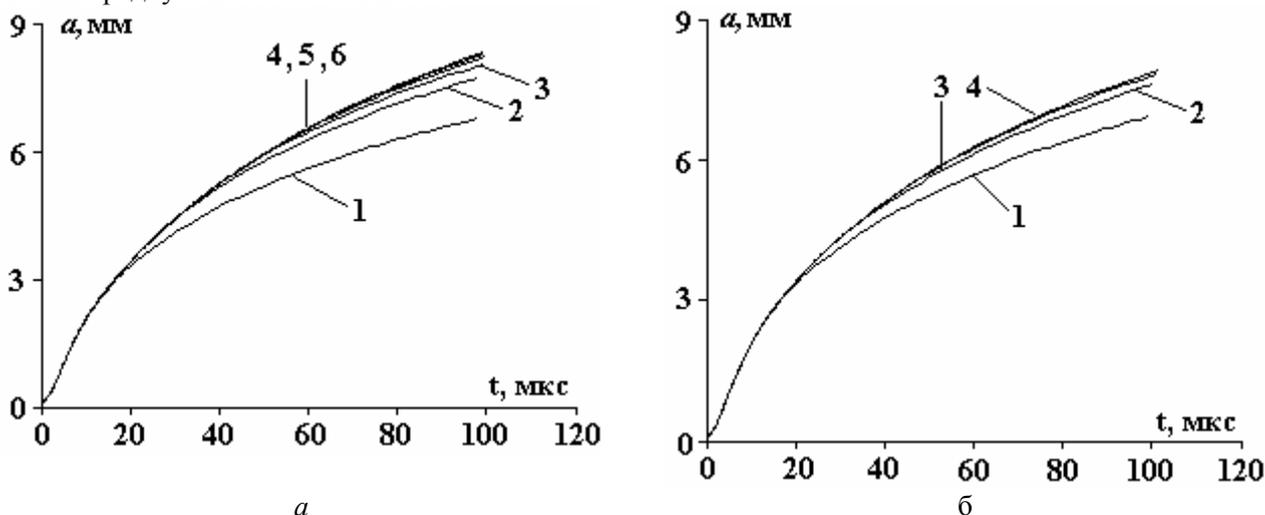


Рис. 2. Радиусы срединного сечения разрядного канала в зависимости от времени и количества учитываемых пульсаций мощности: а – варианты базового режима I, б – варианты базового режима II

Скорость расширения канала разряда (см. рис. 3) более чувствительна, чем радиус, к дополнительным, даже весьма малым, подпиткам энергии (см. варианты 4, 5 рис. 3,а и 3, 4 рис. 3,б). Она активно реагирует на очередной цикл ввода энергии уже на стадии возрастания мощности. Из анализа приведенных результатов следует, что моноимпульсное приближение понижает уровень скоростей расширения канала на их спадающих участках, в зависимости от степени колебательности разряда и времени фиксации скорости, на 15–50%. Для сильно колебательных режимов разряда (см. рис. 3,а) учет последующей за второй пульсацией мощности дает примерно такую же величину роста скорости, что и вторая пульсация. Для таких режимов разряда сравнимы и величины вводимых энергий при второй и всех последующих пульсациях мощности (см. рис. 1,б).

Давление в канале разряда (см. рис. 4) и в жидкости (см. рис. 5) качественно ведет себя сходным образом со скоростью расширения канала. Однако их чувствительность к последующим вкладам энергии гораздо выше, чем у скорости. Так, только учет второй пульсации мощности повышает уровень давления в канале на релаксационном участке более чем на 40% для базового режима II (см. рис. 4,б) и примерно на 70% для режима I (см. рис. 4,а); к концу выделения энергии, то есть при учете всех пульсаций мощности, соответствующий уровень повышения составляет 65 и 210% для давления в канале и 60–80% – для давления в жидкости. Наиболее весомый вклад в эти величины вносит учет довыделения энергии второй и третьей пульсациями.

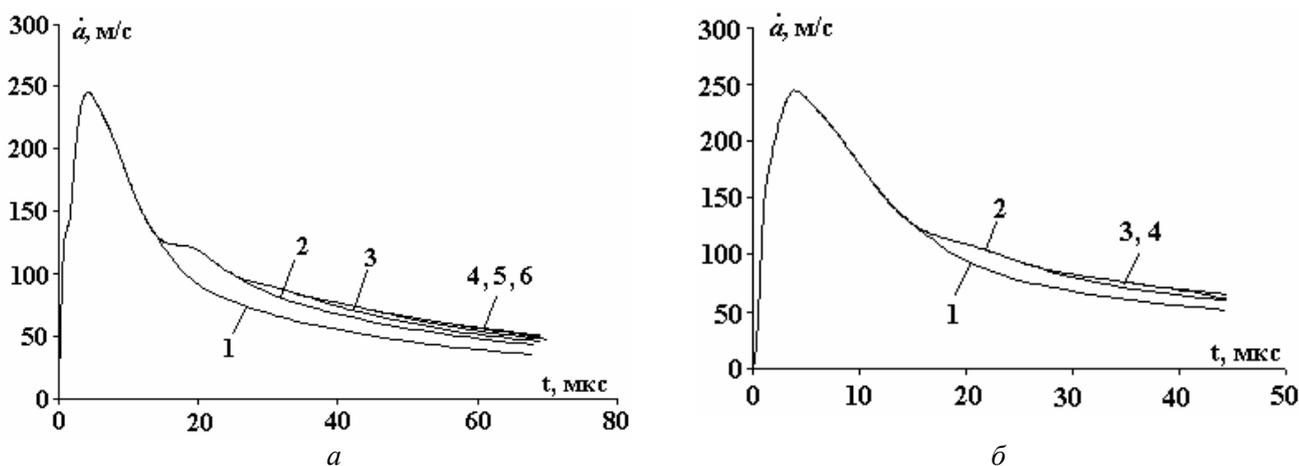


Рис. 3. Скорость расширения разрядного канала в срединном сечении в зависимости от времени и количества учитываемых пульсаций мощности: а – варианты базового режима I, б – варианты базового режима II

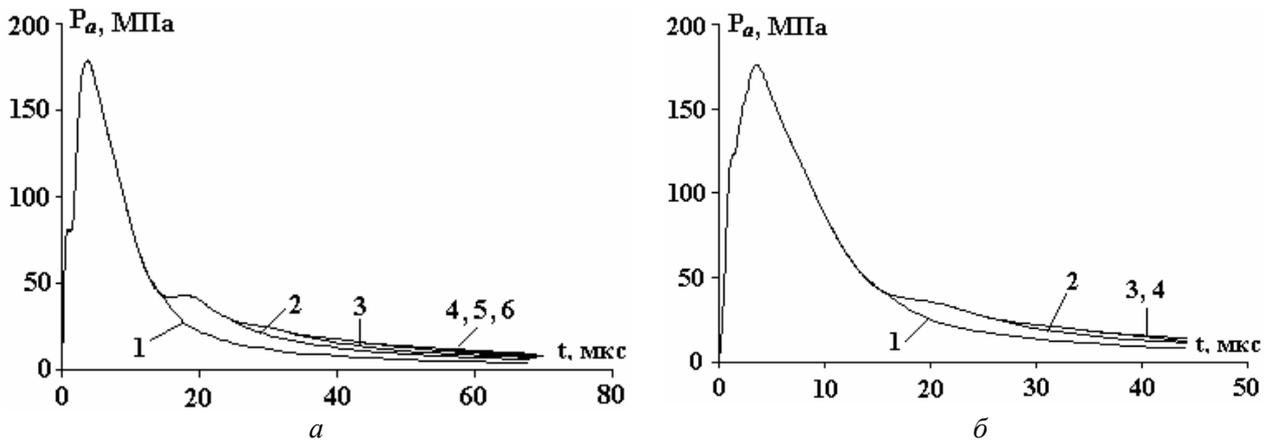


Рис. 4. Давление в разрядном канале в зависимости от времени и количества учитываемых пульсаций мощности: а – варианты базового режима I, б – варианты базового режима II

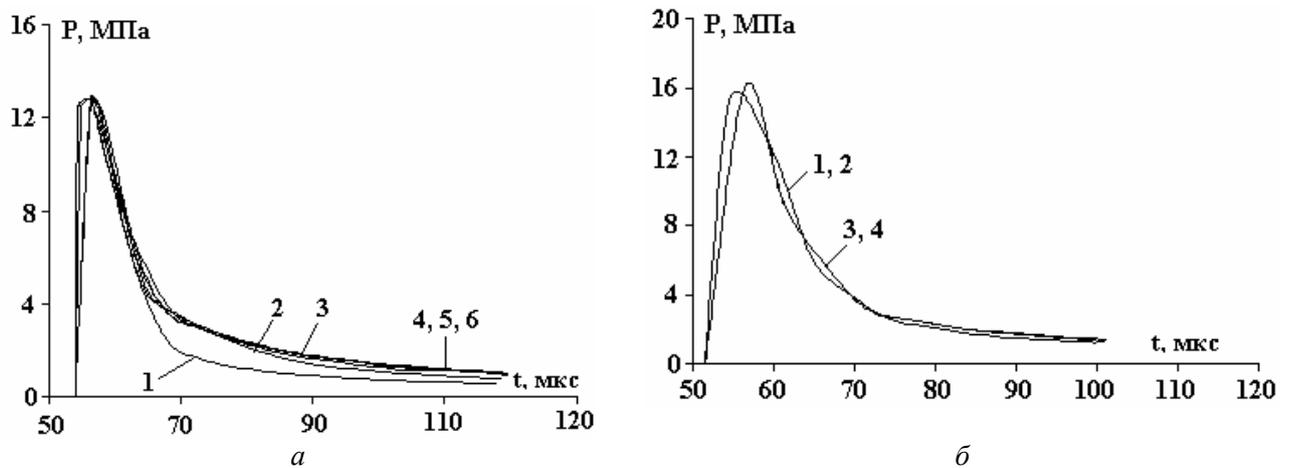
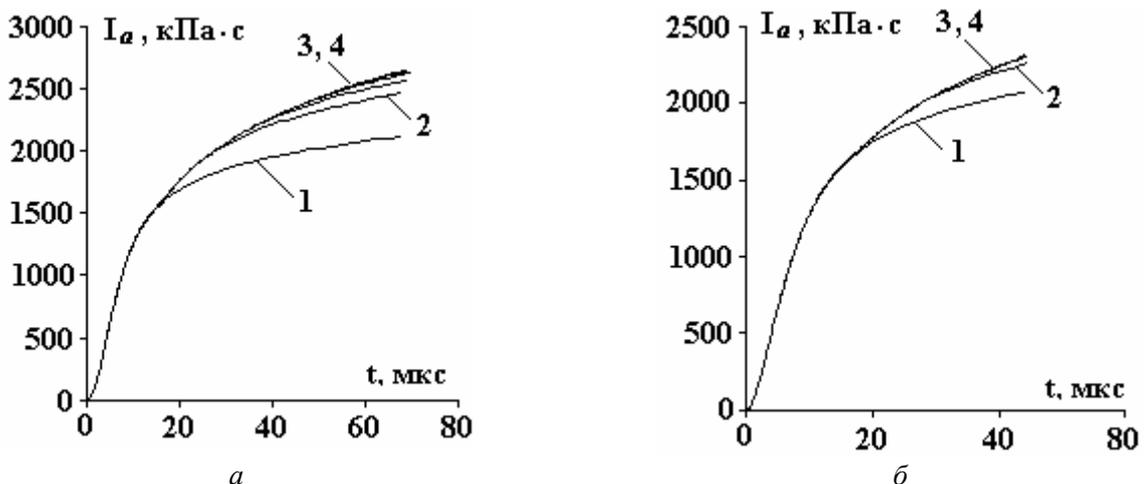


Рис. 5. Эпюры давления в жидкости в зависимости от количества учитываемых пульсаций мощности: а – варианты базового режима I, б – варианты базового режима II

Кривые удельных импульсов силы давления (см. рис. 6, а-г) качественно повторяют ход кривых радиусов канала (см. рис. 2, а, б), но имеют большие расхождения между различными вариантами. Причем максимальные расхождения величины удельных импульсов между вариантами 1 и 4 (см. рис. 6, б, г), 1 и 6 (см. рис. 6, а, б), представляющих расчетные данные для моноимпульсных и базовых режимов разряда соответственно, составляют 15–25% для разрядного канала и 15–30% для жидкости.



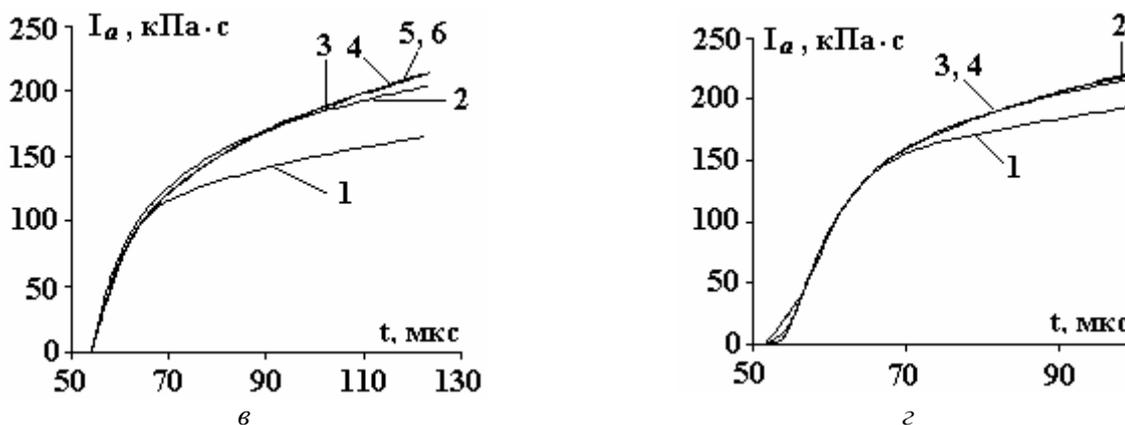


Рис. 6. Удельные импульсы силы давления канала (а – базовый режим I, б – базовый режим II) и волны в жидкости (в – базовый режим I, г – базовый режим II) в зависимости от времени и количества учитываемых пульсаций

Заключение

Анализ полученных результатов показывает, что использование в численном эксперименте моноимпульсного закона ввода энергии для колебательных режимов ПИР снижает величину радиуса канала разряда к моменту окончания выделения электрической энергии более чем на 10%, скорости расширения канала на 15–50%, давления в канале на стадии его релаксации на 65–210%, давления за фронтом ударной волны на 60–80% и удельных импульсов силы давления на 10–30%. Следовательно, при численном определении характеристик электрогидроимпульсных технологических устройств, использующих энергию колебательных режимов разряда, для которых преобладающими действующими факторами являются давление или удельный импульс силы давления (см., например, [5, 9, 13]), в расчетной модели должны учитываться все пульсации мощности. Для слабоколебательных режимов разряда ($\eta \geq 0,7$) желателен учет хотя бы первых двух пульсаций мощности, а для сильноколебательных ($\eta \leq 0,6$) – первых трех пульсаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комельков В.С., Скворцов Ю.В. Расширение канала разряда мощной искры в жидкости // ДАН СССР. 1959. Т. 129. № 6. С. 1273–1276.
2. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. М.: Наука, 1971. 151 с.
3. Арсентьев В.В. К теории импульсных разрядов в жидкой среде // ЖПМТФ. 1965. № 5. С. 51–57.
4. Окунь И.З. Применение методов размерности и подобия к исследованию импульсного разряда в воде // ЖТФ. 1967. Т. 37. № 9. С. 1729–1738.
5. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. Киев: Наук. думка, 1979. 207 с.
6. Крутиков В.С. Функции управления волновыми процессами в областях с подвижными границами (расширение цилиндра конечной длины) // Письма в журнал техн. физики. 2005. Т. 31. Вып. 12. С. 88–94.
7. Шамко В.В., Вовченко А.И., Каменская Л.А., Барбашова Г.А. Управление гидродинамическими процессами при моноимпульсном электровзрывном преобразовании энергии // Электронная обработка материалов. 2005. № 1. С. 61–67.
8. Барбашова Г.А., Вовченко А.И., Каменская Л.А., Шамко В.В. Управление гидродинамическими процессами при электровзрывном программируемом многоимпульсном вводе энергии // Акустичний вісник. 2004. Т. 7. № 4. С. 3–9.
9. Шамко В.В., Кучеренко В.В. Теоретические основы инженерных расчетов энергетических и гидродинамических параметров подводного искрового разряда. Николаев, 1991. 51с. (Препринт АН Украины, Институт импульсных процессов и технологий; № 20).
10. Барбашова Г.А., Иванов А.В. Расчет двумерного нестационарного течения жидкости при подводном взрыве проволоочки конечной длины // Гидромеханика. 1986. Вып. 53. С. 16–19.
11. Вовченко А.И. Начальные условия для задачи о численном исследовании динамики подводного искрового разряда // Праці ІЕД НАНУ. Електродинаміка: зб. наук.пр.: К: ІЕД НАН України. 2001. С. 117–120.

12. Коул Р. Подводные взрывы. М.: Изд-во иностр. лит., 1950. 494 с.

13. Юрченко Е.С., Половинко В.Д., Барбашова Г.А. Влияние параметров импульса давления на снижение остаточных напряжений // Материалы VI Междунар. науч. школы–семинара (22–26 августа, 2005). Николаев: КП “Миколаївська обласна друкарня”. 2005. С. 30–31.

Поступила 11.10.06

Summary

Evaluation of the cyclic recurrence electric power input influence on such hydrodynamic characteristics of the plasma channel as its radius, expansion velocity and specific pressure force pulse has been carried out for oscillating modes of the underwater spark discharge. Recommendations have been formulated on the methodology of numerical determination of hydrodynamic characteristics for electric hydro pulsed technological facilities, utilizing power of electric discharge in oscillating modes.

А.Р. Ризун, Ю.В. Голень, Т.Д. Денисюк

ИНИЦИИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДА ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИМИ СОСТАВАМИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ПРОЧНЫХ ДОННЫХ ГРУНТОВ

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

Разработка новых эффективных, экологически безопасных методов и технологий для разрушения плотных и прочных донных грунтов и скальных пород береговой зоны при гидротехническом строительстве и реконструкции морских и речных портов, терминалов, жилищных и береговых сооружений является чрезвычайно актуальной проблемой.

Существующие традиционные механические методы не удовлетворяют всем требованиям и потребностям эксплуатации и применения. Они характеризуются довольно сложными операциями постановок плавсредств над участками, где необходимо выполнять работы, ограничением рабочих глубин и невысокой производительностью при разработке грунтов повышенной прочности. Для грунтов высокой прочности (более 20 МПа) механические способы вообще неприемлемы.

Подводный взрыв при выполнении дноуглубительных работ – способ более экономичный, однако он имеет ограничения, например вблизи гидротехнических и береговых сооружений, в местах прокладки кабелей, трубопроводов, при невозможности в радиусе безопасности прекращать проход судов. Во время взрывов могут пострадать не только береговые портовые и припортовые сооружения, причалы, проходящие суда, технический флот строителей, но возможно массовое уничтожение рыбы.

Как показали исследования [1], электроразрядный способ разрушения прочных грунтов и скальных пород позволит существенно уменьшить затраты на строительство и реконструкцию морских и речных портов, разного рода гидротехнических и жилищных сооружений береговой зоны.

Однако его масштабное применение и эксплуатация могут быть обеспечены при условии повышения производительности процесса до 3–5 м³/ч для грунтов прочностью более 30 МПа и при наличии мобильного малогабаритного электроразрядного комплекса, адаптированного к работе в морских условиях. Достижение таких показателей производительности возможно при условии повышения в 3–5 раз запасаемой энергии электроразряда. Исследованиями по расширению возможностей электроразряда установлено, что за счет использования экзотермических составов (ЭС) его энергию можно увеличить в несколько раз, а также уменьшить массогабаритные характеристики электротехнических систем.

Цель работы – повысить эффективность электроразрядного разрушения прочных грунтов при применении экзотермических составов.

Идея исследований заключается в использовании комплексного воздействия электроразряда и экзотермических составов на процесс разрушения прочных донных грунтов.