

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ В МАЛОМ ОБЪЕМЕ ЖИДКОСТИ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
Октябрьский пр., 43-а, г. Николаев, 54018, Украина, [iipt@iipt.com.ua](mailto:iipt@iipt.com.ua)*

### Введение

Для развальцовки труб в решетках теплообменных аппаратов и в ряде других разрядно-импульсных технологий используются электровзрывные патроны [1]. Полость патрона чаще всего имеет форму цилиндра. На оси симметрии цилиндра помещают проволочку, а его полость заполняют жидкостью. Для герметизации жидкости используют специальные заглушки или покрывают пленкой вязкого вещества. Образующиеся при взрыве проволоочки волны давления воздействуют на стенку трубы и деформируют ее.

В настоящей работе при помощи вычислительного эксперимента исследуются гидродинамические характеристики электрического взрыва проволоочки в заполненном водой прямом круговом цилиндре конечной длины и малого (до 20 мм) диаметра.

### Постановка задачи

При выполнении работы полагали, что боковая поверхность цилиндра (разрядной камеры) абсолютно жесткая, а оба основания могут быть абсолютно жесткие (вариант 1): верхнее – абсолютно жесткое, нижнее – используемый для герметизации жидкости недеформируемый диск, перемещающийся по трубе до абсолютно жесткой преграды (вариант 2); сверху цилиндр покрыт пленкой вязкого вещества, нижнее основание – подвижный жесткий диск (вариант 3). На оси симметрии цилиндра находится проволочка (рис. 1). Разрядная камера заполнена идеальной сжимаемой жидкостью, а образующаяся после взрыва проволоочки полость (канал разряда) – идеальной низкотемпературной плазмой.

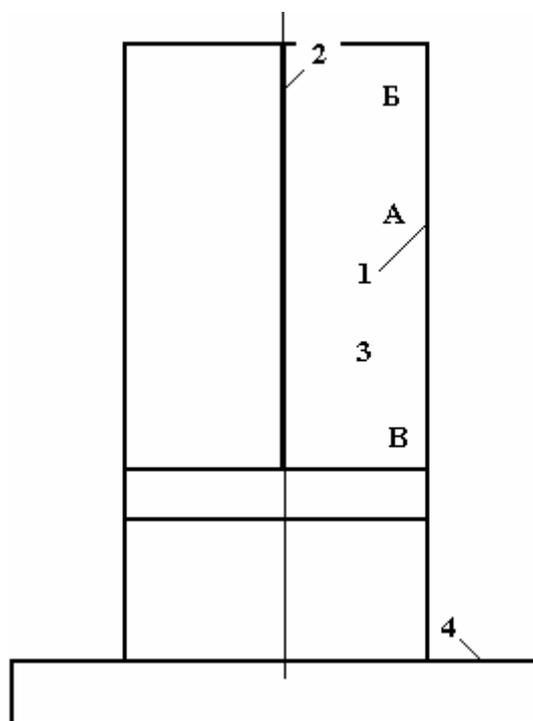


Рис.1. Схема камеры электроразрядного патрона: 1 – поверхность цилиндра; 2 – проводник; 3 – жесткий диск; 4 – преграда; А, Б, В – точки на боковой поверхности цилиндра

Следуя принятым допущениям, математическую постановку задачи формулируем следующим образом. В области жидкости, ограниченной контактной границей вода–плазма (стенка канала разряда) и цилиндром с абсолютно жесткой боковой поверхностью и абсолютно жесткими основаниями либо с абсолютно жестким верхним и подвижным недеформируемым нижним, либо со свободной поверхностью на верхнем основании (когда жидкость ограничена пленкой) и подвижным диском снизу, необходимо решить систему двумерных нелинейных уравнений газовой динамики, записанную в цилиндрической системе координат [2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial(r \cdot \rho)}{\partial t} + \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot v_z)}{\partial z} + \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot v_r)}{\partial r} = 0, \\ \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot v_r)}{\partial t} + \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot v_z \cdot v_r)}{\partial z} + \frac{\partial[r \cdot (\rho \cdot v_r^2 + p)]}{\partial r} = p, \\ \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot v_z)}{\partial t} + \frac{\partial[r \cdot (\rho \cdot v_z^2 + p)]}{\partial z} + \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot v_z \cdot v_r)}{\partial r} = 0, \\ \frac{\partial(r \cdot e)}{\partial t} + \frac{\partial[r \cdot (e + p) \cdot v_z]}{\partial z} + \frac{\partial[r \cdot (e + p) \cdot v_r]}{\partial r} = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

замыкаемую двучленным уравнением состояния [2]:

$$\varepsilon = [p - c_0^2(\rho - \rho_0)] / [\rho(\kappa - 1)]; \quad (2)$$

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

На внутренней границе расчетной области – контактном разрыве плазма-вода – задается давление, которое определяется из уравнения баланса энергии [3]:

$$\frac{1}{(\gamma-1)} \cdot \frac{d(p_a V_a)}{dt} + p_a \cdot \frac{dV_a}{dt} = N(t), \quad (3)$$

где  $p_a, V_a$  – давление в канале разряда и его объем;  $\gamma=1,26$ ;  $N(t)$  – закон ввода мощности в канал разряда, задаваемый следующим образом [3]:

$$N(t) = \begin{cases} 4 \cdot t \cdot E / \tau^2, & 0 \leq t \leq \tau/2, \\ 4 \cdot (1 - t/\tau) \cdot E / \tau, & \tau/2 \leq t \leq \tau, \\ 0, & \tau < t. \end{cases}$$

Здесь  $E$  – количество вводимой в канал разряда энергии;  $\tau$  – длительность первого полупериода разряда (полагали, что вся энергия вводится за это время).

На неподвижной жесткой стенке ставится условие непротекания:

$$v_n = 0, \quad (4)$$

где  $v_n$  – нормальная составляющая вектора скорости жидкости.

На подвижном жестком диске скорость жидкости равна скорости движения диска. Диск перемещается по закону движения абсолютно твердого тела:

$$m \cdot \ddot{x} = F = 2 \cdot \pi \cdot \int_0^R r \cdot (p - p_B) dr. \quad (5)$$

Здесь  $x$  – перемещение диска;  $m$  – его масса;  $F$  – действующая на диск сила давления;  $R$  – радиус цилиндрической разрядной камеры;  $p_B$  – давление воздуха на диск. При решении задачи уравнение (5) переписывалось в виде

$$m \cdot \ddot{x} \approx 2 \cdot \pi \cdot \sum_{i=1}^n \left[ (p_i - p_B) \cdot \frac{r_{i+1}^2 - r_i^2}{2} \right] = \pi \cdot \sum_{i=1}^n \left[ (p_i - p_B) \cdot (r_{i+1}^2 - r_i^2) \right], \quad (6)$$

где  $n$  – число участков разбиения по радиусу диска;  $p_i$  – давление жидкости на участке  $[r_i; r_{i+1}]$ .

На свободной поверхности

$$p=0. \quad (7)$$

В начальный момент времени параметры жидкости равны своим значениям в невозмущенной среде при атмосферном давлении. Начальный радиус канала разряда равен 1 мм, начальная скорость – нулю, а давление в канале разряда превышает давление в окружающей среде на 1 МПа.

Система уравнений (1)–(2) с заданными граничными и начальными условиями решается конечно-разностным методом Годунова [2], а дифференциальное уравнение (6) – при помощи явной конечно-разностной схемы второго порядка точности.

Величину вводимой в канал разряда энергии  $E$  и длительность первого полупериода разряда определили по формулам, приведенным в [4], при следующих значениях параметров электрической цепи: зарядное напряжение  $U_0 = 30$  кВ, емкость  $C = 3$  мкФ, индуктивность  $L = 3$  мкГн, длина проводника  $l = 45$  мм, радиус цилиндра  $R = 10$  мм, масса диска  $m = 5$  г. Получено:  $E = 525$  Дж,  $\tau = 10$  мкс. А определенный по этим данным закон ввода мощности показан на рис. 2.

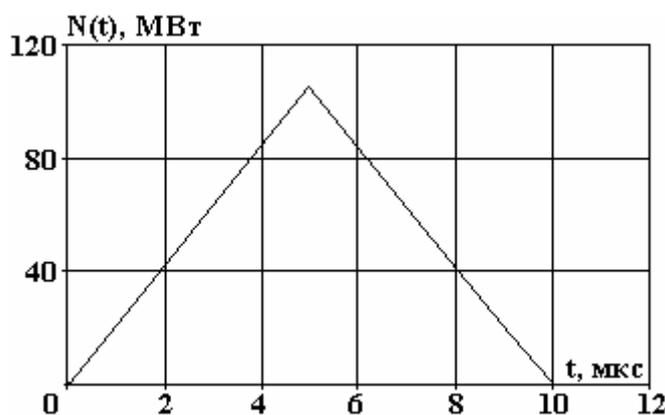


Рис. 2. Закон ввода электрической мощности в канал разряда

### Результаты численного эксперимента

При анализе результатов решения задачи, часть которых приведена на рис. 2–5 (номер кривой соответствует номеру варианта), необходимо отметить следующее.

В цилиндре с неподвижными основаниями течение жидкости одномерно. После прихода к каналу разряда отраженной от боковой поверхности разрядной камеры волны зависимость давления от времени в жидкости и плазме имеет вид синусоиды с затухающей амплитудой и практически постоянным периодом, равным времени пробега волны от канала до стенки. Значение давления колеблется около величины  $p \approx 180$  МПа. Течение жидкости стремится к установившемуся.

Иная картина имеет место в цилиндрической разрядной камере с подвижным нижним основанием (варианты 2 и 3). В этом случае нарушается однородность распределения характеристик жидкости и плазмы вдоль оси симметрии цилиндра. Увеличение объема, занимаемого жидкостью, и вытекание жидкости приводят к уменьшению (по сравнению с вариантом 1) давления как в канале разряда (рис. 3), так и в жидкости (рис. 4). Давление в канале падает почти в полтора раза, если верхнее основание – жесткая неподвижная поверхность, и более чем в два раза, когда верхняя граница – свободная поверхность (рис. 3). Примерно такая же разница между значениями давления в жидкости, в том числе и на боковую поверхность цилиндра (рис. 4). Возрастает также длительность периода колебания на кривой давления, то есть увеличивается время пробега волн от канала разряда к стенке и обратно.

Сравним результаты, полученные при расчете второго и третьего вариантов, то есть оценим влияние свободной поверхности на характер течения в разрядной камере (кривые 2 и 3 на рис. 3 и 4). Первые максимумы давления в канале разряда, в точках А и Б, на стенке камеры (рис. 1) совпадают, но давление жидкости вблизи свободной поверхности существенно меньше давления у абсолютно жесткой границы с самого начала процесса, что связано с вытеканием жидкости из устройства. Со временем влияние верхней границы распространяется на весь объем цилиндра. Например, скачок давления жидкости на стенку в точке А, связанный с достижением диском жесткой неподвижной по-

верхности, в том случае, когда верхнее основание цилиндра абсолютно жесткое, примерно равен 380 МПа, что в 1,6 раза больше значения этой же характеристики в другом случае (рис. 4, кривые 2 и 3).

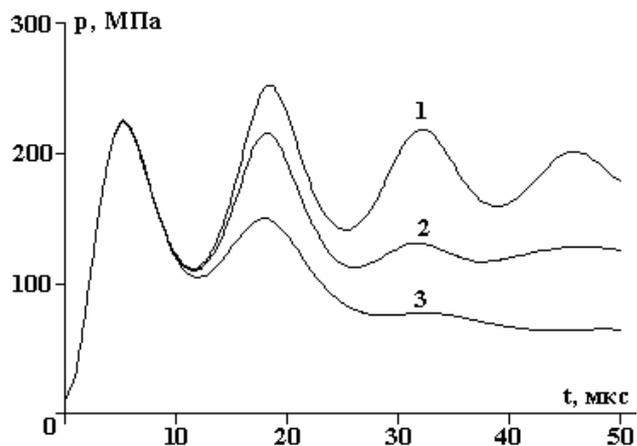


Рис. 3. Давление в канале разряда:

1 – основания цилиндра абсолютно жесткие; 2 – верхнее основание – абсолютно жесткое, нижнее – жесткий подвижный диск; 3 – верхнее основание – свободная поверхность, нижнее – подвижный жесткий диск

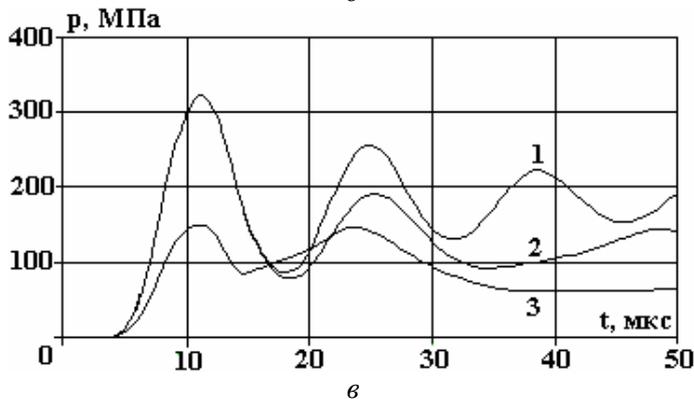
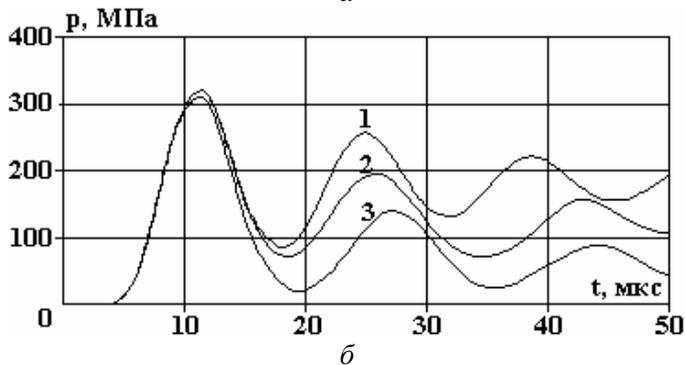
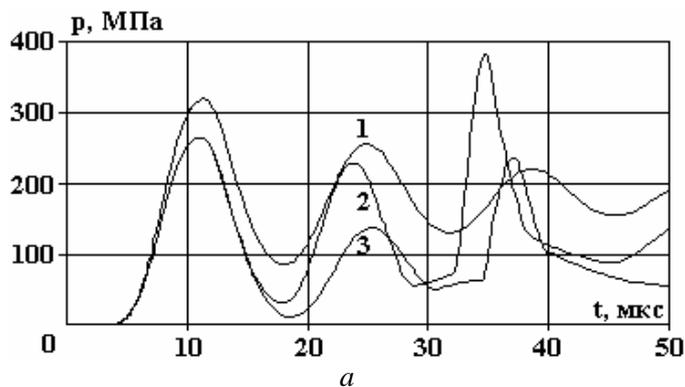


Рис. 4. Давление жидкости на стенку трубы в точках А (а), Б (б) и В (в): 1 – основания цилиндра абсолютно жесткие; 2 – верхнее основание – абсолютно жесткое, нижнее – жесткий подвижный диск; 3 – верхнее основание – свободная поверхность, нижнее – подвижный жесткий диск

Соответствующим образом ведет себя гидродинамическая нагрузка на диск (рис. 5). Первые максимумы на кривых временной зависимости силы давления жидкости на диск во втором и третьем вариантах совпадают, но в дальнейшем сказывается вытекание жидкости через верхнее основание цилиндра, которое имеет место в третьем варианте. Например, второй максимум силы давления во втором варианте в 1,6 раза превышает второй максимум в третьем варианте, а скачок силы давления после удара диска о преграду – в полтора раза.

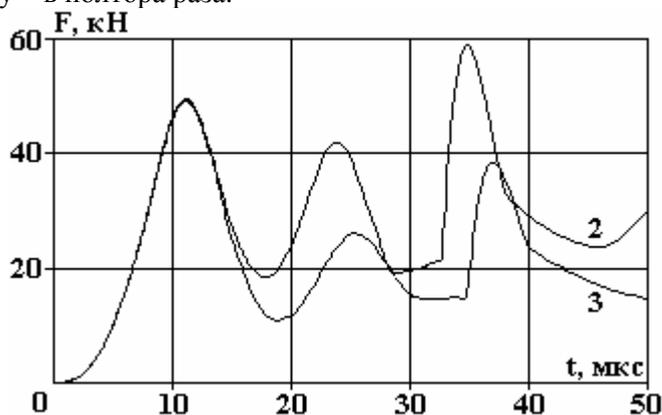


Рис.5. Сила давления на подвижный диск:

2 – верхнее основание – абсолютно жесткое, нижнее – жесткий подвижный диск; 3 – верхнее основание – свободная поверхность, нижнее – подвижный жесткий диск

Отметим также, что влияние вида верхней границы на скорость движения диска в рассматриваемом случае невелико вследствие близкого расположения преграды. Когда верхней границей является жесткая поверхность, амплитуда скорости  $\approx 205$  м/с, а при свободной поверхности  $\approx 175$  м/с, то есть меньше первой на 8%. Скорость вытекания жидкости через верхнее основание цилиндра немного менее 200 м/с.

#### Заключение

Таким образом, замена абсолютно жесткой поверхности на торцах цилиндрической камеры электроразрядного патрона подвижной границей либо свободной поверхностью приводит к весьма существенному (в 1,5–2,5 раза) падению давления в камере, в том числе и на боковую поверхность цилиндра. Следовательно, уменьшается эффективность действия электрического разряда на поверхность обрабатываемой трубы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта/ Под. ред. Г.А.Гулого. М., 1977.
2. Численное решение многомерных задач газовой динамики/ Под. ред. С.К.Годунова. М., 1976.
3. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. М., 1971.
4. Иванов В.В., Швец И.С., Иванов А.В. Подводные искровые разряды. Киев, 1982.

Поступила 17.07.07

#### Summary

Hydrodynamic processes in the cylindrical discharge chamber of little diameter (up to 20 mm) under electrical explosion of a thin wire fixed along its axis are studied in the work with the method of numerical experiment. The dependence of the hydrodynamic loading of the chamber surface upon the kind of boundary conditions on the cylinder butt is, particularly, considered.