

В.Н. Цуркин, А.В. Мельник

ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПЕРЕДАЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО ГЕНЕРАТОРА УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ

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

Введение

Для ряда технологий, основанных на электрических разрядах в жидкости, используют электроразрядный генератор упругих колебаний (ЭРГУК) [1, 2]. При такой конструктивной схеме воздействие на объект обработки осуществляется через передающий подвижный элемент – упругую мембрану или плунжер. Динамика передающего элемента, кроме параметров разряда, определяется как его конфигурацией, так и конфигурацией разрядной камеры. В ЭРГУК возможно наличие воздушной полости сверху камеры, которая также может существенно влиять на закон перемещения передающего подвижного элемента. Известны работы по электроразрядной штамповке, когда деформируемая деталь устанавливается сверху разрядной камеры, и наличие воздушной полости способствует существенному изменению амплитуды деформации заготовки [3].

Вопрос о влиянии объема воздушной полости, находящейся сверху камеры, на амплитуду перемещений передающего подвижного элемента ЭРГУК, расположенного снизу, до настоящего времени остается открытым: такое схемное решение наиболее часто применяется на практике.

Решение данной задачи прежде всего позволит выявить дополнительные возможности управления величиной и характером нагрузки, передаваемой от ЭРГУК к объекту обработки, например, для таких технологий, как электрогидроимпульсная обработка жидких и кристаллизующихся металлов [1, 2].

Цель данной работы – определить степень влияния объемного содержания воздуха в верхней части разрядной камеры на величину амплитуды перемещений подвижного передающего элемента (мембраны) ЭРГУК.

Конструктивная схема

Рассмотрен ЭРГУК (рис. 1 и 2), разрядная камера которого представляет собой жесткий цилиндр с упругим нижним основанием, выполняющий роль подвижного элемента (мембраны). Камера герметична и наполнена водой. Между свободной поверхностью жидкости и верхней стенкой камеры возможно наличие воздушной полости. Электрический разряд реализуется электродной системой стержень–плоскость. Положительный токовод–стержень соосен с камерой, отрицательным электродом служит мембрана. При разряде в канале разряда выделяется электрическая энергия E_p , которую примем с определенной степенью допустимости, равной запасаемой энергии генератора импульсных токов (ГИТ) $W_0 = CU_0^2 / 2$, где C – емкость конденсаторного накопителя, U_0 – напряжение на его обкладках. Под действием давления, возникающего в воде на стадии развития парогазовой полости (ПГП) и последующей ее пульсации, упругая мембрана деформируется, что приводит к перемещению торца цилиндрического волновода ЭРГУК, жестко соединенного с мембраной. При этом силы давления приводят мембрану и жидкость в колебательное движение.

Экспериментальные результаты

Экспериментальные исследования проведены на стенде, представленном на рис.2. Их цель – определить качественное влияние наличия воздушной полости на максимальное значение амплитуды перемещений торца волновода. В реальных условиях использования ЭРГУК для обработки жидкого металла применяется прокачка воды через камеру, что способствует стабилизации разрядов, сокра-

щению времени предпробоя и поддержанию температуры рабочей жидкости не выше 30°C , так как известно, что повышение температуры воды снижает ее электропроводность. Учитывая это обстоятельство, в эксперименте использована система прокачки рабочей жидкости. Амплитуда перемещений торца волновода измерялась пластилиновым крешерным датчиком, который представляет собой круговой цилиндр диаметром 20 и высотой 20 мм. Датчик устанавливался соосно волноводу. ЭРГУК имеет следующие геометрические характеристики (см. рис.1): высота разрядной камеры $H_k = 270$ мм; внутренний диаметр разрядной камеры $d_k = 230$ мм; диаметр электрода $D_э = 70$ мм; его длина $L_э = 200$ мм; диаметр токовода $d_m = 6$ мм; длина токовода $l_m = 30$ мм; рабочая длина канала разряда $l_p = 30$ мм; диаметр подвижной части мембраны $d_m = 230$ мм; толщина мембраны $\delta_m = 16,5$ мм; диаметр волновода $d_в = 20$ мм; длина волновода $l_в = 900$ мм. Рабочее напряжение $U_0 = 50$ кВ; запасаемая энергия ГИТ $W_0 = 1,25$ кДж; частота следования разрядов – 1 Гц; время работы ЭРГУК – 30 с; объем воздушной полости $V_{ВП}$ составлял 1/6 от объема рабочей жидкости $V_{ж}$.

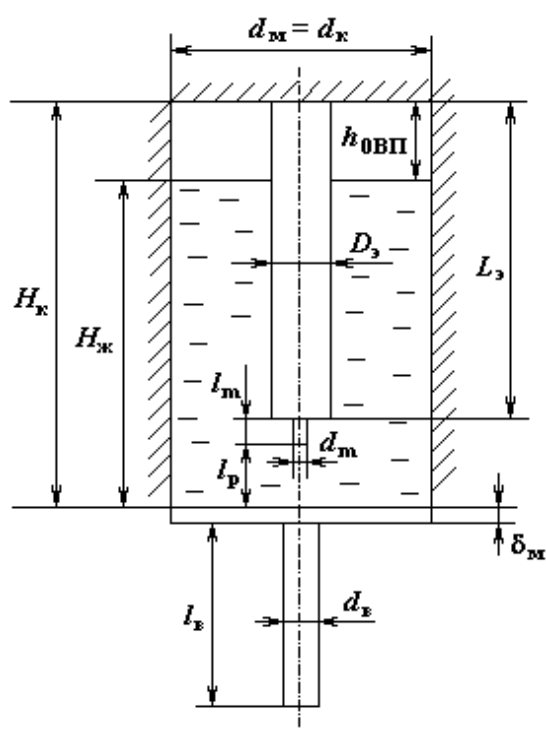


Рис.1. Общий вид ЭРГУК

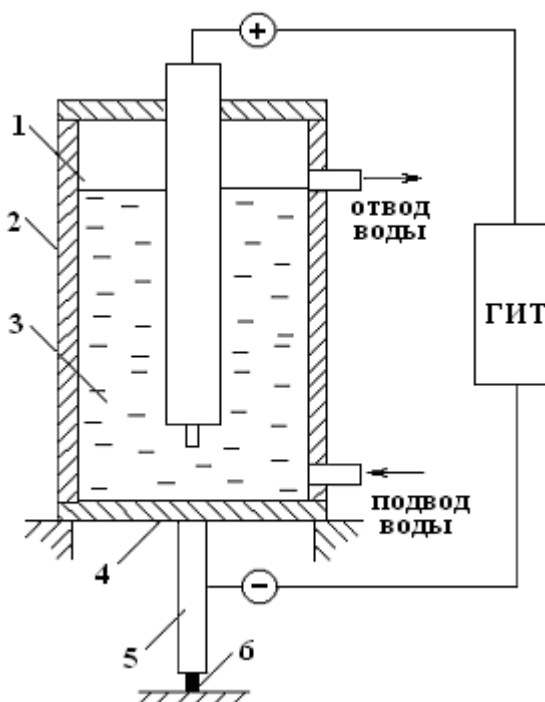


Рис.2. Схема эксперимента.

1 – воздушная полость; 2 – разрядная камера;
3 – рабочая жидкость; 4 – мембрана; 5 – волновод;
6 – крешерный датчик

В результате получено, что пластическая деформация крешерного датчика, нагружаемого вдоль его оси, составила: с воздушной полостью и с прокачкой воды $\sim 2,5$ мм; с воздушной полостью и без прокачки ~ 2 мм; без воздушной полости и с прокачкой $\sim 1,5$ мм; без воздушной полости и без прокачки ~ 1 мм.

То есть очевидно, что наличие воздушной полости и прокачки жидкости положительно влияет на увеличение амплитуды перемещений торца волновода.

Теоретическое исследование

Для численного моделирования рассматриваемого процесса введены следующие предположения и допущения физического и геометрического смысла (рис.3):

- объем рабочей жидкости в камере не меняется, а объем воздушной полости определяется высотой разрядной камеры H_k ;
- в начальный момент времени $t_0 = 0$ уже сформирована ППП сферической формы радиусом $R_{ППП} = 10$ мм [4];
- жидкость, заполняющая разрядную камеру, идеальна и несжимаема;
- сила тяжести не учитывается;
- ППП моделируется в виде цилиндрической полости с диаметром, равным внутреннему диаметру разрядной камеры d_k и высотой $h_{ППП}$;
- диаметр подвижной части мембраны d_m равен d_k ;

Коэффициент цилиндрической жесткости мембраны

$$D = \frac{E\delta_m^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (4)$$

где E – модуль Юнга; δ_m – толщина мембраны; ν – коэффициент Пуассона.

Учитывая (2) – (4), запишем формулу коэффициента упругой силы для мембраны (1) в следующем виде:

$$k_m = \frac{64\pi E\delta_m^3}{3d_m^2(1-\nu^2)}.$$

Давления в ПГП и верхней полости можно оценить согласно соотношениям [3]:

$$\frac{P_{\text{ПГП}}}{P_{\text{ОПГП}}} = \left(\frac{V_{\text{ОПГП}}}{V_{\text{ПГП}}} \right)^n; \quad \frac{P_{\text{ВП}}}{P_{\text{ОВП}}} = \left(\frac{V_{\text{ОВП}}}{V_{\text{ВП}}} \right)^n,$$

где n – показатель адиабаты (для идеального газа $n = 1,4$); $P_{\text{ОПГП}}$, $P_{\text{ОВП}}$, $P_{\text{ПГП}}$, $P_{\text{ВП}}$, $V_{\text{ОПГП}}$, $V_{\text{ОВП}}$, $V_{\text{ПГП}}$, $V_{\text{ВП}}$ – соответственно начальные и конечные значения давлений и объемов ПГП и воздушной полости.

Так как поперечные площади полостей во время движения остаются постоянными, то эти соотношения можно записать следующим образом:

$$\frac{P_{\text{ПГП}}}{P_{\text{ОПГП}}} = \left(\frac{h_{\text{ОПГП}}}{h_{\text{ПГП}}} \right)^n; \quad \frac{P_{\text{ВП}}}{P_{\text{ОВП}}} = \left(\frac{h_{\text{ОВП}}}{h_{\text{ВП}}} \right)^n,$$

где $h_{\text{ОПГП}}$, $h_{\text{ОВП}}$, $h_{\text{ПГП}}$, $h_{\text{ВП}}$ – соответственно начальные и конечные высоты ПГП и верхней воздушной полости.

Считается, что в энергию ПГП переходит 30% от энергии E_p , выделившейся в искровой канал [4].

Тогда внутренняя энергия ПГП в начальный момент времени

$$W_{\text{ОПГП}} = 0,3E_p - A,$$

где A – работа против сил гидростатического давления жидкости, необходимая для образования ПГП радиусом $R_{\text{ОПГП}}$.

Эта работа определяется соотношением

$$A = V_{\text{ОПГП}} P_{\text{жс}}.$$

Внутренняя энергия идеального газа, заключенного в объем $V_{\text{ПГП}}$ [3]:

$$W_{\text{ПГП}} = \frac{P_{\text{ПГП}} V_{\text{ПГП}}}{n-1}.$$

Отсюда давление ПГП в начальный момент времени рассматриваемого процесса:

$$P_{\text{ОПГП}} = \frac{3W_{\text{ОПГП}}(n-1)}{4\pi R_{\text{ОПГП}}^3}.$$

Учитывая условие непротекания на границах раздела сред, запишем следующие геометрические соотношения для высот ПГП и воздушной полости (см. рис.3):

$$h_{\text{ПГП}} = h_{\text{ОПГП}} + \Delta x_g - \Delta x_{\text{жс}}; \quad h_{\text{ВП}} = h_{\text{ОВП}} + \Delta x_{\text{жс}},$$

где $\Delta x_g = x_g - x_{0g}$; $\Delta x_{\text{жс}} = x_{\text{жс}} - x_{0\text{жс}}$.

Тогда с учетом начальных условий

$$h_{\text{ПГП}} = x_6 - x_{\text{жс}} - H_{\text{жс}} / 2; \quad h_{\text{ВП}} = h_{0\text{ВП}} + h_{0\text{ПГП}} + H_{\text{жс}} / 2 + x_{\text{жс}}. \quad (5)$$

Уравнения движения двух масс – волновода вместе с мембраной (m_6) и жидкости ($m_{\text{жс}}$) согласно второму закону Ньютона имеют вид

$$\begin{cases} m_6 \ddot{x}_6 = F(P_{\text{ПГП}}) - k_m \cdot \Delta x_6 - F(P_{\text{атм}}); \\ m_{\text{жс}} \ddot{x}_{\text{жс}} = F(P_{\text{ВП}}) - F(P_{\text{ПГП}}), \end{cases} \quad (6)$$

где $F(P_{\text{ПГП}})$, $F(P_{\text{ВП}})$ – соответственно силы, действующие на массы со стороны ПГП и верхней воздушной полости; $F(P_{\text{атм}})$ – сила, действующая на мембрану со стороны окружающей среды.

Для нахождения решения системы уравнений (6) рассмотрим динамическую модель ЭРГУК (рис. 4). Она представляет собой систему с двумя степенями свободы, массы которой (m_6 и $m_{\text{жс}}$) соединены между собой и опорами тремя упругими элементами. Пружины с коэффициентами жесткости k_1 и k_2 соответствуют воздушной полости и ПГП, а k_3 – упругой мембране. Q – статическая нагрузка, действующая на массу m_6 со стороны окружающей среды.

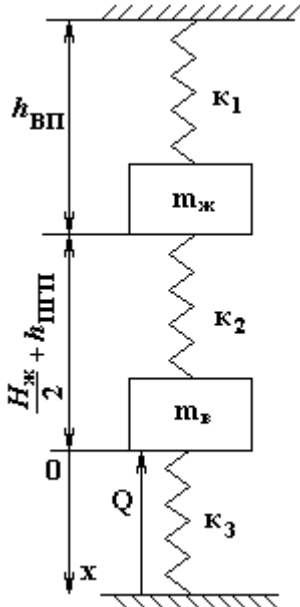


Рис.4. Динамическая модель ЭРГУК

Принимая во внимание (5) и (6), для данной динамической модели ЭРГУК запишем уравнения для системы с двумя степенями свободы в следующем виде:

$$\begin{cases} m_6 \ddot{x}_6 - k_2 \left(x_6 - x_{\text{жс}} - \frac{H_{\text{жс}}}{2} \right)^{-n} + k_3 x_6 + Q = 0; \\ m_{\text{жс}} \ddot{x}_{\text{жс}} - k_1 \left(h_{0\text{ПГП}} + h_{0\text{ВП}} + \frac{H_{\text{жс}}}{2} + x_{\text{жс}} \right)^{-n} + k_2 \left(x_6 - x_{\text{жс}} - \frac{H_{\text{жс}}}{2} \right)^{-n} = 0, \end{cases} \quad (7)$$

где

$$k_1 = P_{0\text{ВП}} S_{\text{жс}} h_{0\text{ВП}}^n; \quad k_2 = P_{0\text{ПГП}} S_m h_{0\text{ПГП}}^n; \\ S_{\text{жс}} = \frac{\pi(d_k^2 - D_3^2)}{4}; \quad k_3 = k_m; \quad Q = P_{\text{атм}} S_m.$$

Здесь $S_{\text{жс}}$ – площадь свободной поверхности жидкости. (7) – система двух дифференциальных нелинейных уравнений второго порядка.

Решение этой системы можно найти с помощью метода Рунге–Кутты четвертого порядка [5]. Задачу Коши для системы (7) при $t \in [0; 20]$ мс и начальных условиях

$$x_{06} = 0; \quad x_{0\text{жс}} = -(h_{0\text{ПГП}} + H_{\text{жс}} / 2); \quad \dot{x}_{06} = \dot{x}_{0\text{жс}} = 0,$$

преобразуем к задаче Коши для системы четырех дифференциальных уравнений первого порядка и найдем решение на сетке данного временного отрезка с шагом 2,5 мкс.

Введем следующие функции:

$$z_1 = x_6; \quad z_2 = \dot{x}_6; \quad z_3 = x_{\text{жс}}; \quad z_4 = \dot{x}_{\text{жс}},$$

тогда система уравнений (7) приобретает вид

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2; \\ \dot{z}_2 = \frac{1}{m_6} \left[-k_3 z_1 + k_2 \left(z_1 - z_3 - \frac{H_{\text{жс}}}{2} \right)^{-n} - Q \right]; \\ \dot{z}_3 = z_4; \\ \dot{z}_4 = \frac{1}{m_{\text{жс}}} \left[k_1 \left(h_{0\text{ПГП}} + h_{0\text{ВП}} + \frac{H_{\text{жс}}}{2} + z_3 \right)^{-n} - k_2 \left(z_1 - z_3 - \frac{H_{\text{жс}}}{2} \right)^{-n} \right], \end{cases} \quad (8)$$

начальные условия $z_{10} = z_{20} = z_{40} = 0; z_{30} = x_{0\text{жс}}$.

Для численного решения системы уравнений (8) разработана программа, которая реализована на ПЭВМ. При отсутствии воздушной полости ($h_{ВП} = 0$) рассматривается только первое уравнение системы (6), то есть во время пульсации ППП жидкость считается неподвижной.

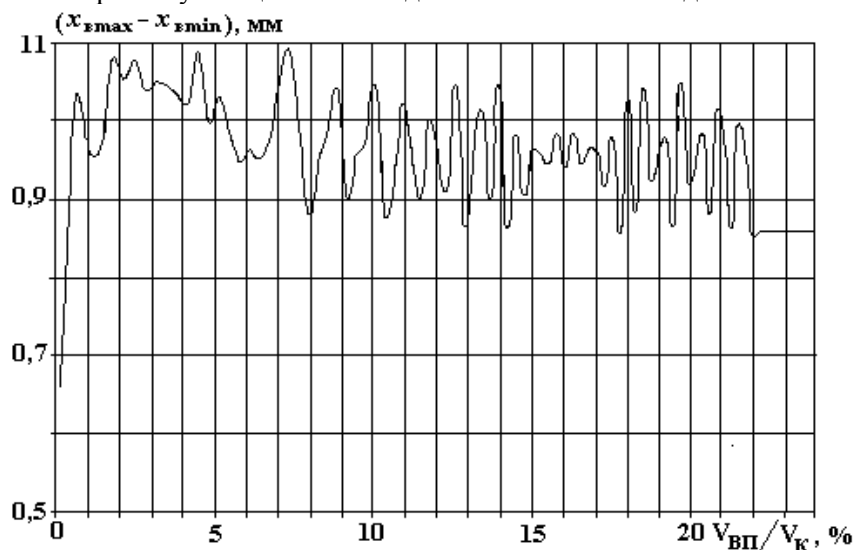


Рис.5. Влияние относительного объема воздушной полости на максимальный размах колебаний волновода

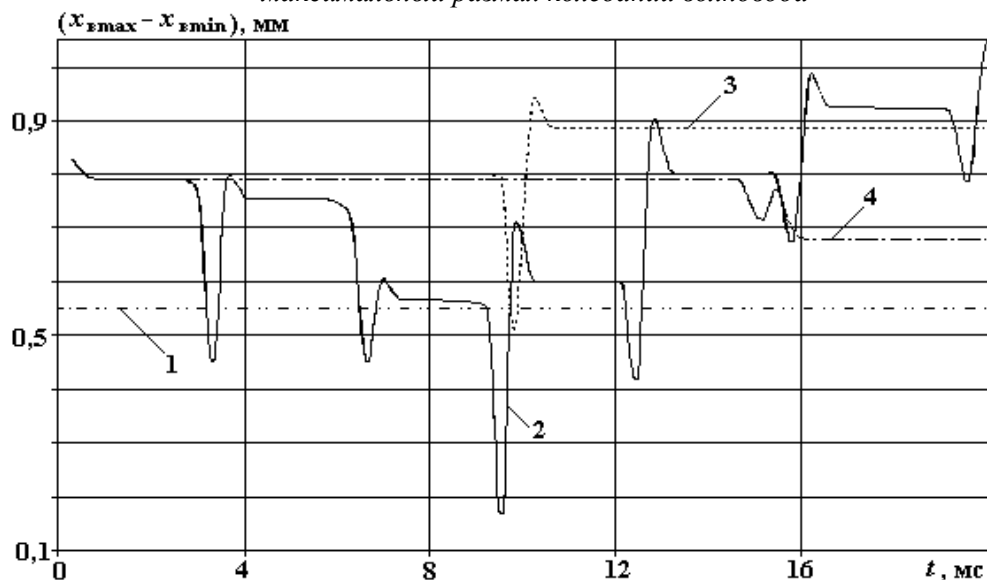


Рис.6. Зависимость размаха колебаний волновода от времени.
1 — $V_{ВП} / V_K = 0\%$; 2 — 3%; 3 — 10%; 4 — 16%

Обсуждение результатов

Полученные теоретические результаты представлены графически. На рис. 5 показаны изменения максимального размаха колебаний волновода в зависимости от начального объема воздушной полости. Видно, что эти изменения в общем имеют статистический характер. Наличие воздушной полости объемом 0,5% от объема разрядной камеры уже приводит к значительному росту размаха (почти в два раза). Наибольшие значения размаха колебаний волновода наблюдаются, когда объем воздушной полости составляет 1,5 – 5 и 7 – 7,5% от объема разрядной камеры. Увеличение объема воздушной полости более 22% не оказывает дальнейшего заметного влияния на размах колебаний волновода. Изменения размаха с течением времени при различных значениях начального объема воздушной полости представлены на рис. 6. При отсутствии полости размах колебаний волновода носит стационарный характер. Относительный объем полости 3% на начальной стадии колебаний несколько понижает их размах, затем наблюдается его значительный рост. При этом колебания происходят с характерными биениями, что будет способствовать образованию кавитационных зон в расплаве, оказывающих положительное воздействие на качество обрабатываемого металла. При 10 и 16% объемном содержании воздуха биения наблюдаются не так часто, причем в первом случае размах с течением времени увеличивается, а во втором – уменьшается.

Выводы

1. Наличие воздушной полости сверху разрядной камеры способствует повышению размаха колебаний волновода.
2. Оптимальный выбор объемного содержания воздуха позволит управлять величиной и характером нагрузки на объект обработки от воздействия передающего подвижного элемента ЭРГУК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поздеев В.А., Царенко П.И., Бутаков Б.И., Малюшевский П.П. Электроразрядные генераторы упругих колебаний. Киев, 1985.
2. Гулый Г.А. Научные основы разрядноимпульсных технологий. Киев, 1990.
3. Чачин В.Н., Богоявленский К.Н., Вагин В.А. и др. Электрогидроимпульсная обработка материалов в машиностроении. Минск, 1987.
4. Кучеренко В.В., Иванов А.В., Пономаренко В.Н. Расчет гидродинамических явлений подводной искры на послеразрядной стадии // Электрический разряд в жидкости и его применение. Киев, 1977.
5. Гуле Ж. Сопротивление материалов / Справочное пособие. М., 1985.
6. Кирилин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. М., 1983.
7. Ракитин В.И., Первушин В.Е. Практическое руководство по методам вычислений с приложением программ для персональных компьютеров. М., 1998.

Поступила 08.04.03

Summary

Experimental and theoretical results of the transmitting amplitude of the reproducing element in the electrodischarge generator of elastic vibrations are presented. It is determined, that the presence of the air cavity at the top of the discharge camera assists to increasing the wave-guide amplitude. The possibility to control over the value and character of the load applying to the treated object by means of air volume containing in the cavity are shown.
