

УДК 532.522.013.2

© 1996 г. В.А. ПОЗДЕЕВ

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА СТРУИ, ВЫЗВАННАЯ ИМПУЛЬСНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ПОРШНЯ В СТРУЙНОМ ГЕНЕРАТОРЕ

Приводятся результаты экспериментального теоретического исследования процесса формирования нестационарного струйного выброса воды импульсным движением поршня в поршневом струйном генераторе. Рассмотрена приближенная математическая модель динамики генератора, которая объясняет механизм образования полученной экспериментально периодической структуры поперечных утолщений струи.

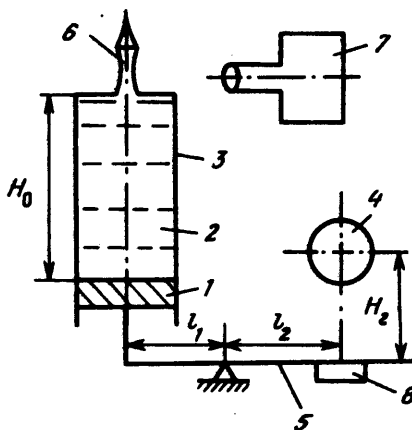
Как показано в [1–3], действие электроразрядного струйного генератора связано с образованием сложной системы струйного истечения жидкости, состоящей из кумулятивной струйки, ствола основной струи и периодической структуры радиальных образований (дисков) на основной струе. В [4] предложена гипотеза о вихревой природе поперечных образований, расположенных на основной струе и движущихся вместе с ней. Однако сложность и многообразие физических процессов, сопровождающих действие электроразрядного плазменного генератора струй жидкости, не позволяет сделать однозначного заключения о физическом механизме столь сложного формирования истечения жидкости. С целью дальнейшего выяснения природы данного феномена был поставлен более простой модельный эксперимент со струйным генератором поршневого типа [5]. Механический генератор был выбран, чтобы исключить из анализа влияние неопределенности формы плазменного поршня.

1. Постановка и результаты эксперимента. Схема экспериментальной установки для исследования струйного выброса воды поршневым струйным генератором при импульсном возмущении приведена на фиг. 1.

Установка состоит из стального цилиндра с недеформируемыми стенками 3, который вместе со стальным также недеформируемым поршнем 1 образует камеру, заполненную полностью водой 2. Высота столба жидкости H_0 , диаметр камеры D . Верхний торец камеры закрыт крышкой, имеющей отверстие диаметром d для выброса струи 6. Шток и рычаг 5 служат для передачи статического и динамического усилий на поршень. Статическое усилие создается дополнительным грузом 8, сила тяжести которого уравнивает систему. Масса груза 8 m_2 равна сумме массы поршня со штоком и массы воды в камере. Динамическое усилие, генерирующее выброс воды, создается ударом падающего с высоты H_3 груза 4 массой m_3 . Струйный выброс 6 вблизи среза отверстия фотографируется скоростной камерой 7.

На фиг. 2 приведена система снимков струи, сделанных с интервалом по времени $0,5 \cdot 10^{-4}$ с. Как видно из снимков, на верхнем торце струи возникает небольшая кумулятивная струйка, которая быстро выходит из кадра. Кроме того, на основной струе расположена периодическая структура поперечных утолщений (узлов) наподобие

Фиг. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – поршень со штоком; 2 – вода; 3 – камера; 4 – падающий груз; 5 – рычаг; 6 – струя; 7 – скоростная камера; 8 – груз для статического уравнивания



тех, которые имеют бамбук. Эти утолщения движутся вместе со струей, хотя их скорость вблизи среза отверстия меньше, чем скорость жидкости в основной массе струи. Скорость узлов возрастает по мере удаления от среза отверстия. Длина всего струйного выброса составляет около 300 мм, что соответствует перемещению поршня на 3 мм. Период появления узлов из отверстия составляет 10^{-4} с.

На фиг. 3 представлены графически временные характеристики струйной системы: кинематика движения первых четырех узлов струи вблизи среза отверстия и средняя скорость движения узлов струи, которая получена путем численного дифференцирования кривых перемещения узлов. В заключение раздела приведем численные значения параметров установки: $D = 25$ мм, $d = 2,5$ мм, $H_0 = 75$ мм, $H_3 = 450$ мм, $l_2/l_1 = 0,5$, $m_2 = 0,1$ кг, $m_3 = 0,2$ кг.

2. Математическая модель работы поршневого струйного генератора. Из условия статического равновесия системы до падения груза 4 имеем соотношение

$$m_1 l_1 = m_2 l_2 \quad (2.1)$$

где m_1 – суммарная масса поршня, штока и столба воды в камере; m_2 – масса уравнивающего груза 8; l_2, l_1 – плечи рычага 5.

Работа струйного генератора происходит следующим образом. При падении груза 4 массой m_3 с высоты H_3 динамическое усилие удара через рычаг 5 передается поршню, перемещение которого приводит к образованию струйного выброса. Уравнение сохранения количества движения элементов механической системы при падении груза имеет вид

$$(m_1 - m_0) v_1 + (m_2 + m_3) v_2 = m_3 v_3$$

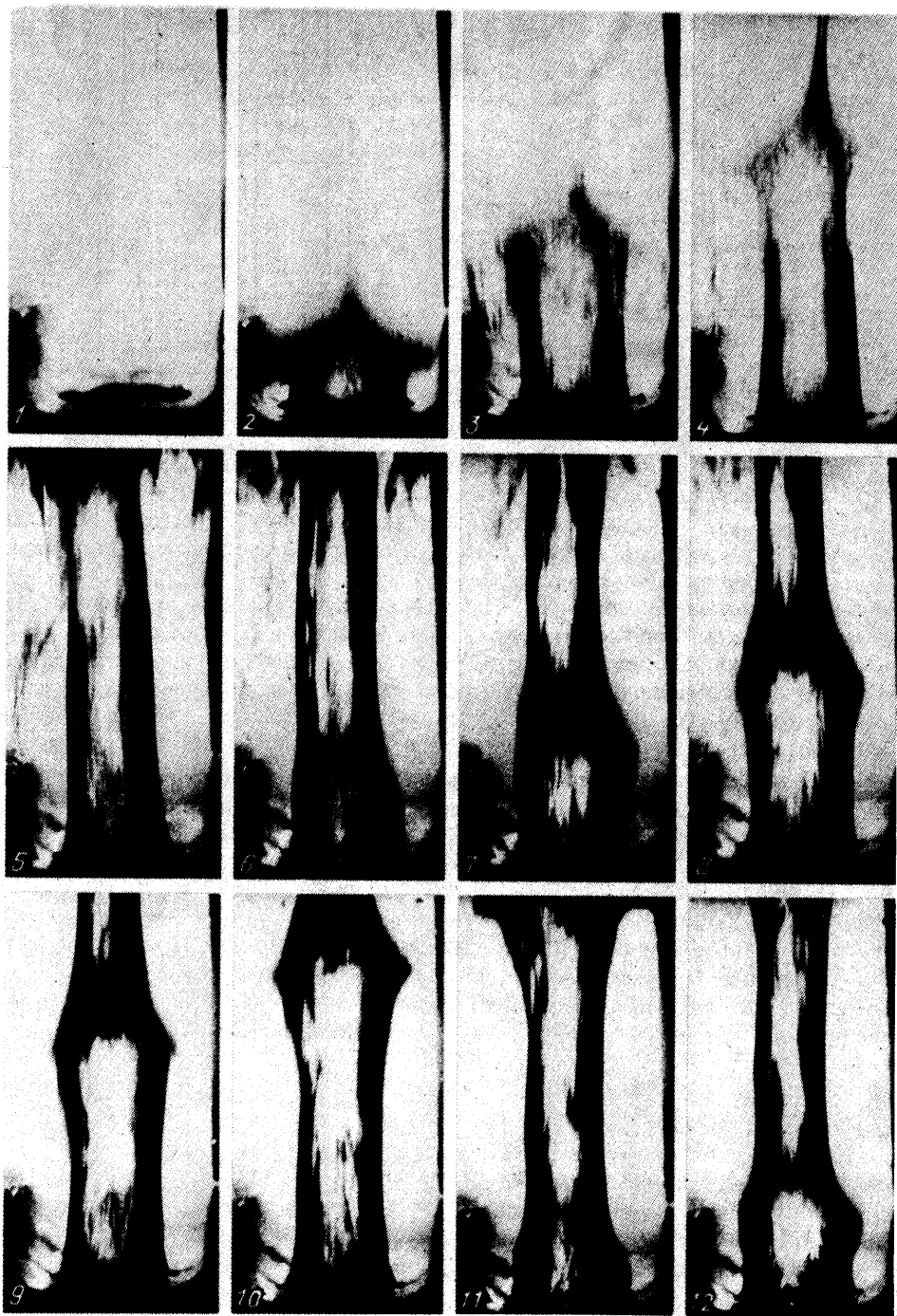
$$v_3 = \sqrt{2gH_3} \quad (2.2)$$

где v_1 – скорость поршня в момент удара груза, v_3 – скорость груза в момент, предшествующий контакту его с рычагом, v_2 – скорость груза после контакта. Скорости v_2 и v_1 связаны соотношением $v_2 = v_1 l_2 / l_1$. Тогда из равенства (2.2) с учетом (2.1) и соотношения для скоростей v_2 и v_1 получим следующее представление для скорости поршня в начальный момент времени:

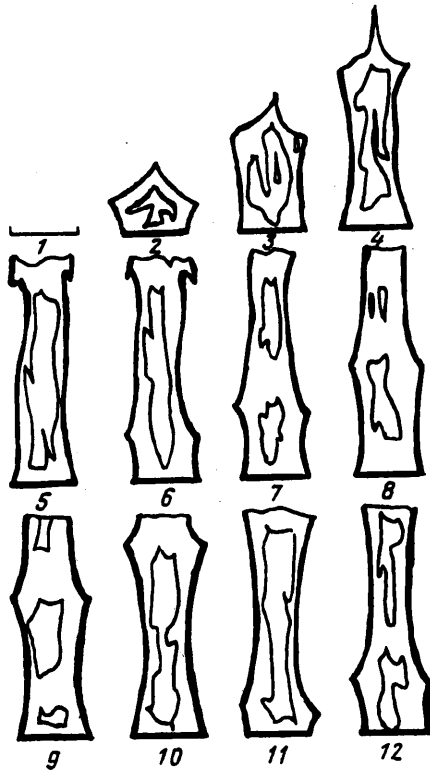
$$v_1 = v_3 \left(\frac{2m_1 - m_0}{m_3} + \frac{l_2}{l_1} \right)^{-1}$$

которое с учетом равенства $2m_1 - m_0 = m_3$ приобретает вид

$$v_1 = \sqrt{2gH_3} \left(1 + \frac{l_2}{l_1} \right)^{-1} \quad (2.3)$$



Фиг. 2,а. Выборочная система снимков



Фиг. 2.6. Схема струи

Теперь рассмотрим задачу формирования поля давления в камере и определим давление, действующее на торец камеры с отверстием. Жидкость принимаем идеальной сжимаемой, а сами возмущения достаточно малыми. В рамках принятых допущений движение жидкости в камере генератора описывается линейным волновым уравнением

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = 0 \quad (2.4)$$

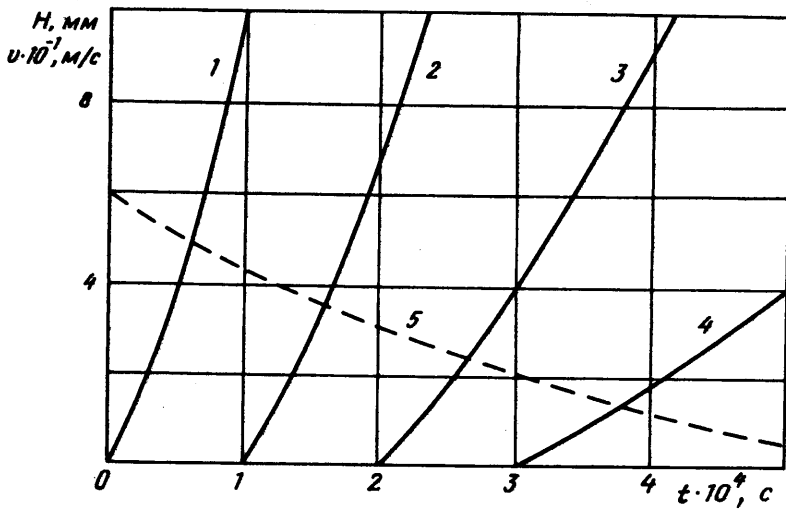
где x – линейная координата с началом отсчета от поверхности контакта поршня и жидкости, t – время, Φ – потенциал скоростей возмущенного движения жидкости, c_0 – скорость звука невозмущенной среды. При известном потенциале скоростей массовая скорость жидкости и давление в ней определяются известными выражениями

$$v = \frac{\partial \Phi}{\partial x}; \quad p = -\rho_0 \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (2.5)$$

где ρ_0 – плотность среды. Граничное условие на верхнем торце камеры, пренебрегая влиянием отверстия, запишем в виде условия непротекания жидкости

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right|_{x=H_0} = 0 \quad (2.6)$$

Граничное условие на контактной поверхности поршня с водой является записью



Фиг. 3. Кинематические параметры струи: 1, 2, 3, 4 – кинематика движения первых четырех узлов; 5 – скорость движения узлов у отверстия

уравнения динамики поршня

$$\left(m \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial t} + b \rho_0 \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) \Big|_{x=0} = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_{x=0} = v_1$$

где m – приведенная масса поршня ($m \approx m_1 + m_2 + m_3$), f – площадь контактной поверхности поршня ($f = \pi d^2/4$). Начальные условия для жидкости принимаем нулевыми везде, за исключением контактной поверхности. Для решения поставленной задачи (2.4)–(2.7) воспользуемся преобразованием Лапласа по времени t . Тогда математическая постановка задачи в области изображений по Лапласу примет вид

$$\frac{d^2 \Phi^L}{dx^2} - \left(\frac{s}{c_0} \right)^2 \Phi^L = 0 \quad (2.8)$$

$$v^L = \frac{d\Phi^L}{dx}, \quad p^L = -\rho_0 s \Phi^L$$

$$\frac{d\Phi^L}{dx} \Big|_{x=H_0} = 0$$

$$\left(ms \frac{d\Phi^L}{dx} + f \rho_0 s \Phi^L \right) \Big|_{x=0} = 0$$

где s – переменная преобразования Лапласа, а верхним индексом L обозначена трансформанта преобразования. Как известно, решение волнового уравнения в области трансформант имеет вид

$$\Phi^L(s, x) = A(s)e^{sx/c_0} + B(s)e^{-sx/c_0} \quad (2.9)$$

где A, B – постоянные, определяемые из граничных условий. После определения

постоянных получим следующее представление для давления в области трансформант:

$$p^L(s, x) = 2\rho_0 c_0 \nu_1 \frac{e^{-s t_0/2}}{s + \alpha} \operatorname{ch} \frac{s(x - H_0)}{c_0} \left(1 - \frac{s - \alpha}{s + \alpha} e^{-s t_0} \right)^{-1} \quad (2.10)$$

$$t_0 = 2 \frac{H_0}{c_0}, \quad \alpha = \frac{f p_0 c_0}{m}$$

где α – постоянная времени. Принимая в выражении (2.10) $x = H_0$, получим трансформанту давления, действующего на торец камеры с отверстием

$$p^L(s, H_0) = 2\rho_0 c_0 \nu_1 \left[\frac{e^{-s t_0/2}}{(s + \alpha)(1 - e^{-s t_0})} \right] \left(1 - \frac{2\alpha}{s + \alpha} \frac{e^{-s t_0}}{1 - e^{-s t_0}} \right)^{-1} \quad (2.11)$$

где квадратными скобками выделена главная часть изображения. Анализ вида (2.11) позволяет сказать следующее об оригинале. Экспонента в числителе говорит просто о запаздывании сигнала на торце по сравнению с давлением на поршне. Функция давления является ступенчато-импульсной функцией с промежутками времени между импульсами, равными времени двойного пробега

$$p_c(t) = 2p_0 \left[e^{-\alpha t} + \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\alpha(t - n t_0)} \right] \quad (2.12)$$

$$p_0 = \rho_0 c_0 \nu_1$$

где p_0 – амплитуда импульса давления. Теперь, зная давление на срезе отверстия, определим массовую скорость жидкости в струе [6]

$$\frac{d(m_c \nu_c)}{dt} = p_c(t), \quad m_c = f \rho_0 \int_0^t \nu_c(\tau) d\tau_1 \quad (2.13)$$

где ν_c – массовая скорость жидкости в струе. Из выражения (2.13) можно получить следующую зависимость:

$$\nu_c(t) = \sqrt{\frac{1}{2\rho_0} \left(\int_0^t p_c(\tau) d\tau \right) \left(\int_0^t p_c(\tau) d^2\tau \right)^{-1/2}} \quad (2.14)$$

Если для давления справедливо представление в виде $p_c(t) = 2p_0 e^{-\alpha t}$, то из выражения (2.14) получим

$$\nu_c(t) = \sqrt{\frac{p_0}{\rho_0} (1 - e^{-\alpha t})(\alpha + e^{-\alpha t} - 1)^{-1/2}} \quad (2.15)$$

откуда следует значение скорости струи при $t = 0$

$$\nu_c|_{t=0} = \sqrt{\frac{2p_0}{\rho_0}} \quad (2.16)$$

Учитывая, что в начале движения поршня им генерируется давление $p_0 = \rho_0 c_0 \nu_1$, а давление на крышке камеры удваивается, с учетом (2.16) получим связь скорости поршня со скоростью струи

$$2 \left(\frac{\nu_1}{c_0} \right) = \left(\frac{\nu_c}{c_0} \right)^2$$

Используя полученные теоретические зависимости и необходимые значения параметров экспериментальной установки, получим следующие результаты.

3. Заключение. Совпадение промежутка времени между соседними импульсами давления, действующего на крышку камеры струйного генератора с периодом появления узлов на струе, позволяет сделать вывод, что по крайней мере в данном эксперименте механизм появления утолщений струй связан с периодической картиной поля давления в камере поршневого струйного генератора.

Погрешность определения начальной скорости струи по скорости движения узлов и по теоретической оценке составила более 20%. Причина расхождения заключается в том, что скорость движения узлов должна быть меньше скорости жидкости в струе из-за поперечного растекания жидкости в районе утолщений и трения о стенки отверстия. Это является методической погрешностью экспериментальной оценки скорости струи по узлам. Инструментальная погрешность возникает вследствие погрешности определения положения узлов на струе и графического дифференцирования кривой перемещения узлов. В свою очередь предлагаемая теория не учитывает влияния отверстия на поле давления в камере, трения жидкости о стенки отверстия и радиального растекания жидкости в струе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Малюшевский П.П.* Источник генерируемых электрическим разрядом жидкостных струй // Электрический разряд и его применение. Киев: Наук. думка, 1977. С. 26–34.
2. *Немировский А.З., Малюшевский П.П., Голубенко Ю.Т.* К выбору эффективного решения плазменного ускорителя в конденсированных средах // ЖТФ. 1978. Т. 48. Вып. 9. С. 1871–1876.
3. *Малюшевский П.П., Пастухов В.М., Стрельцов В.А.* Плазменный ускоритель в конденсированной среде // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1982. № 8. Вып. 2. С. 63–70.
4. *Малюшевский П.П.* О механизме формирования кумулятивных струй при метании жидкости плазменным ускорителем // Изв. АН СССР. МЖГ. 1988. № 5. С. 39–44.
5. *Поздеев В.А.* Нестационарная периодическая структура струи, вызванная импульсным возмущением поршня струйного генератора // Электрический разряд в жидкости и его применение в промышленности. Киев: Наук. думка, 1992. С. 50.
6. *Поздеев В.А.* Нестационарные волновые поля в областях с подвижными границами. Киев: Наук. думка, 1992. 242 с.

Николаев

Поступила в редакцию
30.I.1995