

Внутренние напряжения в объеме пьезоэлектрического преобразователя изолированы, благодаря тому, что диффузия в твердом теле не успевает следовать за колебаниями скачка потенциала на его поверхности. Джоулев нагрев электролита квадратичен по току, меняется с удвоенной частотой переменного тока и потому не рассматривается на частоте измерения технологических параметров.

Установка обладает: простотой конструкции, высокой производительностью, сокращением технологических затрат, большой точностью изготовления сложнопрофильных изделий, контролем и коррекцией технологических параметров в процессе СЭ и ЭХФО, а также совмещает в одном технологическом решении процессы электроосаждения и размерной электрохимической обработки [2,3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобразования РФ по программе “Фундаментальные исследования в области химических технологий” (шифр гранта 98-8-5.4-131).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов А.Д., Козак Е. Высокоскоростное электрохимическое формообразование. М., 1990.
2. Кукоз Ф.И., Кирсанов С.В., Зибров В.А. Нелинейная модель электрохимической ячейки в системах регулирования межэлектродного зазора. // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки, 1999. № 3. С. 52–53.
3. Зибров В.А. Динамическая модель пьезоэлектрического преобразователя при измерении поверхностного натяжения. // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки, 1999. № 3. С. 58–60.

*Поступила 14.02.2000*

## Summary

The installation for selective electrochemical deposition and electrochemical machining of complex-profile products with use of properties of the multifunctional piezoelectric converter is considered. The block diagram of installation for selective electrochemical deposition of complex-profile products in which a piezoelectric converter is used as a electrode-tood drive and a sensor of physical and chemical machining parameters, is presented.

---

Г.И. Бумагин, В.А. Иванов

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ В СТУПЕНИ ЭГД-ГЕНЕРАТОРА-ДЕТАНДЕРА БОЛЬШОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

*Омский государственный технический университет  
пр. Мира, 11, г. Омск – 50, 644050, Россия*

Во всех ранее опубликованных работах принципиальная схема ЭГД – генератора-детандера (ЭГД-Г-Д), как правило, строилась на системе электродов: эмиттер-игла, вытягивающий электрод – кольцо и коллектор – кольцо. И все теоретические и экспериментальные исследования проводились на этой модели. Основной недостаток этой схемы – малые токи на эмиттере и как следствие малые мощности одной ступени (до 50 Вт). В результате для развития больших мощностей и производительности строились многоступенчатые модели с параллельным и последовательным включением ступени.

Нами предлагается новая принципиальная схема ЭГД-Г-Д: эмиттер – тонкостенные коаксиальные кольца, заостренные с одной стороны; - вытягивающий и коллекторный электроды – коаксиальные цилиндры с круговыми отверстиями, но смещенные относительно друг друга (рис. 1). Такая схема позволяет строить ЭГД-Г-Д практически любой производительности и любой мощности (до нескольких МВт), а в одной ступени развивать мощность до десятков кВт.

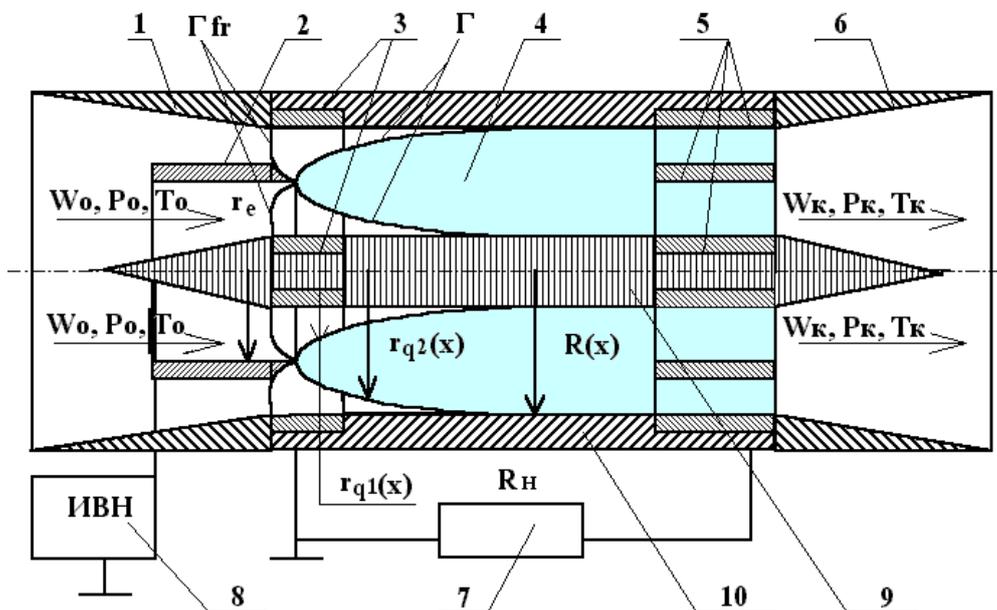


Рис. 1. Принципиальная схема ЭГД-генератора:

- 1 – сопловой аппарат; 2 – эмиттерный электрод; 3 – вытягивающий электрод; 4 – канал;  
 5 – коллекторный электрод; 6 – диффузор; 7 – сопротивление нагрузки;  
 8 – ИВН; 9 – обтекаемое тело; 10 – корпус.

Для расчета таких ступеней ниже излагается математическая модель процессов, происходящих в основных рабочих зонах и анализ работы предложенной конструкции ЭГД-Г-Д.

Главной целью создания математической модели процессов в ЭГД-Г-Д являлось определение оптимальной конструкции генератора, проведение полного расчета проточной его части и оценка эффективности его работы. Вся конструкция ЭГД-Г-Д строится из расчета, что в сопле срабатывает определенная разность энтальпий (разность давлений), достаточная для развития околосвуковой скорости потока, а в последующих ступенях срабатывает как кинетическая, так и потенциальная энергия потока. Одной из задач расчета является определение оптимального соотношения между этими энергиями.

Математическая модель строилась из предположения, что в рабочей части ЭГД-Г-Д действуют два внешних поля и поле от объемного заряда, заполняющего все пространство между эмиттерным электродом и коллектором (граница  $\Gamma$ ). Первое внешнее поле действует между поверхностью острых кромок эмиттера и поверхностью вытягивающего электрода от приложенного между ними напряжения  $U_{\phi_0}$  и ограничено внешней поверхностью  $\Gamma_{fr}$ . Это поле вызывает высокую напряженность возле острых кромок эмиттера и за счет коронного разряда формирует объемный заряд и конвективный ток  $J_0$  в зоне преобразования.

Второе внешнее поле действует между коллектором и вытягивающим электродом и образуется в результате появления в процессе работы высокого потенциала  $U_{\phi_0}$  на коллекторе в связи с большим сопротивлением  $R_H$  во внешней цепи. Это поле направлено против движения униполярно-заряженного потока, и поток, перенося заряды против сил электрического поля за счет вязкостного взаимодействия нейтральных молекул с зарядами-ионами, расширяется с совершением работы. При этом величина образующего конвективного тока определяется конструкцией и размерами эмиттера, вытягивающего электроды (величиной их поверхности), но в первую очередь значением напряжения  $U_{\phi_0}$  и подвижностью образующихся зарядов. Силы электрического поля, действующие на заряды, в зоне ЭГД – преобразования определяются в первую очередь величиной образующегося на коллекторе напряжения  $U_{\phi_k}$ , конструкцией и расположением между собой коллекторным и вытя-

гивающим электродами, а также величиной вязкостного взаимодействия нейтральных молекул с зарядами, и во вторую очередь вязкостью рабочей среды, которая характеризуется подвижностью зарядов  $b$ .

Математическая модель разработана в квазиодномерном приближении при стационарном протекании процессов в отсутствие химических реакций, но с учетом радиальных составляющих напряженности, как внешнего электрического поля, так и поля объемного заряда. Передачей тепла от стенок канала к потоку и наоборот, а также переносом тепла теплопроводностью в потоке в осевом направлении пренебрегаем. Кроме этого приняты следующие допущения:

Процессы зарядообразования (образования объемного заряда) и процессы взаимодействия зарядов с нейтральным потоком условно разделены между собой в пространстве границей  $\Gamma$ . Процесс зарядообразования и ионизации с помощью коронного разряда происходит только внутри границы  $\Gamma$  вблизи и на поверхности острых кромок эмиттера. Внутренняя область разряда значительно меньше внешней, поэтому объемом внутренней области из-за ее малости (в 100–1000 раз меньше внешней области разряда) пренебрегаем.

Будем считать, что на границе зоны ионизации и области взаимодействия зарядов с нейтральным потоком  $\Gamma$  модуль напряженности  $|E|$  равен начальной напряженности зажигания короны  $E^*$ , которая остается постоянной величиной в течение всего процесса горения короны. Равенство  $|E|=E^*=E_0$  является граничным условием для области взаимодействия зарядов с нейтральным потоком.

На основе физической модели и принятых допущений была получена математическая модель, описывающая процессы в рабочей зоне преобразования энергии и переноса зарядов, а также в зоне сбора и рекомбинации зарядов с учетом процессов зарядообразования во внутренней области.

Система уравнений состоит из: дифференциальных уравнений движения, энергии, профиля канала, границы области существования объемного заряда с радиусом  $r_q$ , плотности конвективного тока  $j_x$  и скорости зарядов в зоне преобразования энергии:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{J_x E_x}{W_q F} - \rho W \frac{dW}{dx} + \xi \rho \frac{W^2}{4R}; \quad (1)$$

$$\frac{dW_g}{dx} = \frac{W_g}{(a^2 - W_g^2)} \left( \frac{J_x E_x}{m\chi} k_z - \frac{a^2 dF}{F dx} + \xi \frac{k W_g^2}{z 4R} \right); \quad (2)$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{J_x E_x}{mCp} - \frac{W_g}{Cp} \frac{dW_g}{dx}; \quad (3)$$

$$\frac{dr_q}{dx} = -\frac{bE_r}{W_q}; \quad (4)$$

$$\frac{dj_x}{dx} = -\frac{j_x bE_r}{W_q R}, \quad l_q \leq x \leq L; \quad (5)$$

$$W_q(x) = W_g(x) + bE_x(x); \quad (6)$$

– уравнений суммарной осевой и радиальной составляющих напряженности электрического поля  $E_x$  и  $E_r$ :

$$E_x(x) = E_x^{\phi}(x) + E_x^q(x); \quad (7)$$

$$E_r(x) = E_r^{\phi}(x) + E_r^l(x); \quad (8)$$

которые соответственно определяются уравнениями: здесь  $E_x^{\phi}$  и  $E_r^{\phi}$  – осевая и радиальная составляющие напряженности внешнего электрического поля;  $E_x^q$  и  $E_r^q$  – осевая и радиальная составляющие напряженности поля объемного заряда,

$$E_x^{\phi}(x) = \frac{U_{\phi_k}}{(x + a_1) L n \left( \frac{2L_c}{4L_k + \pi R_{dl}} \right)}, \quad (9)$$

где

$$a_1 = \frac{2L_c \cdot L}{4L_k - 2L_c + \pi R_{dl}};$$

$$E_r^\varphi(x) = \frac{U_{\varphi_0} \cdot a_3 \cdot L_c}{4(R_c^2 - r_0^2)a_4(x^2 + a_2)}, \quad \text{где}$$

$$a_2 = \frac{L_c^2 \cdot l_0}{4(L_c - l_0)}, \quad a_3 = \sqrt{\frac{l_0 R_c^2 - L_c r_0^2}{L_c - l_0}},$$

$$a_4 = \operatorname{arctg}\left(\frac{a_3 \cdot (R_c - r_0)}{R_c \cdot r_0 + a_3^2}\right);$$

$$E_x^q(x) = \frac{1}{40\pi^2 \varepsilon \varepsilon_0 r_e r_q(x)} \left[ \int_0^x \frac{(4\alpha_b + \alpha_a) J_x(x_1)}{W_q(x_1)} dx_1 - \int_x^L \frac{(4\alpha_b + \alpha_a) J_x(x_1)}{W_q(x_1)} dx_1 \right], \quad \text{где}$$

$$\alpha_a = \begin{cases} \operatorname{arctg}\left(\frac{2|x - x_1| r_q(x)}{y_r}\right) + \pi \begin{cases} 0, & y_r < 0 \\ 1, & y_r > 0 \end{cases}; \\ \frac{\pi}{2}, & y_r = 0, \quad y_r = |x - x_1|^2 + r_q^2(x_1) - r_q^2(x); \end{cases}$$

$$\alpha_b = 2 \operatorname{arctg}\left(\frac{r_q(x)}{|x - x_1|}\right);$$

$$E_r^q(x) = \frac{r_q(x)}{8\pi^2 \varepsilon \varepsilon_0 r_e} \int_0^L \frac{J_x(x_1)}{W_q(x_1)(r_q^2(x) + |x - x_1|^2)} dx_1; \quad (12)$$

– уравнения осевой составляющей конвективного тока:

$$J_x(x) = \begin{cases} \frac{J_0 \cos(\alpha) \cdot W_q(x)}{W_{q_0}}, & 0 \leq x \leq l_q; \\ j_x 4\pi r_e r_q(x), & l_q \leq x \leq L; \end{cases} \quad \text{где} \quad (13)$$

$$J_0 = \frac{\pi \varepsilon \varepsilon_0 a_3 r_e l_0 (U_{\varphi_0} - U^*)}{\cos(\alpha_0) \Delta s (a_3^2 + r_0^2) a_4} \left( W_0 + b \frac{U_{\varphi_0} L_c a_3}{4(R_c^2 - r_0^2) a_4 a_2} \right); \quad (14)$$

$$\alpha_0 = \operatorname{arctg}\left(\frac{b E_{r_0}}{W_{q_0}}\right);$$

здесь  $\Delta s$  – длина внутренней зоны разряда,  $\Delta s \approx r_0$ ;  $b$  – подвижность заряженных частиц, определяется по уравнению, полученному авторами на основе экспериментов:

$$b = b_0 \left(\frac{\eta_0}{\eta}\right)^{1.5} \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{1.3} \quad (15)$$

здесь  $b_0$ ,  $\eta_0$ ,  $\rho_0$  – подвижность заряженных частиц, динамическая вязкость и плотность при нормальных условиях,  $\eta$ ,  $\rho$  – динамическая вязкость и плотность в рабочих условиях;

– уравнения состояния рабочего тела, расхода и уравнений профиля канала ступени:

$$p = z p R_g T; \quad (16)$$

$$m = \rho W F; \quad (17)$$

$$R(x) = \begin{cases} R_c, & 0 \leq x \leq L_c/2; \quad \beta = (R_k - R_c)/L; \\ R_c + x \cdot \beta, & L_c/2 \leq x \leq L - L_k; \\ R_k, & L - L_k \leq x \leq L; \end{cases} \quad (18)$$

$$F(x) = \begin{cases} 4\pi r_e R_c, & 0 \leq x \leq L_c/2; \\ \pi((r_e + R)^2 - R_t^2), & L_c/2 \leq x \leq L - L_k; \\ \pi((r_e + R_k)^2 - R_t^2), & L - L_k \leq x \leq L. \end{cases} \quad (19)$$

В качестве граничных условий приняты

$$p(0) = p_0; \quad (20)$$

$$T(0) = T_0; \quad (21)$$

$$W_g(0) = W_0; \quad (22)$$

$$r_q(0) = r_0. \quad (23)$$

Начальные условия

$$j_x(I_q) = \frac{J_x(I_q)}{4 * \pi * r_e * r_q(I_q)}; \quad (24)$$

$$E_x(0) = E^* = E_0; \quad (25)$$

$$W_q(0) = W_0 + bE_0. \quad (26)$$

Полученная математическая модель (1)–(26) решалась численно с использованием разностной схемы Рунге-Кутты четвертой степени. За начальное состояние рабочего тела при расчете первой ступени были приняты термодинамические параметры тела после соплового аппарата. Для расчета последующих ступеней за начальные  $p_0$ ,  $T_0$  и  $W_0$  принимались конечные значения давления  $p_k$ , температуры  $T_k$  и скорости  $W_k$ , полученные в предыдущих ступенях.

Эта математическая модель позволяет проследить за изменением основных характеристик рабочего тела, электрического поля и тока по длине проточной части ступени, дать оценку эффективности и выработать оптимальный режим работы ЭГД-Г-Д.

Как показывает анализ, существенное влияние на эффективность работы ступени оказывает режим работы ЭГД-Г-Д, особенно скорость потока  $W$  и изменение скорости потока  $\Delta W$  в ступенях. Скорость потока  $W$  в ЭГД-Г-Д на всей длине ступени должна быть выше скорости перемещения заряда  $W \geq W_q$ . В противном случае в ЭГД-Г-Д появляются насосные режимы работы. Это имеет место тогда, когда суммарное изменение потенциала  $\varphi_x$  по длине ступени имеет максимум, и напряженность суммарного поля в зоне преобразования изменяет свой знак и направление. Такой случай работы ЭГД-Г-Д показан на рис. 2–4.

На рис. 2 видно, что суммарный потенциал  $\varphi_\Sigma$ , равный сумме потенциалов внешнего поля  $\varphi_\phi$  и поля объемного заряда  $\varphi_q$ , на длине  $x^* = 5,5$  мм имеет максимум. Как следствие этого напряженность суммарного поля  $E_\Sigma$ , равная сумме напряженностей внешнего поля  $E_\phi$  и поля объемного заряда  $E_q$  на той же длине  $x^*$  меняет свой знак и направление (рис. 3), а скорость перемещения зарядов  $W_q$  становится выше скорости нейтрального потока  $W$  (рис. 4), это означает что на длине проточной части  $x \geq x^*$  возникает насосный режим, который приводит не к расширению, а наоборот, к сжатию, повышению давления и температуры рабочего тела.

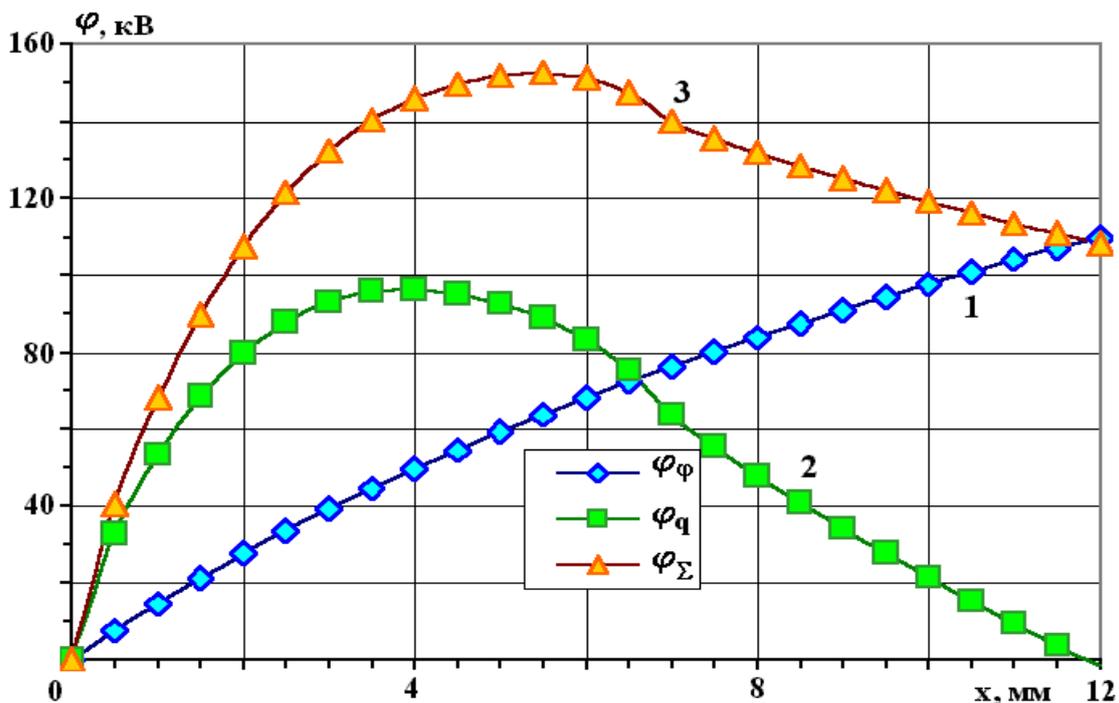


Рис. 2. Распределение потенциалов внешнего электрического поля  $\varphi_\phi$  (1) поля объемного заряда  $\varphi_q$  (2) и суммарного потенциала  $\varphi_\Sigma$  (3) по длине ступени.

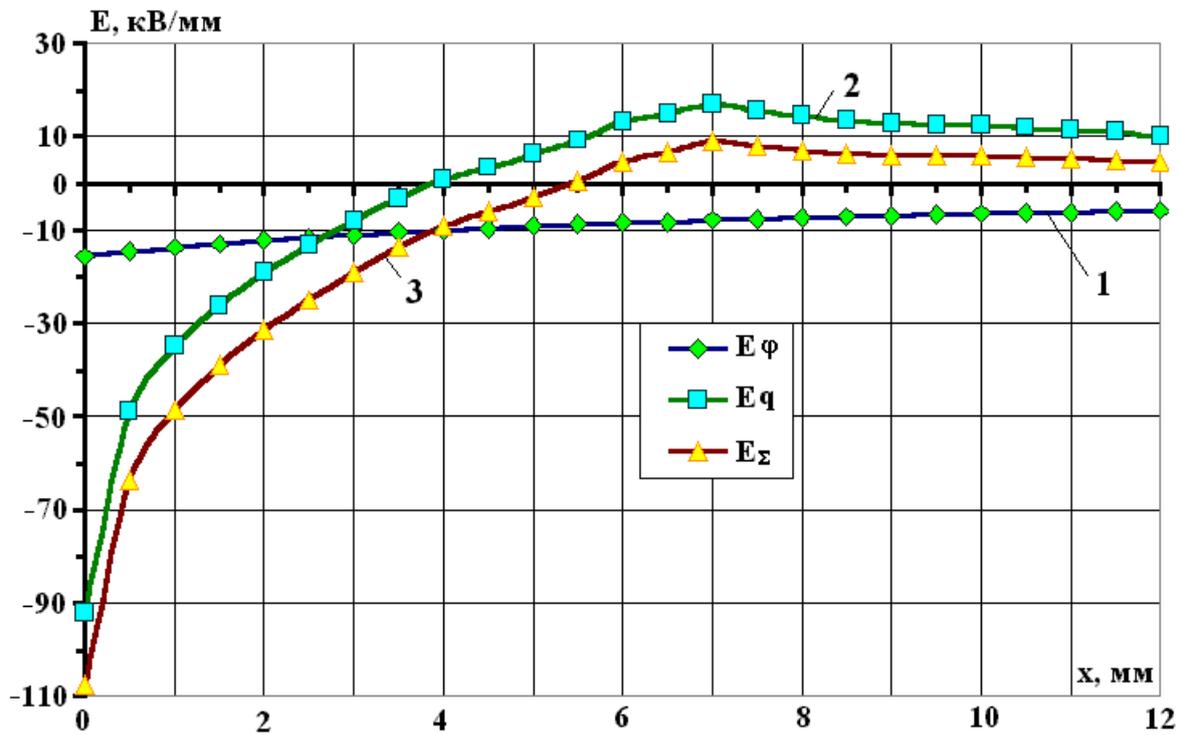


Рис. 3. Распределение напряженностей внешнего электрического поля  $E_\phi$  (1) поля объемного заряда  $E_q$  (2) и суммарной напряженности  $E_\Sigma$  (3) по длине ступени ЭГД-детандера.

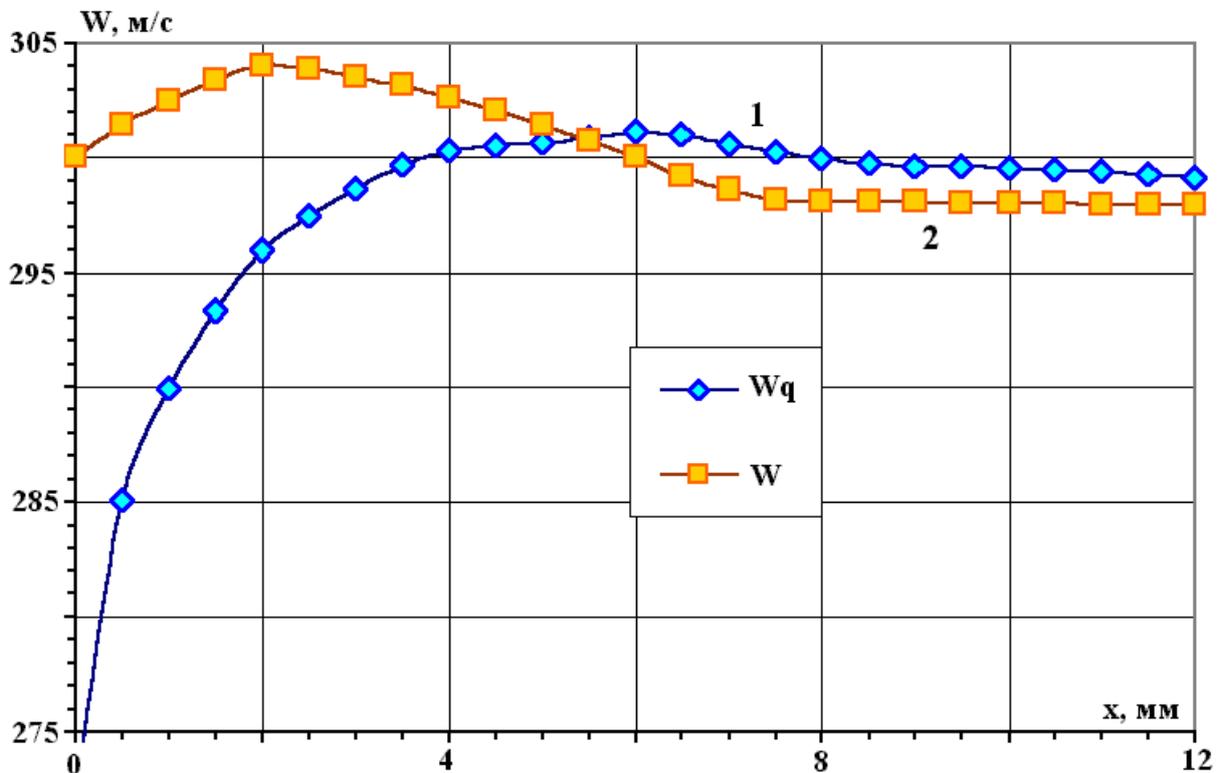


Рис. 4. Изменение скорости заряженных частиц  $W_q$  (1) и потока  $W$  (2) по длине канала ступени ЭГД-детандера.

Для исключения этого явления и повышения эффективности работы необходимо найти оптимальный режим работы ЭГД-Г-Д. Это можно сделать или повышением напряжения на коллекторе  $U_{фк}$ , или увеличением скорости потока  $W$  или уменьшением конвективного тока  $J_0$  и снижением

напряженности  $E_q$  от объемного заряда. Напряжение на коллекторе, как правило, поддерживается стандартным, уменьшение величины конвективного тока приводит к снижению мощности ступени. Поэтому наиболее предпочтительным вариантом является нахождение оптимальной скорости потока и определение оптимального соотношения между потенциальной энергией рабочего тела  $N_n = \Delta p_i m / \rho$  и кинетической энергией потока  $N_k = m(W_{ni}^2 - W_{ki}^2) / 2$  ступени, где  $\Delta p_i$  – перепад давления в ступени,  $m, \rho$  – расход и плотность рабочего тела.

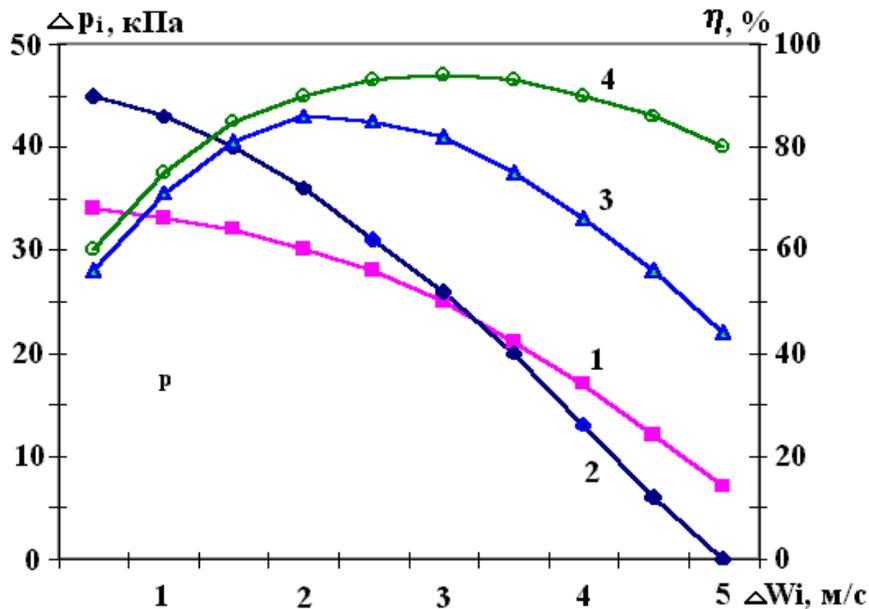


Рис. 5. Зависимости между срабатываемыми перепадом давления и изменением скорости  $\Delta W_i$  в  $\Delta p_i$  ступени при различных скоростях потока. 1 –  $\Delta P(W=300)$ ; 2 –  $\Delta P(W=250)$ ; 3 –  $\eta(W=250)$ ; 4 –  $\eta(W=300)$ .

### Выводы

1. Разработана математическая модель для новой конструкции ЭГД-Г-Д большой производительности, необходимой для промышленных установок, позволяющая производить расчеты проточной части ступеней при оптимальных характеристиках и параметрах рабочей среды.

2. Проведен анализ процессов в ступенях, который позволил выявить оптимальный режим работы ЭГД-Г-Д, имеющий место при равенстве срабатываемых потенциальной и кинетической энергий в каждой ступени.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Рубашов И.Б., Бортников Ю.С. Электрогазодинамика. М., 1971.

Поступила 15.02.2000

### Summary

Mathematical model for new design of EHD-generator-reducing valve of high efficiency, necessary for plant installations allowing to calculate a flowing part of stage at optimum characteristics and parameters of working medium is elaborated. The analysis of processes in stages aiming at optimum mode of work of EHD-generator-reducing valve revealing is conducted. Optimum mode has place when there is a equality of kinetic and potential used energies in each stage.