

Расчет процессов в ступени ЭГД генератора-детандера на природном газе. Физическая и математическая модели*

Д-р тех. наук Г.И. БУМАГИН, Д.В. БОРОДИН, А.Г. ЛАПКОВА
Омский государственный технический университет,
канд. техн. наук А.Е. РАХАНСКИЙ
ООО НТК «Криогенная техника»

The paper offers mathematical and physical models of calculating processes in a stage of natural gas electro-gas-dynamic generator-expander. Mathematical and physical models for new design of EGD generator-expander with high efficiency allowing to calculate a flowing part of a stage at optimum characteristics and parameters are elaborated. The analysis of processes in a stage of EHD generator-expander are conducted.

В последние годы в России активно обсуждается проблема производства сжиженного природного газа (СПГ) и его использования (в качестве моторного топлива) на транспорте, на предприятиях топливно-энергетического комплекса (ТЭК), в коммунальном газоснабжении населенных пунктов и в других целях [1,2]. Одним из эффективных способов производства СПГ является применение в ожижительных установках адиабатного расширения газа в турбодетандерах.

Нами предлагается модель электрогазодинамического генератора-детандера (ЭГД Г-Д) для использования в ожижителях природного газа в качестве устройства для адиабатного расширения газа.

В отличие от традиционных расширительных машин — турбогенератора и турбодетандера — в ЭГД Г-Д нет движущихся механических частей. В нем внутренняя энергия сжатого газа преобразуется непосредственно в электрическую энергию без механических посредников. Одновременно с получением электрической энергии возможно и производство холода, который необходим для сжижения природного газа.

ЭГД Г-Д особенно эффективно работает при относительно высоком давлении (плотности) газа, которое имеется на газораспределительных станциях (ГРС), где давление природного газа понижают дросселированием от 5,5...7 МПа до

0,3...1,2 МПа. Для проведения адиабатного расширения сжатого природного газа на ГРС и требуется ЭГД генератор-детандер.

На рис. 1 приведена принципиальная схема ЭГД Г-Д с новой системой электродов.

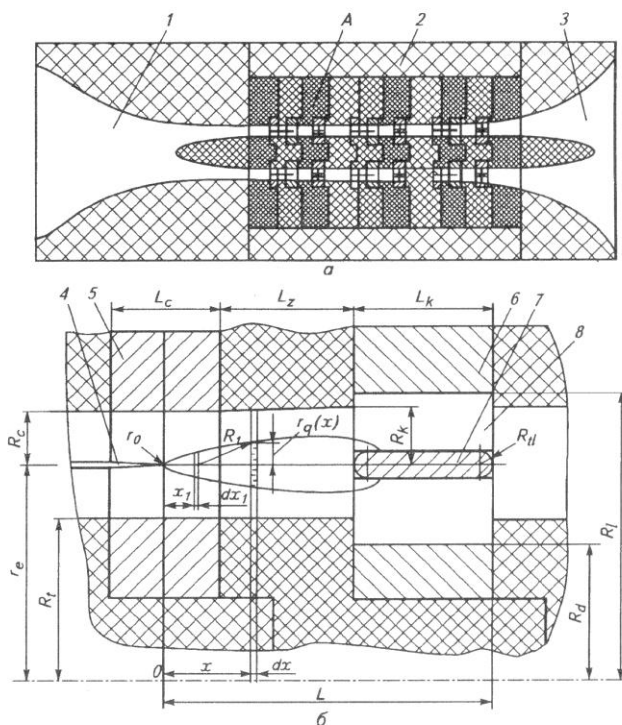


Рис. 1. схема ЭГД Г-Д (а) и расчетная схема его ступени (б):
1 — сопловой аппарат; 2 — рабочая часть; 3 — диффузор;
4 — эмиттерное кольцо; 5 — вытягивающий электрод;
6 — коллектор; 7 — обтекаемое кольцо; 8 — распорка

*Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований.

Проточная часть ЭГД Г-Д состоит из трех основных частей: сопла 1, установленного во входной части генератора, где срабатывает определенная разность энтальпий и давлений, достаточная для развития околосвуковой скорости потока; рабочей части 2, состоящей из последовательно установленных идентичных рабочих ступеней, в которых срабатывает как развитая в сопле кинетическая энергия потока, так и оставшаяся внутренняя (потенциальная) энергия газа в форме разности энтальпий и давлений; диффузора 3, установленного на выходе проточной части ступеней для дальнейшего понижения скорости потока до скорости в выходном трубопроводе.

В ранее опубликованных работах [3,4] принципиальная схема ЭГД Г-Д, как правило, строилась на следующей системе электродов: эмиттер (игла); вытягивающий электрод и коллектор (коаксиальные кольца). В результате теоретических и экспериментальных исследований, которые проводились на этой модели, был выявлен главный ее недостаток — малые значения возникающего конвективного тока возле эмиттера и, как следствие, малые мощности, получаемые в одной ступени (до 50 Вт). Для увеличения мощностей в ЭГД Г-Д с такой системой предлагалось создавать многоступенчатые модели с параллельно-последовательным включением ступеней, что могло привести к существенному усложнению конструкции и снижению эффективности работы.

Нами предлагается принципиально новая система электродов в ступенях ЭГД Г-Д: эмиттер 4 (тонкостенные коаксиальные кольца, заостренные с одной стороны); вытягивающий электрод 5 и коллектор 6 (коаксиальные цилиндры). Для улучшения процесса рекомбинации в коллектор по оси канала вставлено обтекаемое кольцо 7 на распорках 8.

Такая схема электродов позволяет разрабатывать ЭГД Г-Д практически на любые мощности (до нескольких МВт, а в одной ступени — до нескольких кВт) в зависимости от диаметров деталей 4, 5, 6 (см. рис.1).

Для расчета отдельных ступеней и ЭГД Г-Д в целом нами были разработаны физическая и математическая модели процессов в ступенях генератора-детандера.

Основными задачами исследования являются:

определение оптимального соотношения между кинетической и потенциальной энергиями, срабатываемыми в сопле 1 и рабочей части 2 (в виде разности энтальпий или давлений и изменения скорости потока); определение оптимального режима работы; оценка эффективности работы ЭГД генератора-детандера.

При построении математической модели исходили из условия, что в рабочей части ступеней ЭГД Г-Д есть два внешних электрических поля и поле от объемного заряда, заполняющее все пространство между эмиттерным 4 и коллекторным 6 электродами (см. рис. 1).

Первое внешнее поле — между поверхностью острой кромки эмиттерного кольца 4 и внешней поверхностью вытягивающего электрода 5 — создается приложенным к ним напряжением $U_{\phi 0}$ от высоковольтного источника питания (ИВН). Это поле имеет высокую напряженность возле острой кромки эмиттерного кольца 4, в результате чего возникает коронный разряд, который формирует объемный заряд и конвективный ток J_0 в зоне ионизации.

Второе внешнее поле — между коллекторным 6 и вытягивающим 5 электродами — образуется в результате процесса рекомбинации объемного заряда на поверхности коллектора и возникновения на нем высокого напряжения $U_{\phi k}$ из-за большого сопротивления R_n внешней электрической сети. Это поле направлено против движения униполярно заряженного потока, который, перенося заряды против сил электрического поля (за счет вязкостного взаимодействия нейтральных молекул с зарядами-ионами), расширяется с совершением работы и понижением энтальпии, давления и температуры. Силы электрического поля, действующие на заряды в рабочей зоне ЭГД преобразования, определяются в первую очередь величиной напряжения $U_{\phi k}$ (чем оно выше, тем они больше); конструкцией коллекторного и вытягивающего электродов и расстоянием между ними, а также силами вязкостного взаимодействия нейтральных молекул с зарядами, которые характеризуются вязкостью рабочей среды и подвижностью зарядов b (чем меньше подвижность зарядов, тем больше силы взаимодействия зарядов с нейтральной рабочей средой).

Третье электрическое поле, которое накладывается на два внешних, — это поле от объемного заря-

да, который при постоянном напряжении питания заполняет весь рабочий объем ступени — от эмиттера 4 до коллектора 6. Это поле влияет на процесс ЭГД преобразования в рабочей зоне как положительно, так и отрицательно. В начале зоны ЭГД преобразования оно усиливает внешнее поле, а во второй половине рабочей зоны, наоборот, ослабляет его, особенно возле коллектора 6. В результате внешнее поле возле коллектора может настолько уменьшиться, что там вместо генераторного режима возникает насосный.

Математическая модель процессов в ступени ЭГД Г-Д разработана для нейтрального потока в квазиодномерном приближении при стационарном протекании процессов. Передачей тепла от стенок канала к потоку и наоборот, а также переносом тепла в осевом направлении пренебрегаем. Математическая модель заряженного потока и электрических полей составлена с учетом радиальных составляющих конвективного тока и напряженности как внешнего поля, так и поля от объемного заряда. При этом принято считать, что процессы зарядообразования потока и образования объемного заряда происходят только во внутренней зоне коронного разряда (в чехле короны), отделенной от зоны ЭГД преобразования условной границей. В зоне ЭГД преобразования электрохимические процессы отсутствуют, а преобладают процессы вязкостного взаимодействия зарядов с нейтральными молекулами потока. Внутренняя область коронного разряда на два-три порядка меньше внешней зоны ЭГД преобразования. Представим поверхность внутренней зоны I как тор с радиусом r_c (см. рис.1) и внутренним радиусом $r_0 \approx 10^{-5}$ м. Будем считать, что на внешней границе зоны ионизации — поверхности тора Γ_0 модуль напряженности $|E|$ равен начальной напряженности зажигания короны E^* и остается постоянной величиной в течение всего процесса горения короны [5], в то время как на самой зарядообразующей поверхности эмиттерного кольца суммарная напряженность поля равна:

$$(E_{\varphi_0} + E_{q_0}) - E^* = E_0, \quad (1)$$

где E_{φ_0} — напряженность внешнего поля;

E_{q_0} — напряженность поля объемного заряда.

Математическая модель процессов в ступенях ЭГД Г-Д, построенная на основе вышеизложенной физи-

ческой модели и принятых допущений, состоит из:

✓ дифференциальных уравнений движения (2), профиля канала (3), энергии (4), границы области существования объемного заряда r_q в зоне ЭГД преобразования (5), плотности конвективного тока j_x в зоне рекомбинации (6):

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

где p — давление;

J_x — конвективный ток;

E_x — суммарная осевая составляющая напряженности поля;

W_q — скорость заряженных частиц;

F — площадь поперечного сечения канала;

ρ — плотность метана;

ξ — коэффициент гидравлического сопротивления;

W — скорость нейтрального потока рабочего тела;

R — размер канала ступени.

$$\frac{dW}{dx} = \frac{W}{W^2 - a^2} \left[\frac{J_{qx} E_x}{m\chi} + \frac{a^2}{F} \frac{dF}{dx} + \xi \frac{W^2}{4R} \right], \quad (3)$$

где $a = \sqrt{zkR_g T}$ — скорость звука, м/с;

z — коэффициент сжимаемости;

R_g — газовая постоянная;

T — температура рабочего тела;

J_{qx} — конвективный ток в зоне ЭГД-преобразования;

m — расход рабочего тела;

χ — массовая доля пара в парожидкостной смеси.

$$\frac{dT}{dx} = \frac{J_x E_x}{c_p m} - \frac{W}{c_p} \frac{dW}{dx}, \quad (4)$$

где c_p — удельная теплоемкость.

$$\frac{dr_q}{dx} = \frac{bE_r}{W_q}, \quad 0 \leq x \leq l_q, \quad (5)$$

где b — подвижность зарядов;

E_r — суммарная радиальная составляющая напряженности;

l_q — расстояние от эмиттера до границы касания объемным зарядом стенок канала.

$$\frac{dj_x}{dx} = -j_x \frac{bE_r}{W_q r_q}, \quad l_q \leq x \leq L; \quad (6)$$

✓ уравнений скорости заряженных частиц (7), суммарных осевой (8) и радиальной (9) составляющих напряженности электрического поля:

$$W_q(x) = W(x) + bE_x(x); \quad (7)$$

$$E_x(x) = E_x^q(x) + E_x^r(x); \quad (8)$$

$$E_r(x) = E_r^q(x) + E_r^r(x), \quad (9)$$

которые определяются соответственно осевой (10) и радиальной (11) составляющими напряженности внешнего электрического поля, а также осевой (12) и радиальной (13) составляющими напряженности поля от объемного заряда:

$$E_x^q = \frac{c_f U_{\varphi_k}}{(1 + c_f x) \ln(1 + c_f L)}; \quad (10)$$

$$E_r^q = \frac{c_r U_{\varphi_0}}{R_c \left[\left(\frac{2c_r x}{L_c} \right)^2 + 1 \right] \operatorname{arctg}(c_r)}, \quad (11)$$

где c_f и c_r — геометрические коэффициенты:

$$c_f = \frac{[R_l(\pi + n) + R_d(\pi - n) - (R_{ll} - b_s)2n]L_k}{2\pi r_e L_c L} + \frac{2\pi r_e [L_k - L_c + (\pi - 2)R_{ll}]}{2\pi r_e L_c L};$$

$$c_r = \sqrt{\frac{L_c}{\pi r_0} - 1};$$

$R_c, R_l, R_d, R_{ll}, r_e, L_c, L_k, L$ — геометрические размеры ступени (см. рис. 1);

$$E_x^q = \frac{\int_0^x \frac{(4\alpha_b + \alpha_a)}{5W_q(x_1)} J_x(x_1) dx_1 - \int_x^L \frac{(4\alpha_b + \alpha_a)}{5W_q(x_1)} J_x(x_1) dx_1}{8\pi r_e \varepsilon \varepsilon_0 \pi r_q(x)}, \quad (12)$$

где x_1 — геометрический размер (см. рис. 1);

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

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

$$E_r^q = \frac{r_q(x)}{4\pi r_e \pi \varepsilon \varepsilon_0} \int_0^L \frac{J_x(x_1) dx_1}{W_q(x_1) [(x - x_1)^2 + r_q^2(x)]}, \quad (13)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость рабочего тела;

ε_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

✓ уравнения конвективного тока в зоне ионизации (14) и в зоне ЭГД преобразования (15):

$$J_0 = \frac{4\pi r_e \pi \varepsilon \varepsilon_0}{\cos \alpha_0} [E_r(0) - E^*] [W(0) + bE_x(0)], \quad (14)$$

где α_0 — угол между вектором конвективного тока J_0 и осевой составляющей тока J_x .

$$\alpha_0 = \operatorname{arctg} \left[\frac{bE_r(0)}{W(0) - bE_x(0)} \right];$$

$$J_q(x, t) = \begin{cases} J_0 \cos \alpha_0, & 0 \leq x \leq l_q; \\ j_x 4\pi r_e r_q(x), & l_q \leq x \leq L, \end{cases} \quad (15)$$

где E^* — напряженность зажигания короны, равная:

$$E^* = \frac{c_r U^*}{R_c \operatorname{arctg}(c_r)};$$

U^* — напряжение зажигания короны;

✓ уравнения подвижности зарядов, полученного авторами в эксперименте:

$$b = b_0 \left(\frac{\eta_0}{\eta} \right)^{1,5} \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^{1,2}, \quad (16)$$

где b_0, η_0, ρ_0 — подвижность зарядов, динамическая вязкость и плотность метана при нормальных условиях;

η, ρ — динамическая вязкость и плотность метана при рабочих условиях;

✓ уравнения состояния рабочего тела:

$$p(x) = z p(x) R_g T(x); \quad (17)$$

✓ уравнения расхода рабочего тела:

$$m = \rho(x) W(x) F(x) = \text{const}, \quad (18)$$

где

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

где $F_i = 4\pi r_e R_{ll} + n b_s (R_l - R_d - 2R_{ll})$;

✓ уравнения размера канала ступени:

$$R(x) = \begin{cases} R_c, & 0 \leq x \leq L_c/2; \\ R_c + x\beta, & L_c/2 \leq x \leq L - L_k; \\ \frac{F(x)}{4\pi r_e}, & L - L_k \leq x \leq L, \end{cases} \quad (20)$$

где $\beta = (R_k - R_c)/L_0$.

✓ уравнения КПД ступени:

$$\eta_s = \frac{J_k U_k - J_0 U_{\varphi_0}}{m[(h_n - h_{k_s}) + (W_n^2 - W_k^2)/2]}, \quad (21)$$

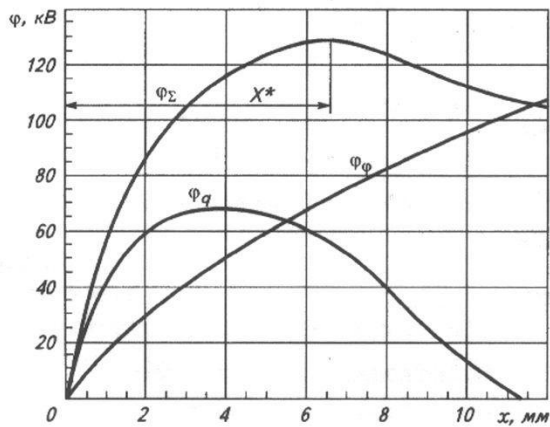


Рис. 2. Изменение электрических потенциалов по длине ступени x :

φ_ϕ — потенциал внешнего электрического поля;
 φ_q — потенциал поля объемного заряда;
 φ_Σ — суммарный электрический потенциал

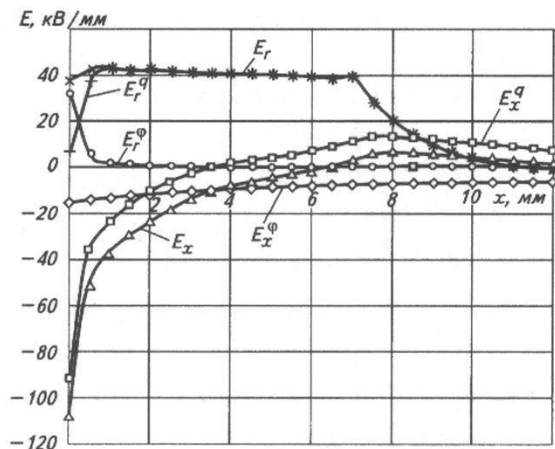


Рис. 3. Распределение осевой составляющей напряженностей внешнего электрического поля E_x^ϕ (1), поля объемного заряда E_x^q (2) и суммарной напряженности E_x^Σ (3), а также радиальной составляющей внешнего поля E_r^ϕ (4), поля заряда E_r^q (5) и суммарной напряженности E_r^Σ (6) по длине ступени

где h — энтальпия;

J_k — осевая составляющая конвективного тока,

$J_k = J_x(l_q)$;

$U_k = 110$ кВ — напряжение на коллекторе;

индексы «н» и «к» — соответственно входные и выходные параметры ступени.

В качестве граничных условий приняты:

$$p(0) = p_0; T(0) = T_0; W_x(0) = W_0; r_q(0) = r_0,$$

где p_0, T_0, W_0 — параметры среды после расширения в сопловом аппарате;

$$j_x(l_q) = J_x(l_q)/[4\pi r_e r_q(l_q)]. \quad (22)$$

Полученная математическая модель (2) — (22) решалась с использованием разностной схемы Рунге — Кутты четвертой степени.

При расчете за исходные параметры рабочего тела в первой ступени принимались термодинамические параметры после адиабатного расширения

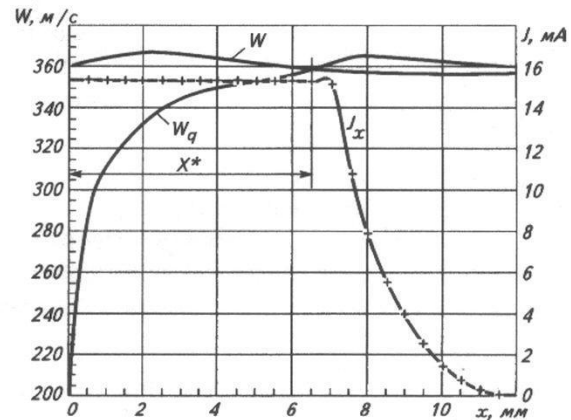


Рис. 4. Изменение скоростей нейтрального потока W и зарядов W_q , а также конвективного тока J_x по длине канала ступени

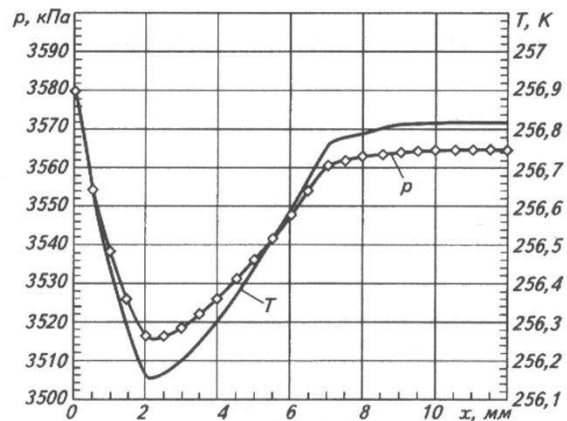


Рис. 5. Изменение давления p и температуры T по длине ступени

в сопловом аппарате: p_0 , T_0 , h_0 , W_0 , а при расчете последующей ступени — выходные параметры предыдущей ступени p_k , T_k , h_k , W_k .

Такая математическая модель позволяет проследить за изменениями:

- возникающего конвективного тока J_0 в зависимости от конструктивных размеров системы эмиттер — вытягивающий электрод;

- параметров потока и возникающих электрических полей;

- параметров потока, тока и электрических полей по длине ступени;

а также позволяет определить выходные параметры потока и дать оценку эффективности работы ступеней при изменении исходных параметров.

Основные результаты расчета показаны на рис. 2, 3, 4 и 5.

На рис. 2 показано изменение электрических потенциалов по длине канала ступени, включая зоны ионизации, ЭГД преобразования и рекомбинации.

Суммарный потенциал имеет максимум при длине $x^* = 6,5$ мм. Вследствие этого осевая составляющая напряженности суммарного поля E_x , равная сумме всех составляющих напряженностей внешнего поля E^p_x и поля объемного заряда E^q_x (см. рис. 3), меняет свой знак и направление на той же длине x^* , а скорость перемещения зарядов W_q (см. рис. 4) становится выше скорости нейтрального потока W . Это означает, что в той части ступени, где $x > x^*$, генераторный режим переходит в насосный, который, в свою очередь, приводит не к расширению, а к сжатию потока и, как следствие, к повышению его давления и температуры (см. рис. 5) и к снижению эффективности процесса преобразования энергии.

На рис. 4 показано также изменение скорости конвективного тока J_x по длине канала. Он остается постоянным в зоне ионизации и ЭГД преобразования, а в зоне рекомбинации при $x > 7$ мм резко уменьшается (до нуля на выходе ступени).

Для исключения насосного режима и повышения эффективности работы ступеней необходимо найти оптимальный режим работы ЭГД Г-Д. Это можно сделать, повышая напряжение на коллекторе или увеличивая скорость потока, а также уменьшая конвективный ток и снижая напряженность поля объемного заряда. Однако напряжение на коллекторе, как правило, поддерживается стан-

дартным, а уменьшение конвективного тока приводит к снижению мощности ступени. Поэтому наиболее предпочтительными способами являются увеличение напряжения на коллекторе и ускорение потока на выходе сопла и в ступенях, а также определение оптимального соотношения между изменением потенциальной $N_n = m\Delta p_i/\rho$ и кинетической энергий потока $N_k = m(W_{n_i}^2 - W_{k_i}^2)/2$ в ступени. Здесь Δp_i — перепад давления в i -й ступени, $(W_{n_i} - W_{k_i})$ — изменение скорости в i -й ступени.

Расчет работы ЭГД Г-Д показал, что наиболее эффективная работа ступеней наблюдается тогда, когда изменение потенциальной энергии в ступени равно изменению кинетической энергии потока. Для этого в каждой следующей ступени многоступенчатого ЭГД генератора-детандера скорость потока должна понижаться на 2...3 м/с. Чем выше скорость потока, тем выше понижение скорости в ступени.

При оптимальном режиме работы всех ступеней адиабатный КПД ЭГД Г-Д может достигать значений выше 80 %.

Таким образом:

- ✓ Разработана математическая модель для новой конструкции ЭГД Г-Д с большой производительностью, необходимой для промышленных установок и ГРС, позволяющая проводить расчеты прочной части ступеней.

- ✓ Проведенный расчет процессов в ступени выявил негативное влияние насосного режима и необходимость дальнейшего повышения эффективности работы ступеней.

Список литературы

1. Бумагин Г.И., Иванов В.А. Анализ процессов в ступени ЭГД генератора-детандера большой производительности // Электронная обработка материалов. — Молдова: Институт прикладной физики. 2000. № 3.
2. Грезин А.К., Громов А.В., Мельникова Н.С. и др. Использование сжиженного природного газа в качестве энергоносителя — задача государственной важности // Холодильная техника. 1999. № 9.
3. Рубашов И.Б., Бортников Ю.С. Электрогазодинамика. — М.: Атомиздат, 1971.
4. Федоров М.Д., Грачев А.Б., Бродянский В.М. Результаты экспериментального исследования электрогазодинамических процессов при низких температурах. — М.: ЦИНТИхимнефтемаш. 1984. Серия ХМ-6. № 3.
5. Чириков К.Ю., Мельник П.В. Использование СПГ в народном хозяйстве // Обзорн.инф.Сер. ХМ-6. — М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1991.