

Академик НАН Украины,
д-р техн. наук, проф. А.Ф. Булат,
канд. техн. наук И.Ф. Чемерис,
н.с. В.Я. Осенний (ИГТМ НАН Украины)

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКА ПАРА ДЛЯ ГЕНЕРАТОРОВ ВОДЯНОЙ ПЛАЗМЫ

Показана перспективність створення екологічно чистих генераторів водяної плазми з малогабаритним джерелом перегрітої пари, які використовуються для термічного буріння свердловин. Приведено алгоритм вибору оптимальних конструктивних параметрів електричного джерела пари за критерієм мінімуму питомої металоємності. Розроблено методику розрахунку мінімальної тривалості пуску, оптимальної глибини занурення електродів у воду, припустимих витрати води й електричного струму джерела пари, що забезпечують його усталену роботу під час пуску.

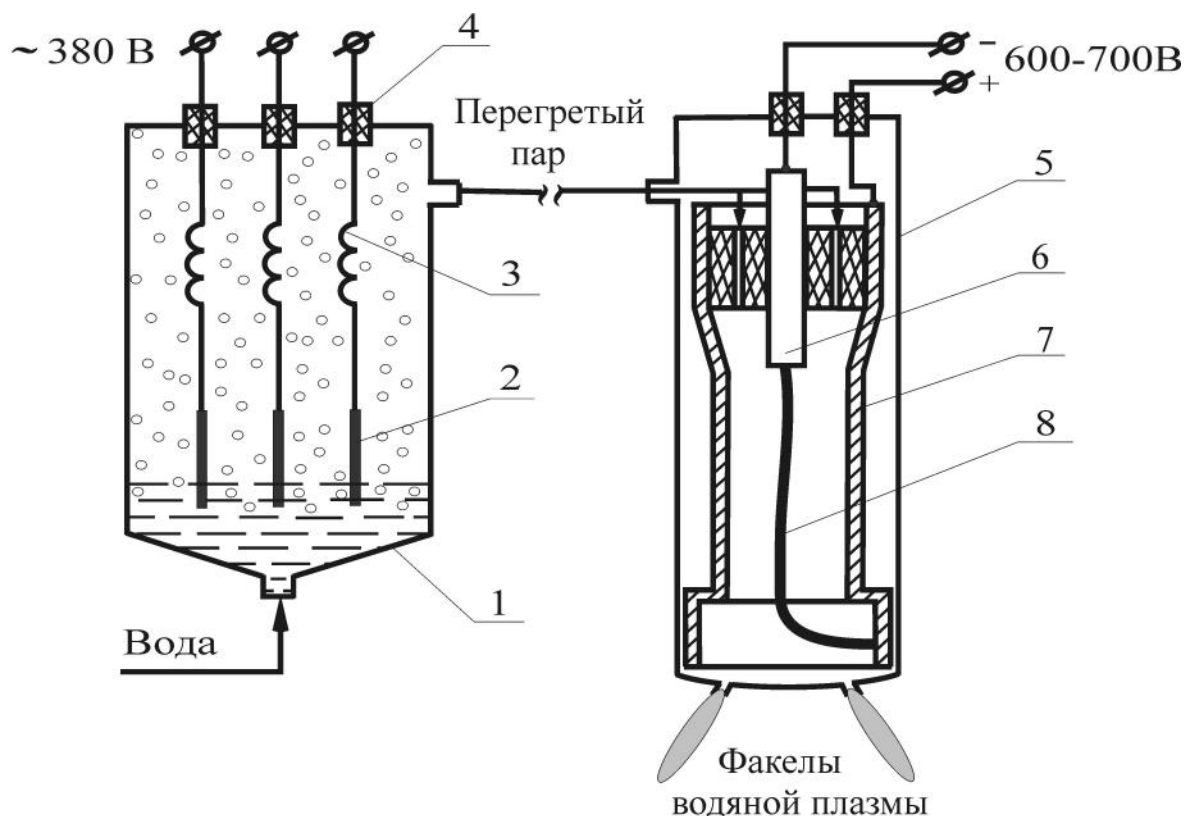
THE OPTIMIZATION OF THE STEAM SOURCE PARAMETERS FOR WATER PLASMA GENERATORS

Is shown the availability of creation of pollution-free water plasma generators with a space-saving source of the superheated steam, used for thermal boring of holes. There is the algorithm for the selection of optimal design value of electric steam source by a specific metal content minimum criterion. The design procedure of the minimal start-up period, optimal water immersion depth of electrodes, permissible water discharge and electric current of a steam source, providing its stable operation at launching, is elaborated.

На горных предприятиях Канады, России и Украины в технологических процессах расширения скважин при разработке полезных ископаемых в крепких скальных породах нашли свое применение огневые станки. Рабочим органом подобного класса горных машин нового поколения являются однокамерные электродуговые генераторы плазмы с воздушной стабилизацией дуги, хорошо зарекомендовавшее себя при испытании ряда экспериментальных установок плазменного расширения скважин в подземных условиях шахт Кривбасса [1, 2]. Для широкого внедрения высокоэнтальпийных процессов разрушения горных пород в различных технологиях горнорудного производства необходимо создание экологически чистых генераторов водяной плазмы с большим ресурсом работы [3]. На рис. 1 представлена технологическая схема термического бурения скважин в железистых кварцитах с использованием генераторов плазмы на водяном паре. В ИГТМ НАН Украины ведутся работы по созданию экологически чистых генераторов водяной плазмы с малогабаритным источником перегретого пара. На рис. 2 приведена конструктивная схема генератора плазмы с источником перегретого пара. Парогенератор состоит из корпуса 1, внутри которого размещены электроды 2 генератора пара, электрически и гидравлически последовательно соединенные со спиралями 3 перегревателя пара [4]. Корпус снабжен проходными изоляторами 4. Перегретый пар из парогенератора подается в генератор водяной плазмы 5 в качестве плазмообразующего газа и поступает в зазор между катодом 6 и анодом 7, в котором горит дуга 8. Обдувая дугу, пар перегревается до 2000 – 3000 °С и через сопловую насадку в виде плазменных струй поступает на стенки расширяемой скважины.



Рис. 1 – Технологическая схема термического расширения скважин



1 - корпус парогенератора; 2 - электроды; 3 - перегреватель пара; 4 - изоляторы;
 5 - корпус генератора водяной плазмы; 6 - катод; 7 - анод; 8 - плазменная дуга.
 Рис. 2 – Конструктивная схема генератора водяной плазмы с источником пара

Для эксплуатации в подземных условиях источники пара должны иметь минимальные размеры. Выбор основных параметров источников пара в настоящее время осуществляется в основном опытным путем, без четкой методической основы.

Рассмотрим возможность выбора оптимальных конструктивных параметров электрических источников пара по критерию минимума удельной материалоемкости [5]

$$K_M = \frac{M}{P}, \quad (1)$$

где K_M - удельная материалоемкость, кг/кВт; M – масса источника пара, кг; P – электрическая мощность источника пара, кВт.

Для наиболее распространенной схемы электрического источника пара, содержащей цилиндрический корпус с тремя секторными фазными электродами и внутренним антиэлектродом, выражение для мощности запишется в виде

$$P = \frac{2 \cdot U_\phi (2\pi \cdot r - 3\sqrt{3} \cdot \delta) \cdot H}{\rho \cdot \delta} \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

где U_ϕ - фазное напряжение, В; r – радиус электродной группы, м; H – высота электродной группы, м; δ - межэлектродный зазор, м; ρ - удельное электрическое сопротивление воды, Ом·м.

Выражая массу источника пара через сумму отдельных элементов, запишем (1) в виде

$$K_M = \frac{(2\pi \cdot r - 3\sqrt{3} \cdot \delta) \cdot H \cdot \Delta \cdot \gamma_{\bar{n}} + 2\pi \cdot (r - \delta) \cdot H \cdot \Delta \cdot \gamma_{\bar{n}}}{P} + \frac{2\pi(r + \delta) \cdot H \cdot \beta \cdot \Delta \cdot \gamma_{\bar{n}} + 2\pi(r + \delta)^2 \cdot \Delta_1 \cdot \gamma_c}{P} \quad (3)$$

где Δ - толщина корпуса, электродов и антиэлектродов, м; Δ_1 – толщина крышки и днища, м; $\beta = 1,6$ – коэффициент, учитывающий размеры водосборной и паросборной камер; $\gamma_{\bar{n}}$ - объемная плотность стали, кг/м³.

Дифференцируя (3) по r с учетом (2) и приравнивая производную нулю, получим выражение для оптимального радиуса электродной группы по критерию минимума K_M

$$r_{opt} = \frac{3\sqrt{3} \cdot \delta}{2\pi} + \sqrt{\frac{27 \cdot \delta^2}{4\pi^2} + C}, \quad (4)$$

где

$$C = 6\sqrt{3} \cdot \delta^2 \cdot \Delta_1 + H_{opt} \cdot \delta \cdot [3\sqrt{3} \cdot \Delta \cdot (1 + \beta) + 2\pi(\Delta \cdot \beta + \delta \cdot \Delta_1 - \Delta)].$$

При заданной мощности источника пара P , подставляя (4) в (2), находим H_{opt} , а затем по (4) r_{opt} , т.е. основные размеры источника пара, обеспечивающие минимум удельной материалоемкости.

В качестве примера определим оптимальные размеры источника пара со следующими исходными данными: $P = 25$ кВт, $U_{\phi} = 220$ В, $\rho = 15$ Ом·м, $\delta = 0,02$ м (определяется по напряжению между электродами), $\Delta = \Delta_1 = 0,004$ м (определяется по давлению в полости источника пара).

Расчетом получаем $r_{opt} = 0,07$ м; $H_{opt} = 0,231$ м; $K_{M\ opt} = 0,511$ кг/кВт. Если задать произвольное значение $r = 0,04$ м, то в соответствии с (2) и (3) имеем $H = 0,526$ м и $K_M = 0,61$ кг/кВт, а при $r = 0,2$ м получим $H = 0,067$ м и $K_M = 0,76$ кг/кВт. Полученные результаты свидетельствуют о наличии явно выраженного минимума K_M , тем самым подтверждая правильность предложенной методики выбора основных конструктивных размеров электрических источников пара.

Для того, чтобы использовать электрические источники пара совместно с электродуговыми генераторами водяной плазмы необходимо проанализировать устойчивость их работы в различных режимах, особенно при пуске из холодного состояния. Устойчивость работы источника пара будет создана при следующем условии: необходимо обеспечить такие значения его режимных параметров как длительность пуска τ_n и допустимое значение расхода воды при пуске q_{don} , при которых вода в межэлектродном промежутке вскипает при допустимой глубине погружения электродов в воду [6]. Превышение допустимой глубины погружения приводит к переполнению источника пара водой, значительному росту тока и, как следствие, к аварийному режиму работы.

Рассмотрим схему источника пара, состоящую из цилиндрического корпуса с тремя парными секторными электродами и кольцевыми антиэлектродами. Для перегрева пара последовательно с электродами пофазно включены пароперегревательные элементы.

Количество теплоты, необходимое для нагрева воды до кипения и прогрева корпуса источника пара, равно

$$Q_n = m_e \cdot a_1 + a_2, \quad (5)$$

где

$$a_1 = C_e(t_2 - t_1) + r_y; \quad a_2 = (C_e \cdot m_0 + C_c \cdot m_n) \cdot (t_2 - t_1),$$

$$m_e = H_{\text{доп}} \cdot \gamma_e \cdot F_k,$$

m_e – масса воды в зазорах между электродами, кг; $H_{\text{доп}}$ – допустимая глубина погружения электродов в воду, м; γ_e – плотность воды, кг/м³; F_k – площадь поперечного сечения столба воды в зазорах между электродами, м²; C_e и C_c – соответственно удельные теплоемкости воды и стали, Дж/кг·°С; t_1 и t_2 – соответственно температура воды на входе и температура кипения воды, °С; r_y – удельная теплота парообразования, Дж/кг; m_0 и m_n – соответственно масса воды в водосборной камере и масса парогенератора, кг.

Количество теплоты, выделяемое при прохождении через воду электрического тока I за время τ

$$Q_a = 3 \int_0^{\tau_e} \frac{U_{\phi}^2}{R_1 + R_2(\tau)} d\tau, \quad (6)$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение, В; R_1 – сопротивление спирали пароперегревателя, Ом; $R_2(\tau)$ – сопротивление слоя воды в межэлектродном зазоре, Ом.

Учитывая, что текущее значение глубины погружения электродов в воду

$$i = \frac{q \cdot \tau}{\gamma_e \cdot F_e}, \quad (7)$$

получаем выражение для $R_2(\tau)$

$$R_2(\tau) = \frac{a_3}{q \cdot \tau}, \quad (8)$$

где

$$a_3 = a_4 \cdot a_5, \quad a_4 = \frac{\rho_{20}}{0,565 + 0,0185 \cdot t_{cp}^{1,09}}, \quad a_5 = \frac{3\delta \cdot \gamma_e \cdot F_k}{4[2\pi \cdot (r - 2\delta) - 3\sqrt{3} \cdot \delta]},$$

q – текущее значение расхода воды, кг/с; ρ_{20} – удельное электрическое сопротивление питающей воды при $t = 20$ °С, Ом·м; t_{cp} – среднее значение температуры воды в источнике пара, °С; δ – зазор между электродами и анти-электродами, м; r – радиус корпуса источника пара, м.

Исходя из условия $Q_e = Q_n$ и подставляя (8) в (6), после интегрирования получаем выражение для длительности пуска источника пара

$$\tau_{\kappa} = \frac{(m_{\epsilon} \cdot a_1 + a_2) \cdot m_{\epsilon} \cdot R_1^2}{3 \cdot U_{\phi} \left[R_1 \cdot m_{\epsilon} - a_3 \cdot \ln \left(\frac{R_1 \cdot m_{\epsilon}}{a_3} + 1 \right) \right]}. \quad (9)$$

Разложив логарифмическую функцию в ряд Тейлора, после преобразований получим

$$\tau_{\kappa} = \frac{(m_{\epsilon} \cdot a_1 + a_2) \cdot a_3^2}{U_{\phi}^2 \cdot (1,5 \cdot a_3 \cdot m_{\epsilon} - R_1 \cdot m_{\epsilon}^2)}. \quad (10)$$

Дифференцируя (10) по m_{ϵ} и приравнявая полученное выражение нулю, получаем зависимость для оптимального значения $m_{\epsilon \text{ opt}}$, при котором длительность пуска будет минимальна

$$m_{\epsilon \text{ opt}} = -\frac{a_2}{a_1} + \sqrt{\left(\frac{a_2}{a_1}\right)^2 + \frac{1,5a_2 \cdot a_3}{a_1 \cdot R_1}}. \quad (11)$$

Допустимая глубина погружения электродов H определится подстановкой (11) в выражение для текущего значения m_{ϵ} из (5), а допустимое значение расхода воды при пуске находится как

$$q_{\text{дв}} = \frac{m_{\epsilon \text{ opt}}}{\tau_{\epsilon}}. \quad (12)$$

Фазный ток парогенератора в момент времени τ_{κ}

$$I_{\epsilon} = \frac{U_{\delta} \cdot q_{\text{дв}} \cdot \tau_{\epsilon}}{R_1 \cdot q_{\text{дв}} \cdot \tau_{\epsilon} + a_3}. \quad (13)$$

Используя зависимости (10) – (13), определим режимные параметры источника пара, для которого $a_1 = 2444 \cdot 10^3$ Дж; $a_2 = 2726 \cdot 10^3$ Дж; $a_3 = 2,52$; $R_1 = 1,2$ Ом. Соответственно находим $m_{\epsilon \text{ opt}} = 1,065$ кг; $\tau_{\kappa \text{ min}} = 262$ с; $q_{\text{дон}} = 3,9 \cdot 10^{-3}$ кг/с; $I_{\kappa} = 61$ А. При заданных конструктивных параметрах режимные параметры могут изменяться варьированием коэффициента a_3 , прямо пропорционального удельному электрическому сопротивлению воды ρ_{20} , и сопротивления пароперегревателя R_1 . Анализ показывает, что при уменьшении R_1 вдвое до значения 0,6 Ом $\tau_{\epsilon \text{ min}} = 192$ с при $m_{\epsilon \text{ opt}} = 1,76$ кг и токе $I_{\kappa} = 108$ А, т.е. уменьшение R_1 обеспечивает

уменьшение времени пуска, однако увеличивает глубину погружения электродов в воду и величину тока, что неблагоприятно. В то же время уменьшение вдвое удельного электрического сопротивления воды ρ_{20} ($a_3 = 1,26$) при практически том же уменьшении времени пуска ($\tau_{к\ min} = 195$ с) обеспечивает значения $m_{в\ opt} = 0,612$ кг и $I_k = 68$ А.

Оптимальные параметры источника пара для генератора водяной плазмы могут быть определены по предложенному критерию минимума K_M . Из представленных материалов также следует, что наиболее благоприятным фактором является обеспечение устойчивой работы источника пара при пуске путем изменения удельного электрического сопротивления воды. Это может быть осуществлено либо искусственной минерализацией воды, либо ее предварительным подогревом. Создание источника перегретого пара с оптимальными параметрами и минимальным временем выхода на режим позволяет стабилизировать положение дуги в канале и улучшить систему запуска генераторов водяной плазмы, повысить их энергетические показатели и создать экологически чистые плазменные технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kholiyavchenko L.T., Osenniy V.Y. Results of the plasma widening hole plants in the Krivbass mines// Proc. of 5th Conference on Thermal Plasma Processes. 13-16 July.1998. – St.Peterburg (Russia).
2. Alymov B., Osenniy V., Kholiyavchenko L., Ishchenko K., Chirva A., Kunets G. New reise drill and blast technology // Proc. of 6th Conference on Thermal Plasma Processes. 30 May – 2 June. 2000. – Strasbourg (France).
3. Булат А.Ф., Алымов Б.Д., Осенний В.Я. Исследование ресурса работы термомеханических катодов// Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. трудов. – Днепропетровск: Полиграфист. – 2001. - № 29. – С. 152 – 156
4. Чемерис И.Ф. А. с. №1262186. Электродный паровой котел. – Б.И. - №37. – 1986.
5. Чемерис И.Ф. К выбору оптимальных конструктивных параметров электрических парогенераторов. - Наукова думка, К., сб. «Совершенствование горных машин», 1987. - С. 128-129.
6. Чемерис И.Ф. Влияние режимных параметров на устойчивость работы электрических парогенераторов//Надежность горных машин. - Сб. научн. трудов ИГТМ НАНУ.- Киев: Наук. думка.-1989.-С.91 – 94.