УДК 621. 365. 5

О.Б.ШОНИН
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

ПРИМЕНЕНИЕ ВЧ-ЭНЕРГИИ В ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ ПЕСКОВ

Дано обоснование параметров технологической камеры и режима нагрева применительно к задаче подготовки золотосодержащих песков к обогащению. На базе электротеплофизической модели взаимодействия ВЧ-электромагнитного поля с несовершенным диэлектриком получена система уравнений, связывающая параметры генератора и технологической камеры, скорость подачи породы и ее эффективные параметры, учитывающие непрерывный фазовый переход, степень проявления которого зависит от содержания глинистых фракций.

The paper is devoted to the development of HF equipment for dielectric heating of coarse – grained-gold – bearing permafrost to facilitate its enrichment. On the basis of electro – thermal model of HF power – lossy dielectric layer interaction basic nonlinear equations have been derived to find optimum parameters of a reactor ensuring maximum productivity under conditions of continuous phase transitions, which are sensitive to the clay content.

Одним из эффектов электротермомеханического преобразования ВЧ-энергии в горных породах как неоднородных средах является избирательное выделение энергии в поглощающих включениях крупноскелетных мерзлых пород и нарушение адгезионных связей на границе этих включений с вмещающей средой. Высокая интенсивность объемного избирательного нагрева породы без заметного влияния на тепловой режим выработки позволяет использовать ВЧ-технологию для подготовки мерзлых золотосодержащих песков к обогащению при разработке непрерывной технологии добычи золота как на поверхности, так и непосредственно в шахте.

Дополнительным преимуществом использования ВЧ-энергии является высокий КПД процесса за счет конвективного отбора энергии тепловых потерь ВЧ-преобразователя и ее использование в рабочем цикле промывочного прибора.

По оценкам инновационной компании «Голд» реализация такой технологии позволит существенно снизить затраты на добычу металла и его потери [1, 2].

Для выбора энергетических и технологических параметров ВЧ-установки рассмотрим модель взаимодействия ВЧ-поля с горной массой, движущейся в технологической камере со скоростью v. Камера выполнена в виде прямоугольного волновода длиной L, в котором размещена потенциальная пластина шириной a с возможностью вертикального перемещения для изменения электрического поля E_d в рабочей области конденсатора d (рис.1). Поперечные размеры камеры задавались шириной ленты транспортера a, толщина слоя породной массы d – питателем. Высота d_0 выбиралась из условия пробоя воздушного промежутка:

$$E_\Delta < E_{\text{пр}}, \text{ где } E_{\text{пр}} = (4-8)10^5 \text{ В/м}.$$

Решение самосогласованной электротеплофизической задачи направлено на определение электрического поля $E_\Delta(x, t)$, $E_d(x, t)$, тепловых источников $q(x, t)$, температуры $T(x, t)$, а также эквивалентных параметров камеры – емкости $C(t)$ и проводимости $G(t)$ (рис.2).

Поле $E(x, t)$ определялось в квазистатическом приближении, которое проверялось

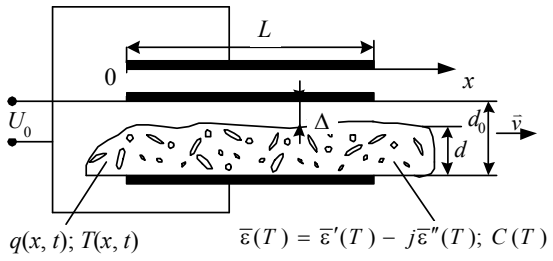


Рис.1. Схема ВЧ-камеры непрерывного нагрева мерзлых золотосодержащих песков (L – длина камеры; d_0 – высота рабочей области конденсатора; d – толщина насыпного слоя породы; Δ – воздушный промежуток)

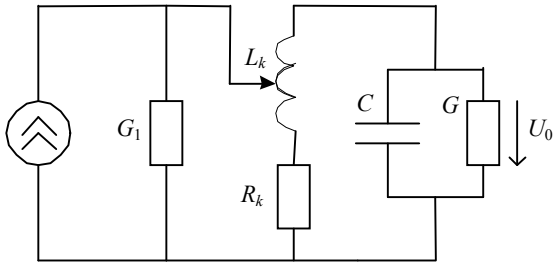


Рис.2. Схема замещения ВЧ-генератора и нагрузки

оценкой постоянной распространения по данным расчета параметров C_0, G_0, L_0. Слой породной массы считался однородным с эквивалентными свойствами, выраженными через параметры породы в массиве (рыхлые отложения, плотик) с учетом разрыхления.

Поскольку время нагрева песков в камере существенно меньше характерного времени влияния теплопроводности $t << t_F$, $t_F = d^2C/\lambda = 10^4$ с, где C – теплоемкость, λ – теплопроводность, температуру допустимо определять в квазиадиабатическом приближении.

В статике температура породы определяется из неявного уравнения

$$t = \int_{T_н}^{T(t)} \frac{C(T)dT}{q(T)};\ q(T) = 0{,}5\omega\varepsilon_0\varepsilon''(T)\left|E_d(T)\right|^2, \quad (1)$$

где C – эффективная объемная теплоемкость; учитывающая энергию фазового перехода; q – объемная плотность тепловых источников; $\varepsilon''(T) = \varepsilon'(T)\mathrm{tg}\delta(T)$ – фактор потерь; ε' – относительная диэлектрическая проницаемость; δ – угол потерь.

Тепловые источники $q(T)$ зависят от температуры вследствие изменения фактора потерь $\varepsilon''(T)$ и перераспределения поля между воздушными промежутком Δ и слоем породы d в результате изменения относительной проницаемости $\varepsilon'(T)$. При $\mathrm{tg}^2\delta << 1$ получим

$$E_d(T) = \frac{E_0}{\bar{d} + (1-\bar{d})\varepsilon'(T)};$$
$$E_\Delta(T) = \frac{E_0}{(1-\bar{d}) + \bar{d}/\varepsilon'(T)}, \quad (2)$$

где $E_0 = U_0/d_0;\ \bar{d} = d/d_0$.

При движении ленты транспортера со скоростью v время нагрева элементарного объема к моменту достижения координаты x составит $t = x/v$. Тогда в установившемся режиме температура $T(x)$ с учетом формул (1) и (2) определяется из неявного уравнения

$$x(T) = \frac{v}{A_0}\int_{T_н}^{T(x)} \frac{C(\theta)[\bar{d} + (1-\bar{d})\varepsilon'(\theta)]^2}{\varepsilon''(\theta)}d\theta, \quad (3)$$

где $A_0 = 0{,}5\omega\varepsilon_0\left|E_0\right|^2;\ 0 \le x \le L$.

Распределение температуры $T(x)$ определяет распределение погонных параметров $C_0(x)$ и $G_0(x)$. Тогда параметры схемы замещения находятся путем интегрирования:

$$C = \frac{\varepsilon_0 a}{d_0}\int_0^L \bar{\varepsilon}'(x)dx;\ G = \frac{\omega\varepsilon_0 a}{d_0}\int_0^L \bar{\varepsilon}''(x)dx, \quad (4)$$

где $\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}' - j\bar{\varepsilon}''$ – эквивалентная проницаемость двухслойной среды воздух – порода,

$$\bar{\varepsilon} = \frac{x(1-\bar{d})\left|\varepsilon\right|^2 + \varepsilon'\bar{d}] - j[\varepsilon''\bar{d}]}{[\varepsilon'(1-\bar{d}) + \bar{d}]^2 + [\varepsilon''(1-\bar{d})]^2}, \quad (5)$$

где $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ – эффективная проницаемость породной массы.

Формулы (4) и (5) позволяют оценить диапазон настройки контура генератора (рис.2) при изменении состава породной массы, влияющего на ее электрические свойства.

Если G_r – входная проводимость нагрузки, при которой в породе выделяется максимальная мощность, то определение размера камеры L и скорости поступления породной массы v сводятся к решению трансцендентных уравнений

$$G_r = \frac{\omega_0 \varepsilon a}{d_0} \int_0^L \bar{\varepsilon}''(x)dx;\ L = \frac{v}{A_0} \int_{T_н}^{T=0_+} F(\theta)d\theta, \quad (6)$$

где $F(\theta)$ – подынтегральная функция выражения (3).

Приведенные формулы целесообразно использовать в случае нагрева породной массы с большим содержанием глинистых включений, для которых непрерывный фазовый переход занимает заметную температурную область (-4 °C $< T \le 0$).

Рассмотрим приближенный расчет параметров камеры и характеристики нагрева, аппроксимируя зависимости $C(T)$ и $\varepsilon(T)$ с помощью обобщенных функций Хевисайда и Дирака, как это было сделано в случае волнового способа ввода энергии [3].

При $v = 0$ время нагрева породной массы до температуры $T = 0$ составит

$$\tau = t_0(1 + \eta/\Lambda);\ \Lambda = \left[\frac{\bar{d} + (1-\bar{d})\varepsilon'_м}{\bar{d} + (1-\bar{d})\varepsilon'_т}\right]^2 \frac{\varepsilon''_т}{\varepsilon''_м}, \quad (7)$$

где $\eta = Q_ф / Q_с$, $Q_с = C_м |T_н|$, $Q_ф = w\gamma Q_0$; w – влажность; γ – плотность; $t_0 = Q_с / q_м$; $\Lambda = q_т / q_м$; индексы «м» и «т» относятся к двум состояниям породы.

При движении породы со скоростью v в области $0 \le x \le h$, $h = L/(1+\eta)\Lambda$ происходит нагрев породы с постоянной скоростью $v_т = q_м / C_м$; в остальной области $h \le x \le L$ происходит фазовый переход.

С учетом формулы (6) получим связь между длиной камеры L и оптимальными значениями проводимости G_r:

$$L = \frac{G_r}{g} \frac{(1+\eta/\Lambda)}{\varepsilon''\eta/\Lambda + \varepsilon''_м};\ g = \omega\varepsilon_0 a / d_0. \quad (8)$$

Тогда требуемая скорость движения ленты транспортера с учетом формул (6) и (8) составит

$$v = \frac{|E_0|^2 G_r d_0}{a Q_с} \frac{\varepsilon''_т}{(\varepsilon''_т\eta/\Lambda + \varepsilon''_м)(\bar{d} + (1-\bar{d})\varepsilon'_м)}. \quad (9)$$

Расчет с помощью полученных формул показал, что при использовании ВЧ-генератора ВЧГЗ – 60/13 ($P = 60$ кВт, $U_0 = 10$ кВ, $f = 13$ МГц) условие выделения максимальной мощности в нагрузке выполняется практически для всех типов пород, содержащих глинистый сланец ($\varepsilon = 6 - j1{,}3$) при объемной концентрации крупноскелетной фракции $\vartheta = 0{,}5$-$0{,}8$.

При параметрах камеры $L = 4$ м, $d_0 = 0{,}2$ м, $d = 0{,}1$ м, $a = 0{,}6$ м производительность нагрева породы с параметрами $\eta = 3$, $\Lambda = 0{,}4$ составила 10 м^3/ч.

При реализации рассмотренного метода в подземных условиях целесообразно использовать СВЧ-генератор частотой 430 или 915 МГц. В этом случае технологическая камера имеет меньшие габариты и обеспечивает более высокую скорость нагрева.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ершов В.А.* О нормативах потерь полезных ископаемых // Колыма. 2003. № 4.

2. *Тарасова Т.Б.* Практика обогащения золотосодержащих песков на промприборах / Т.Б.Тарасова, О.В.Зимятин, М.С.Зусманович. Иркутск, 1992.

3. *Шонин О.Б.* Обоснование параметров и режимов СВЧ-устройств для вскрытия зон аварий подземных кабельных трасс в условиях Севера // Народное хозяйство Коми. 1998. Т.7.