

*Секция: Технические науки*

**БЕЗРЯДНОВА ЕКАТЕРИНА АЛЕКСАНДРОВНА**

*магистрант кафедры «Электротехника и  
электрооборудование промышленных предприятий»*

*Уфимский государственный нефтяной  
технический университет, г. Уфа*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКТОРА ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО СКВАЖИННОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА**

Повысить эффективность теплового воздействия на продуктовый пласт, а также снизить влияние тепла на мерзлый грунт при добыче вязкой и высоковязкой нефти можно с помощью индукционного скважинного парогенератора (ИСП). ИСП, основанный на использовании методов паротепловой обработки пласта в комплексе с высокоэффективными электротермическими системами на основе индукционных технологий [1, с. 7], располагается ниже зоны мерзлого грунта непосредственно перед продуктовым пластом, что значительно снижает тепловое воздействие на грунт, тепловые потери и повышает эффективность теплопередачи.

Индукционные технологии, в соответствии с ГОСТ 12.2.007.9-93 [2], работают на низкой частоте (до 60 Гц), называемой еще промышленной частотой, средней частоте (от 60 Гц до 10 кГц) и высокой частоте (от 10 кГц до 300 МГц). При этом нагрев на промышленной частоте характеризуется большими габаритами индуктирующего кабеля, регулируемого источника питания, представляющего устройство коммутации и защиты от аварийных режимов, а также низкой удельной мощностью создания теплового поля, как правило, не более 120 Вт/м. Высокочастотный нагрев, характеризуется меньшими габаритами источника питания, но и в виду своих технических особенностей подходит только для нагрева маломерных участков и применяется в основном для закалки и пайки различных изделий из металла

[3, с. 76]. Однако, частота тока индукционных нагревательных систем, используемых на объектах нефтегазовой отрасли, не превышает 30 кГц, а большинство используемых систем работает на промышленной частоте.

Частота является важной величиной при определении параметров индуктора для ИСП, поскольку она напрямую определяет глубину проникновения тока. По этой причине, параметры индуктора необходимо рассчитывать для ИСП, работающего на токах средне-повышенной частоты и располагающегося на глубине 1000 м.

Так как ИСП представляет собой воздушный трансформатор, то его первичной обмоткой будет являться индуктор, а вторичной – участок трубы, охваченный индуктором. Среднее значение вихревых токов, которые будут наводиться в трубе при известной мощности установки индукционного нагрева, определяется по формуле

$$i_{вх.}^{cp.} = \sqrt{\frac{P}{2 \cdot R}}, \quad (1)$$

где  $P$  – мощность ИСП, Вт;

$R$  – сопротивление участка трубы, Ом.

Сопротивление участка трубы, по которой будут протекать вихревые токи, рассчитывается по формуле

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S_{эф.}}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала трубы, Ом·мм<sup>2</sup>/м;

$l$  – длина участка, м;

$S_{эф.}$  – площадь сечения, по которому будут протекать вихревые токи (эффективная площадь), мм<sup>2</sup>.

Эффективная площадь сечения трубы определяется по формуле

$$S_{эф.} = \pi \cdot (R_1^2 - (R_2')^2), \quad (3)$$

где  $R_1$  – радиус сечения трубы, мм;

$R'_2$  – радиус глубины проникновения, мм.

Радиус глубины проникновения  $R'_2$  равен

$$R'_2 = R_2 + (\delta - \Delta),$$

(4)

где  $R_2$  – радиус сектора, мм;

$\delta$  – толщина стенки трубы, мм;

$\Delta$  – глубина проникновения вихревых токов в металл, мм.

Глубина проникновения вихревых токов для стальной трубы определяется по формуле

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \gamma}}, \quad (5)$$

где  $f$  – частота тока, Гц;

$\mu$  – магнитная проницаемость материала, Гн/м;

$\gamma$  – удельная электропроводность материала, 1/(Ом·м).

Зная среднее значение вихревых токов, можно рассчитать среднее значение токов индуктора по формуле

$$i_{cp.} \approx \frac{i_{ex.}^{cp.}}{k}, \quad (6)$$

где  $i_{cp.}$  – среднее значение токов индуктора, А;

$k$  – коэффициент трансформации воздушного трансформатора.

Среднее значение постоянного тока в индукторе вычисляется по формуле

$$I_d = \frac{P}{U}, \quad (7)$$

где  $U$  – входное напряжение индуктора, В.

Амплитудное значение тока в индукторе определяется по формуле

$$I = \sqrt{2} \cdot I_d. \quad (8)$$

Число витков индуктора  $w$  рассчитывается по формуле

$$w = \frac{U}{U'}, \quad (9)$$

где  $U'$  – напряжение на одновитковом индукторе, В. Напряжение на одновитковом индукторе определяется по [4, с. 23].

Шаг между витками рассчитывается по формуле

$$h = \frac{l_2}{w}, \quad (10)$$

где  $l_2$  – длина трубы, м.

Индуктор представляет собой одножильный медный провод, намотанный в виде спирали на трубу. Величина активного сопротивления провода определяется по формуле

$$R_1 = \frac{\rho_m \cdot l_{np.}}{S}, \quad (11)$$

где  $\rho_m$  – удельное сопротивление токопроводящей жилы, Ом·мм<sup>2</sup>/м;

$l_{np.}$  – длина провода, м;

$S$  – сечение токопроводящей жилы, мм<sup>2</sup>.

Длина провода, представляющая из себя длину спирали с диаметром, равным диаметру трубы  $d_2$ , и шагом, равным шагу намотки индуктора  $h$ , равна

$$l_{np.} = \frac{l_2}{h} \cdot \sqrt{\pi \cdot d_2^2 + \frac{h^2}{2}}, \quad (12)$$

где  $d_2$  – внешний диаметр трубы, м.

Индуктивное сопротивление провода  $X_1$  определяется по формуле

$$X_1 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L, \quad (13)$$

где  $f$  – частота тока, Гц;

$L$  – индуктивность индуктора, Гн.

Индуктивность индуктора рассчитывается по формуле

$$L = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot w^2 \cdot d_2 \cdot \Phi, \quad (14)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная, Гн/м;

$\Phi$  – величина, значения которой даны в таблице 6-1 [5] в зависимости от отношения  $\alpha = a/d_2$  ( $a$  – длина соленоида).

Рассчитанные параметры индуктора сводятся в таблицу 1.

**Таблица 1 – Параметры индуктора.**

Частота, кГц	0,05	0,5	1	5	10	20	30
Число витков, шт	280	100	60	18	11	7	5
Шаг между витками, м	0,04	0,1	0,17	0,55	0,9	1,43	2
Длина провода, м	47,9	24,78	18,46	9,68	7,51	5,96	5,03
Активное сопротивление провода, мОм	34,49	17,84	14,25	12,61	13,07	14,14	14,36
Индуктивность, мкГн	46,33	5,91	2,13	0,19	0,071	0,029	0,015
Индуктивное сопротивление провода, мОм	14,54	18,55	13,36	6,01	4,49	3,63	2,28

### Литература

1. Безряднова Е.А., Хлюпин П.А. Источник вторичного электропитания для индукционного скважинного парогенератора // Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Техника и технологии: роль в развитии современного общества». – Краснодар, 2016. – С. 6-11.
2. ГОСТ 12.2.007.9-93 «Безопасность электротермического оборудования. Часть 1. Общие положения». – Минск, 1993.
3. Макулов И.А., Мамаев Н.М., Конесев С.Г. Применение систем среднечастотного индукционного нагрева при транспортировке нефтепродукта // Нефтегазовое дело. – Уфа, 2008. – Том 6. – № 2. – С. 75-79.
4. Слухоцкий А.Е. Индукторы. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1989. – С. 23, 51-59.
5. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: справочная книга. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – С. 247.