

# РАСЧЕТ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ ЗАБОЯ НЕФТЯНОЙ СКВАЖИНЫ

А. М. Бурмакин, Е. С. Вильданов, Е. М. Огарков

## Calculation of induction heaters for oil bottomhole

A. M. Burmakin, E. S. Vil'danov, E. M. Ogarkov

Authors consider the problems of calculation of electromagnetic field and power characteristics of induction heater intended for heating of oil bottomhole. Warming up the well bottomhole is one of the effective ways to enhance oil recovery and increase well productivity.

Induction heater of a solenoid coil type is simple to manufacture and provides maximum energy efficiency under the constrained space of the well. The main elements of considered induction heater are insulated copper wire coil and the inner magnetic circuit.

To evaluate the energy properties of the heater it is necessary calculate the distribution of the electromagnetic field inside and outside the heater. One can solve such problems using computational models that allow obtaining practical results with minimum effort and expense. Calculated heater model consists of several layers with constant values of conductivity and magnetic permeability. Influence of saturation is taken into account iteratively.

Initial data for calculation is the size of the coil, the magnetic core and casing pipe; electrical conductivity and magnetic permeability of the material of magnetic circuit and casing pipe; parameters of the coil and heater power source. Results of calculation are magnitude of the coil current and parameters of the electromagnetic field of all zones of the computational model of the heater.

Thereafter, authors calculate active and reactive power, impedance of the equivalent circuit and the power factor. Authors made the realization of heater calculation program in Mathcad. Article has the example of developed program output for calculating a heater parameters and the possibility of its use for heating of oil bottomhole.

**Keywords:** induction heater, oil bottomhole, casing pipe, coil and magnetic circuit of the heater, heater input data, calculation algorithm, calculation program, parameters of the electromagnetic field, active and reactive power, resistance of the equivalent circuit, heater current, the magnitude of the supply voltage.

Рассматриваются вопросы расчета электромагнитного поля и энергетических характеристик индукционного нагревателя, предназначенного для прогрева забоя нефтяной скважины. Прогрев забоя скважины является одним из эффективных способов усиления нефтеотдачи пласта и повышения производительности скважины. Индукционный нагреватель соленоидного типа прост в изготовлении и обеспечивает максимальную энергетическую эффективность в условиях стесненного пространства скважины. Основными элементами рассматриваемого индукционного нагревателя являются катушка из медного изолированного провода и внутренний магнитопровод. Для оценки энергетических свойств нагревателя необходимо выполнить расчет распределения электромагнитного поля внутри и вне нагревателя. Такие задачи решаются с использованием расчетных моделей, позволяющих получить практические результаты с минимальными затратами сил и средств. Расчетная модель нагревателя состоит из нескольких слоев с постоянными значениями электропроводности и магнитной проницаемости. Влияние насыщения учитывается итерационным путем. Исходными данными для расчета являются: размеры катушки, магнитопровода и обсадной трубы; электропроводность и магнитная проницаемость материалов магнитопровода и обсадной трубы; параметры катушки и источника питания нагревателя. В результате расчета определяются величина тока катушки и параметры электромагнитного поля всех зон расчетной модели нагревателя. После этого рассчитываются активная и реактивная мощность, сопротивления схемы замещения и коэффициент мощности. Программа расчета нагревателя реализована в среде MathCad. По разработанной программе выполнен расчет нагревателя и показана возможность его использования для прогрева забоя нефтяной скважины.

**Ключевые слова:** индукционный нагреватель; забой нефтяной скважины; обсадная труба; катушка и магнитопровод нагревателя; исходные данные нагревателя; алгоритм расчета; программа расчета; параметры электромагнитного поля; активная и реактивная мощность; сопротивления схемы замещения; ток нагревателя; величина питающего напряжения.

Рассматриваемый индукционный нагреватель предназначен для прогрева забоя и призабойного пространства нефтяной скважины. Применение таких электронагревателей позволяет увеличить подвижность нефти в призабойном пространстве и повысить производительность скважины [1–3]. Нагреватель должен иметь цилиндрическую форму, легко перемещаться по скважине и состоять из отдельных модулей длиной 0,5–1,5 м. Мощность нагревателя обычно не превышает 30 кВт. Для повышения эффективности забойных нагревателей необходимо создавать их с учетом условий работы скважины [4].

Теоретическая база для расчета электромагнитного поля индукционного нагревателя имеется в [5]. Основные подходы и обоснование метода расчета индукционного нагревателя для забоя нефтяной скважины изложены в [6]. Поэтому желательно предварительно ознакомиться с данной статьей, чтобы лучше понимать излагаемый метод расчета.

Общий вид забойного индукционного нагревателя показан на рис. 1. Катушка нагревателя обычно состоит из нескольких секций, между которыми могут размещаться разрезные диски для отвода тепла [7, 8]. Эти конструктивные особенности не оказывают влияния на электромагнитное поле нагревателя, поэтому на рис. 1 они не показаны.

Для расчета электромагнитного поля рассматриваемого нагревателя используется расчетная модель, описанная в [6] и показанная на рис. 2.

**Исходные данные для расчета:**  $d_2$  – внутренний диаметр обсадной трубы;  $h_3$  – толщина стенки обсадной трубы;  $\gamma_3$  – удельная электропроводность материала стенки обсадной трубы;  $\mu_3$  – магнитная проницаемость материала стенки обсадной трубы;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;  $d_1$  – внутренний диаметр катушки нагревателя;  $L$  – длина катушки нагревателя;  $w$  – число витков катушки;  $\gamma_{np}$  – удельная проводимость материала провода катушки;  $\mu_1$  – магнитная проницаемость материала магнитопровода нагревателя;  $J_a$  – действующее значение линейной токовой нагрузки;  $f$  – частота тока источника питания;  $k_{31}$  – коэффициент заполнения магнитопроводом внутренней полости катушки;  $\gamma_c$  – объемная плотность стали;  $P_{уд}$  – удельные потери на перемагничивание стали;  $k_{3к}$  – коэффициент заполнения катушки медью;  $j_{np}$  – плотность тока в проводнике.

**Подготовительные расчеты**

Круговая частота

$$\omega = 2\pi f.$$

Коэффициент пространственного распределения

$$\alpha = \pi/L.$$

Корень характеристического уравнения в третьей зоне расчетной модели рис. 2

$$\dot{P}_3 = \sqrt{\alpha^2 + j\mu_3\omega\gamma_3}.$$

Длина окружности обсадной трубы по внутренней поверхности (ширина расчетной модели)

$$b = \pi d_2.$$

Площадь сечения внутреннего магнитопровода

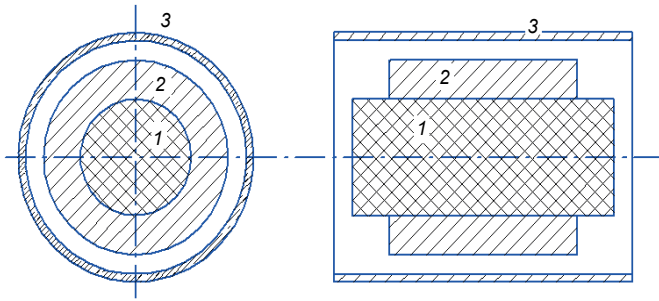
$$q_1 = \frac{k_{31} \pi d_1^2}{4}.$$

Толщина первого слоя расчетной модели

$$z_1 = q_1/b.$$

Высоту зоны 2 расчетной модели рис. 2 обозначим  $h_2$ . Величину  $h_2$  можно найти из условия равенства объемов зоны 2 и пространства между внутренним магнитопроводом нагревателя и обсадной трубой:

$$h_2 b L = \left( \frac{\pi d_2^2}{4} - \frac{\pi d_1^2}{4} \right) L.$$



**Рисунок 1. Схематический вид индукционного нагревателя. 1 – магнитопровод нагревателя; 2 – катушка нагревателя; 3 – обсадная труба / Figure 1. A schematic view of an induction heater.**

После преобразований получим

$$h_2 = \frac{\pi}{4b} (d_2^2 - d_1^2).$$

Координата границы зон 2 и 3 модели рис. 2

$$z_2 = z_1 + h_2.$$

Координата границы зон 3 и 4 модели рис. 2

$$z_3 = z_2 + h_3.$$

Действующее значение тока катушки

$$I_1 = \frac{J_n L}{w}.$$

Комплексная линейная токовая нагрузка

$$j_n = J_n e^{j\omega t}. \tag{1}$$

Толщина катушки

$$h_k = \frac{J_n}{j_{np} k_{zk}}.$$

Средняя длина витка

$$l_b = \pi (d_1 + h_k).$$

Площадь поперечного сечения провода катушки

$$q_{np} = I_1 / j_{np}.$$

Расчет коэффициентов для системы уравнений осуществляется по формулам, полученным в [6]:

$$k_1 = \alpha \frac{\mu_1}{\mu_0}; \dot{k}_3 = \frac{\mu_0 \dot{P}_3}{\mu_3 \alpha}; \tag{2}$$

$$k_{11} = z_1; k_{12} = -e^{\alpha z_1}; k_{13} = -e^{-\alpha z_1}; \tag{3}$$

$$k_{21} = 1; k_{22} = k_1 k_{12}; k_{23} = -k_1 k_{13}; \tag{4}$$

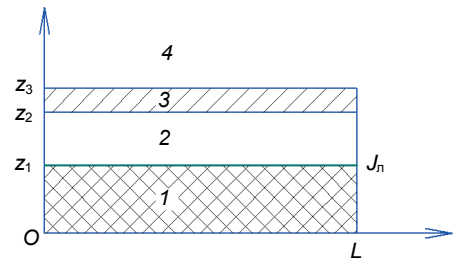
$$k_{32} = e^{\alpha z_2}; k_{33} = e^{-\alpha z_2}; \dot{k}_{34} = -e^{\dot{P}_{3z2}}; \dot{k}_{35} = -e^{-\dot{P}_{3z2}}; \tag{5}$$

$$k_{42} = k_{32}; k_{43} = -k_{33}; \dot{k}_{44} = \dot{k}_3 \dot{k}_{34}; \dot{k}_{45} = -\dot{k}_3 \dot{k}_{35}; \tag{6}$$

$$\dot{k}_{54} = e^{\dot{P}_{3z3}}; \dot{k}_{55} = e^{-\dot{P}_{3z3}}; k_{56} = -e^{-\alpha z_3}; \tag{7}$$

$$\dot{k}_{64} = \dot{k}_3 \dot{k}_{54}; \dot{k}_{65} = -\dot{k}_3 \dot{k}_{55}; k_{66} = e^{-\alpha z_3}. \tag{8}$$

Для расчета электромагнитного поля нагревателя используется система уравнений, полученных из граничных условий расчетной модели



**Рисунок 2. Расчетная модель индукционного нагревателя. 1 – зона внутреннего магнитопровода; 2 – немагнитное пространство; 3 – стенка обсадной трубы; 4 – затрубное пространство;  $J_n$  – линейная токовая нагрузка;  $L$  – длина катушки индуктора / Figure 2. The computational model of the induction heater.**

рис. 2. Эта система уравнений получена в [6]. Здесь она записывается с использованием коэффициентов, рассчитанных по формулам (2)–(8):

$$k_{11} \dot{V}_1 + k_{12} \dot{V}_2 + k_{13} \dot{V}_3 = 0;$$

$$k_{21} \dot{V}_1 + k_{22} \dot{V}_2 + k_{23} \dot{V}_3 = \mu_1 j_n;$$

$$k_{32} \dot{V}_2 + k_{33} \dot{V}_3 + \dot{k}_{34} \dot{V}_4 + \dot{k}_{35} \dot{V}_5 = 0;$$

$$k_{42} \dot{V}_2 + k_{43} \dot{V}_3 + \dot{k}_{44} \dot{V}_4 + \dot{k}_{45} \dot{V}_5 = 0;$$

$$\dot{k}_{54} \dot{V}_4 + \dot{k}_{55} \dot{V}_5 + \dot{k}_{56} \dot{V}_6 = 0;$$

$$\dot{k}_{64} \dot{V}_4 + \dot{k}_{65} \dot{V}_5 + \dot{k}_{66} \dot{V}_6 = 0.$$

Решив эту систему уравнений, определим неизвестные постоянные интегрирования  $\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dot{V}_3, \dot{V}_4, \dot{V}_5, \dot{V}_6$ .

Магнитная индукция внутреннего магнитопровода (зона 1)

$$B_1 = \sqrt{[\text{Re} \dot{V}_1]^2 + [\text{Im} \dot{V}_1]^2}. \tag{9}$$

Магнитная индукция на внутренней поверхности обсадной трубы

$$\dot{B}_3 = \dot{P}_3 (\dot{k}_{34} \dot{V}_4 - \dot{k}_{35} \dot{V}_5); B_3 = \sqrt{[\text{Re} B_3]^2 + [\text{Im} B_3]^2}.$$

По значениям  $B_1$  и  $B_2$  уточняются итерационным путем магнитные проницаемости  $\mu_1$  и  $\mu_3$ .

Полная мощность нагревателя наиболее просто находится через линейную токовую нагрузку [5, 6]:

$$\underline{S} = -b \int_0^L \dot{E}_1 J_n^* dx.$$

Здесь  $\dot{E}_1$  – напряженность электрического поля на границе зон 1–2 модели рис. 2.

Согласно [6]

$$\dot{E}_1 = -j\omega \dot{V}_1 z_1 e^{j\omega t}. \tag{10}$$

В общем случае  $\dot{V}_1$  зависит от координаты  $x$  [6]. Сопряженный комплекс линейной токовой нагрузки находится по (1):

$$J_n^* = J_n e^{-j\omega t}. \tag{11}$$

Полная мощность нагревателя с учетом (10) и (11)

$$\underline{S} = -b \int_0^L \dot{E}_1 J_n^* dx. \tag{12}$$

Если длина катушки индукционного нагревателя на порядок больше её диаметра, то магнитное поле и значение  $\dot{V}_1$  практически не зависят от координаты  $x$  [9]. В этом случае полная мощность нагревателя легко находится из (12):

$$\underline{S} = j\omega b z_1 L J_n \dot{V}_1. \tag{13}$$

Если длина катушки индукционного нагревателя соизмерима с её диаметром, то магнитное поле по длине нагревателя и по координате  $x$  модели рис. 2 распределяется неравномерно. Первую гармонику напря-

женности электрического поля на границе зон 1–2 расчетной модели рис. 2 можно записать согласно [6]:

$$\dot{E}_1 = -j\omega \dot{V}_1 z_1 e^{j\omega t} \sin(\alpha x). \quad (14)$$

Подставив значения  $E_1$  из (14) в (12) и выполнив интегрирование, получим полную мощность индукционного нагревателя с учетом неравномерности распределения поля по длине нагревателя:

$$\underline{S} = j\omega b z_1 L J_l \dot{V}_1 \frac{2}{\pi}. \quad (15)$$

Полная мощность имеет активную и реактивную составляющие:

$$\underline{S} = P + jQ; S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Мощности, рассчитанные по (10) и (12), не учитывают потери в катушке и магнитопроводе нагревателя. Мощность потерь в катушке легко рассчитывается по исходным данным:

$$P_k = I_1^2 R_k.$$

Сопротивление провода катушки

$$R_k = \frac{l_n w}{\gamma_{np} q_{np}}.$$

Потери в стали магнитопровода нагревателя зависят от физических свойств стали, массы магнитопровода и величины магнитной индукции  $B_1$ . Магнитная индукция  $B_1$  рассчитывается по (9).

Масса стали находится по исходным данным:

$$m_c = \frac{\pi d_1^2}{4} L k_{з1} \gamma_c.$$

Коэффициент заполнения внутренней полости катушки сталью магнитопровода зависит от конструкции нагревателя. Обычно коэффициент заполнения  $k_{з1} \approx 0,5-0,7$ .

Поперечное сечение магнитопровода выбирается таким, чтобы в рабочих режимах магнитная индукция  $B_1$  была близка к 1,5 Тл. Удельные потери в стали магнитопровода при  $B_1 = 1,5$  Тл можно найти в справочнике [10].

Мощность потерь в стали

$$P_c = P_{уд} m_c.$$

Суммарная активная мощность нагревателя

$$P_1 = P + P_k + P_c.$$

Здесь  $P$  – активная мощность по (13) или (15).

Коэффициент мощности нагревателя

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q^2}}.$$

Здесь  $Q$  – реактивная мощность по (13) или (15).

Индукционный нагреватель можно представить в виде схемы замещения, показанной на рис. 3.

Исходной величиной для расчетов является ток  $I_1$ , по которому вычисляются мощности  $P_1$  и  $Q$ . Через мощности легко находятся сопротивления схемы замещения:

$$R_1 = \frac{P_1}{I_1^2}; X_1 = \frac{Q}{I_1^2}.$$

Необходимую величину питающего напряжения находят по схеме замещения рис. 3:

$$U_1 = I_1 \sqrt{R_1^2 + X_1^2}. \quad (16)$$

Полученное по (16) значение  $U_1$  отличается от стандартного. Для согласования расчетного значения  $U_1$  с напряжением источника питания необходимо изменить число витков катушки нагревателя и повторить расчеты.

Изложенный ранее алгоритм расчета был положен в основу программы расчета электромагнитного поля и энергетических характери-

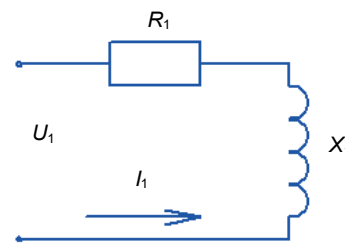


Рисунок 3. Схема замещения индукционного нагревателя / Figure 3. Equivalent circuit of an induction heater.

стик индукционного нагревателя. Программа расчета нагревателя реализована в среде MathCad. По разработанной программе был выполнен расчет индукционного нагревателя соленоидного типа при следующих исходных данных:  $d_1 = 100$  мм;  $d_2 = 160$  мм;  $h_3 = 9$  мм;  $L = 1$  м;  $\gamma_3 = 3 \times 10^6$  (1/Ом × м);  $w = 300$ ;  $k_{з1} = 0,6$ . Обсадная труба выполнена из малоуглеродистой литой стали. Источник питания – сеть 380 В, 50 Гц. Остальные величины определялись и уточнялись в процессе расчета.

В результате расчета были получены следующие результаты:

- ток катушки  $I_1 = 65,4$  А;
- активная мощность нагревателя  $P = 13,5$  кВт;
- коэффициент мощности  $\cos \varphi = 0,54$ ;
- мощность в стенке обсадной трубы 12,8 кВт.

Из результатов видно, что индукционные нагреватели соленоидного типа очень хорошо подходят для прогрева забоя нефтяных скважин. Это обусловлено тем, что 95 % энергии выделяется в обсадной трубе и идет непосредственно на нагрев забоя скважины. Внутри нагревателя выделяется около 5 % общей мощности, что облегчает решение главной проблемы – защиты катушки нагревателя от перегрева.

Точность расчетов по предлагаемой программе в первую очередь зависит от точности исходных данных по электропроводности и магнитной проницаемости материала обсадной трубы. У нагревателей с короткой катушкой точность расчетов снижается за счет погрешности учета концевых эффектов, обусловленных сложной картиной поля у концов катушки. Точность расчета можно повысить, разделив стенку обсадной трубы на несколько слоев. Этот вопрос подробно исследован в [5]. Для уточнения методики расчета индукционных нагревателей соленоидного типа необходимо изготовить опытный образец нагревателя, провести его испытания и внести поправочные коэффициенты, как это рекомендуется в [9] для других индукционных нагревателей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мищенко И. Т. Скважинная добыча нефти. М.: РГУ нефти и газа, 2007. 826 с.
2. Мищенков И. С. Воздействие на нефтяные залежи и призабойные зоны продуктивных пластов. Пермь, 1974. 128 с.
3. Муслимов Р. Х. Современные методы повышения нефтеизвлечения. Казань, 2004. 582 с.
4. Бочарников В. Ф. Справочник мастера по ремонту нефтегазового технологического оборудования. М.: Инфра-Инженерия, 2008. 576 с.
5. Огарков Е. М. Квазитрехмерная теория линейных асинхронных двигателей. Пермь: ПГТУ, 2003. 240 с.
6. Огарков Е. М., Вильданов Е. С. Расчетная модель индукционного нагревателя для нефтяных скважин // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2016. № 15. С. 115–123.
7. Слухоцкий А. Е., Немков В. С., Павлов Н. А. Установки индукционного нагрева. Л.: Энергоиздат, 1981. 272 с.
8. Кувалдин А. Б. Индукционный нагрев магнитной стали на промышленной частоте. М.: ВИНТИ, 1976. 83 с.
9. Кувалдин А. Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали. М.: Энергоатомиздат, 1988. 198 с.
10. Электротехнический справочник. В 3 т. / под ред. В. Г. Герасимова. М.: Энергоатомиздат, 1985. Т. 1. 488 с.

#### REFERENCES

1. Mishchenko I. T. 2007, *Skvazhinnaya dobycha nefiti* [Downhole oil production], Moscow, 826 p.
2. Mishchenkov I. S. 1974, *Vozdeystvie na neflyanye zalezhi i prizaboynye zony produktivnykh plastov* [The impact on the oil reservoir and bottomhole zones of productive strata], Perm', 128 p.
3. Muslimov R. Kh. 2004, *Sovremennyye metody povysheniya nefteizvlecheniya* [Modern methods of enhanced oil recovery], Kazan', 582 p.
4. 2008, *Spravochnik мастера по ремонту нефтегазового технологического оборудования* [Handbook of repair master of oil and gas processing equipment], Moscow, 576 p.
5. Ogarkov E. M. 2003, *Kvazitrekhnemaya teoriya lineynykh asinkhronnykh dvigateley* [The quasi three-dimensional theory of linear induction motors], Perm', 240 p.

6. Ogarkov E. M., Vil'danov E. S. 2016, *Raschetnaya model' induktsionnogo nagrevatelya dlya neftyanykh skvazhin* [The computational model of the induction heater for oil wells]. *Vestnik PNIPU* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University], no. 15, pp. 115-123.
7. 1981, *Ustanovki induktsionnogo nagreva* [Induction heating Plants], Leningrad, 272 p.
8. Kuvaldin A. B. 1976, *Induktsionnyy nagrev magnitnoy stali na promyshlennoy chastote* [Induction heating of the magnetic steel on the industrial frequency], Moscow, 83 p.
9. Kuvaldin A. B. 1988, *Induktsionnyy nagrev ferromagnitnoy stali* [Induction heating of ferromagnetic steel], Moscow, 198 p.
10. 1985, *Elektrotekhnicheskii spravochnik* [Electrical Engineering handbook], Moscow, vol. 1, 488 p.

**Артём Михайлович Бурмакин,**  
amburmakin@mail.ru

**Евгений Сергеевич Вильданов,**

**Евгений Матвеевич Огарков,**

Пермский национально-исследовательский политехнический университет

Россия, Пермь, Комсомольский пр-т, 29

**Artem Mikhaylovich Burmakin,**  
amburmakin@mail.ru

**Evgeniy Sergeevich Vil'danov,**

**Evgeniy Matveevich Ogarkov,**

Perm National Research Polytechnic University  
Perm, Russia