

УДК 662.276; 621.313

Е.М. Огарков, Е.С. ВильдановПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ ДЛЯ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

Рассматриваются вопросы расчета индукционного нагревателя, предназначенного для прогрева призабойного пространства нефтяных скважин. Прогрев забоя скважины является одним из эффективных способов усиления нефтеотдачи пласта и повышения производительности скважины. Прогрев забоя скважины может осуществляться различными способами. Лучшие результаты по эффективности и надежности обеспечивают низкотемпературные нагреватели индукционного типа. У таких нагревателей выделение тепла происходит не внутри нагревателя, а в обсадной трубе, которая непосредственно соприкасается с призабойным пространством скважины.

Рассматривается индукционный нагреватель соленоидного типа, который 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. Катушка должна создавать необходимую магнитодвижущую силу. Для удобства изготовления и монтажа катушку следует разделить на несколько секций, которые включаются последовательно. Нагреватель состоит из трех катушек, которые включаются на линейное напряжение трехфазной сети. Во внутреннем пространстве катушки размещается магнитопровод из листовой электротехнической стали, что позволяет уменьшить величину намагничивающего тока.

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. Расчетная модель построена в прямоугольной системе координат, что позволяет резко упростить расчет электромагнитного поля и энергетических характеристик нагревателя.

Ключевые слова: индукционный нагреватель, нефтяная скважина, забой скважины, обсадная труба, шихтованный магнитопровод, катушка из медного изолированного провода, электрический ток, линейная токовая нагрузка, расчетная модель, векторный потенциал, электромагнитная мощность.

E.M. Ogarkov, E.S. Vildanov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

COMPUTED MODEL OF AN INDUCTION HEATER FOR OIL-WELLS

It is dealt with calculations of inductor heater which is destined for warmup of oil-well's bottom-hole area. Warmup of bottom hole is one of the most effective ways to step out a reservoir recovery and to increase oil-well production rate. Warmup of bottom hole is realized in different ways. But only low usable temperature inductor heater meets the most effective and the most dependable results. This type of inductor heater provides heat evolution in casing pipe, which has contacts with bottom-hole area.

It is dealt with a solenoid type of induction heater which is easy to manufacture and one of its advantages is maximizing of energy efficiency in conditions of cramped oil-well space. Basic elements of this type of inductor heater are spool of cooper wire and inner core. The spool is necessary to produce a magnetomotive force. It is necessary to divide the spool in several parts which come into operation consecutively for the easiest way to make and assemble the spool. The heater consists of three spools that come on three-phase network line voltage. There is a core, made of electric grade sheet in spool's interior space, and it provides decrease of excitation current index.

Computed model of induction heater consists of several parts which include constant values of electric conductance and inductivity. Saturation effect is counted towards to iterative way. Computed model is built in rectangular coordinate system to provide an opportunity to simplify calculations of electromagnetic field and calculations of an inductive heater energy characteristic. To evaluate energetic properties of the heater it is necessary to calculate the assignment of the electromagnetic field inside and outside of the heater. It is achieved by means of computed models that afford to receive application results with minimum expenses and efforts. It is dealt with calculations of inductor heater which is destined for warmup of oil-well's hole-bottom region. Warmup of bottom hole is one of the most effective ways to step out a reservoir recovery and to increase oil-well production rate. It is dealt with a solenoid type of induction heater which is easy to manufacture and one of its advantages is maximizing of energy efficiency in conditions of cramped oil-well space. Computed model of induction heater consists of several parts which include constant values of electric conductance and inductivity. Saturation effect is counted towards to iterative way. Computed model is built in rectangular coordinate system to provide an opportunity to simplify calculations of electromagnetic field and calculations of an inductive heater energy characteristic.

Keywords: inductor heater, oil-well, bottom hole, casing pipe, laminated magnetic conductor, coil from copper isolated wire, electric current, linear current load, Computed model, vector potential, electromagnetic power.

Рассматриваемый индукционный нагреватель предназначен для прогрева забоя и призабойного пространства нефтяных скважин. Такой прогрев является одним из эффективных способов усиления нефтеотдачи пласта и повышения производительности скважины [1, 2, 3]. Между корпусом нагревателя и обсадной трубой находится слой нефтесодержащей скважинной жидкости. Это затрудняет передачу тепла от корпуса нагревателя к обсадной трубе и призабойному пространству.

Электронагреватели с высокотемпературными нагревательными элементами все тепло отдают скважинной жидкости. Большая часть тепла уносится скважинной жидкостью, а до обсадной трубы и призабойного пространства доходит малая часть тепла, созданного нагрева-

телем. Такие нагреватели малоэффективны при нагреве забоя и призабойного пространства скважины [4, 5].

Индукционные нагреватели лучше подходят для нагрева забоя скважины, так как электрическая энергия от катушки нагревателя передается к обсадной трубе с помощью магнитного поля [6]. Немagnetный зазор между корпусом нагревателя и обсадной трубой достигает 10 мм, поэтому здесь следует применять индукционный нагреватель соленоидного типа, показанный на рис. 1 [7, 8].

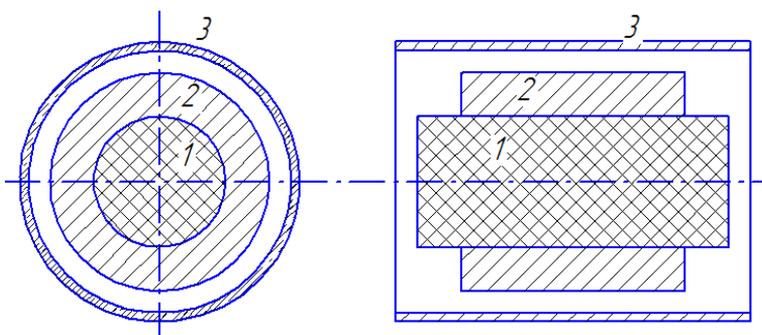


Рис. 1. Индукционный нагреватель для скважин: 1 – обсадная труба, 2 – катушка нагревателя, 3 – шихтованный магнитопровод

Расчетная модель (рис. 2) получена из схемы нагревателя (см. рис. 1).

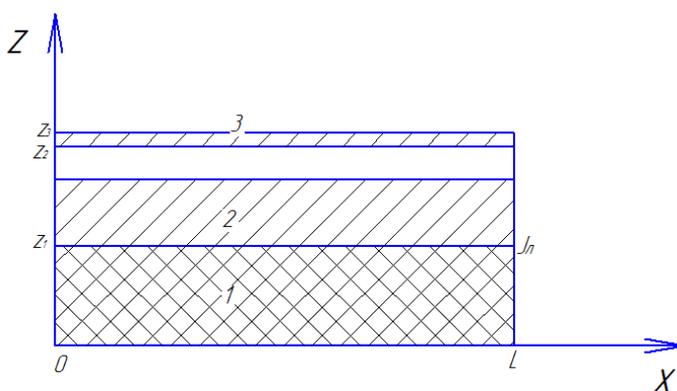


Рис. 2. Расчетная модель нагревателя: 1 – обсадная труба, 2 – катушка нагревателя, 3 – шихтованный магнитопровод

Протяженность слоев расчетной модели по оси y принимаем равной длине окружности обсадной трубы, так как основной процесс преобразования энергии происходит в стенке трубы.

Зона 1 соответствует внутреннему магнитопроводу нагревателя, выполненному из листовой электротехнической стали. Магнитная проницаемость этой зоны по оси x равна магнитной проницаемости стали ($\mu_{1x} = \mu_1$). Магнитная проницаемость по оси z принята равной бесконечности, т.е. магнитное поле по сечению магнитопровода распределяется равномерно. Это допущение упрощает расчеты без ущерба для их точности. Электропроводность зоны 1 равна нулю ($\gamma_1 = 0$).

Зона 2 – немагнитное пространство между внутренним магнитопроводом и обсадной трубой ($\mu_2 = \mu_0, \gamma_2 = 0$). Она учитывает зазор между нагревателем и обсадной трубой, а также пространство катушки.

Зона 3 соответствует стенке обсадной трубы. Магнитная проницаемость материала обсадной трубы μ_3 и электропроводность γ_3 .

Зона 4 – затрубное пространство ($\mu_4 = \mu_0, \gamma_4 = 0$).

Линейная токовая нагрузка $J_{л}$ зависит от тока I_1 , числа витков катушки w и длины катушки L .

$$J_{л} = \frac{I_1 \cdot w}{L}. \quad (1)$$

Линейная токовая нагрузка находится на границе зон 1 и 2, равномерно распределяется по оси x и изменяется во времени по синусоидальному закону. В комплексном виде

$$\dot{J}_{л} = J_{лт} e^{j\omega t},$$

где $J_{лт}$ – амплитудное значение токовой нагрузки, $\omega = 2\pi f$, f – частота тока, t – время.

Магнитное поле по длине нагревателя распределяется неравномерно. В центральной части нагревателя поле максимальное и мало изменяется по длине. У концов нагревателя магнитное поле снижается до нуля. Первая пространственная гармоника векторного потенциала магнитного поля нагревателя имеет вид [9]

$$\dot{A} = A_m e^{j\omega t} \sin(\alpha x), \quad (2)$$

где $\alpha = \pi / L$.

Магнитное поле по окружности нагревателя не изменяется, поэтому векторный потенциал имеет одну составляющую, направленную по оси y , которая от y не зависит.

Дифференциальное уравнение векторного потенциала во всех зонах модели (см. рис. 2) имеет вид [10]

$$\frac{\partial^2 \dot{A}}{\partial z^2} + \frac{\mu_x}{\mu_z} \frac{\partial^2 \dot{A}}{\partial x^2} - \mu_x \gamma \frac{\partial^2 \dot{A}}{\partial t} = 0. \quad (3)$$

где γ – электропроводность зоны по оси y .

Это уравнение после дифференцирования по x и t принимает вид

$$\frac{d^2 \dot{A}}{dz^2} - \left(\alpha^2 \frac{\mu_x}{\mu_z} + j\mu_x \gamma \omega \right) \dot{A} = 0. \quad (4)$$

Характеристические уравнения дифференциального уравнения (4):

$$\dot{P}^2 - \left(\alpha^2 \frac{\mu_x}{\mu_z} + j\mu_x \gamma \omega \right) = 0. \quad (5)$$

Корни характеристического уравнения:

$$\dot{P} = \pm \sqrt{\alpha^2 \frac{\mu_x}{\mu_z} + j\mu_x \gamma \omega}. \quad (6)$$

Решение дифференциального уравнения (4):

$$\dot{A} = \dot{V}_1 e^{\dot{P}z} + \dot{V}_2 e^{-\dot{P}z}, \quad (7)$$

где \dot{V}_1 и \dot{V}_2 – постоянные интегрирования, зависящие от времени и координаты x , как это записано в формуле (2).

В зоне 1 принято $\mu_{1z} = \infty$, $\mu_{1x} = \mu_1$, $\gamma_1 = 0$. При этих условиях дифференциальное уравнение (4) в зоне 1 принимает вид

$$\frac{d^2 \dot{A}_1}{dz^2} = 0. \quad (8)$$

Решение этого уравнения с учетом граничного условия $A_1 = 0$ при $z = 0$

$$\dot{A}_1 = \dot{V}_1 z. \quad (9)$$

В зоне 2 расчетные модели (см. рис. 2): $\gamma_2 = 0$, $\mu_{2x} = \mu_{2z} = \mu_0$. Дифференциальное уравнение векторного потенциала зоны 2 получим из (4):

$$\frac{d^2 \dot{A}_2}{dz^2} - \alpha^2 \dot{A}_2 = 0. \quad (10)$$

Корни этого уравнения: $P_2 = \pm \alpha$.

Решение для векторного потенциала зоны 2 получаем из (7):

$$\dot{A}_2 = \dot{V}_2 e^{\alpha z} + \dot{V}_3 e^{-\alpha z}. \quad (11)$$

В зоне 3 расчетной модели $\mu_{3x} = \mu_{3z} = \mu_3$ и электропроводность $\gamma_3 \neq 0$. Дифференциальное уравнение векторного потенциала этой зоны получим из (4):

$$\frac{d^2 \dot{A}_3}{dz^2} - (\alpha^2 + j\mu_3 \gamma_3 \omega) \dot{A}_3 = 0. \quad (12)$$

Корни этого уравнения

$$\dot{P}_3 = \pm \sqrt{\alpha^2 + j\mu_3 \gamma_3 \omega}. \quad (13)$$

Решение векторного потенциала зоны 3 получаем из (7):

$$\dot{A}_3 = \dot{V}_4 e^{\dot{P}_3 z} + \dot{V}_5 e^{-\dot{P}_3 z}. \quad (14)$$

В зоне 4 $\mu_{4x} = \mu_{4z} = \mu_0$, $\gamma_4 = 0$ и векторный потенциал при $z = \infty$ равняется нулю. Поэтому решение векторного потенциала этой зоны имеет вид

$$\dot{A}_4 = \dot{V}_6 e^{-\alpha z}. \quad (15)$$

Напряженность электрического поля при принятых в расчетной модели допущениях имеет одну составляющую, направленную по оси y и легко находится через векторный потенциал:

$$\dot{E} = -\frac{\partial \dot{A}}{\partial t} = -j\omega \dot{A}. \quad (16)$$

Магнитная индукция находится через векторный потенциал [3].

В общем случае

$$\bar{B} = rot \bar{A} = \bar{i} \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) + \bar{j} \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \bar{k} \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right). \quad (17)$$

В рассматриваемой задаче векторный потенциал имеет одну составляющую A_y . При этом из (17) следует:

$$B_x = -\frac{\partial A_y}{\partial z}. \quad (18)$$

Напряженность магнитного поля

$$H_x = \frac{B_x}{\mu_x}. \quad (19)$$

Магнитная индукция в центральной части индукционного нагревателя имеет одну составляющую, направленную по оси x . поэтому индекс x у B_x и H_x можно не писать. По формулам (18) и (19) получим индукцию и напряженность магнитного поля во всех зонах расчетной модели (см. рис. 2).

Граничные условия при $z = 0$ и $z = \infty$ учтены в решениях (10) и (16).

На границах зон расчетной модели (см. рис. 2) должны быть равны касательные составляющие напряженностей электрического и магнитного полей [3]. В рассматриваемой задаче во всех зонах модели (см. рис. 2) напряженность электрического поля $\dot{E} = -i\omega\dot{A}$. Поэтому равенство напряженностей электрического поля на границах зон можно заменить равенством векторных потенциалов.

Запишем граничные условия для границ зон (1–2), (2–3), (3–4).

Граница зон (1–2) имеет координату z_1 и граничные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} \dot{A}_1 \Big|_{z_1} &= \dot{A}_2 \Big|_{z_1}, \quad \dot{J}_1 + H_1 \Big|_{z_1} = H_2 \Big|_{z_1}, \\ \dot{V}_1 z_1 &= \dot{V}_2 e^{\alpha z_1} + \dot{V}_3 e^{-\alpha z_1}, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\dot{J}_1 - \frac{1}{\mu_1} \dot{V}_1 = -\frac{\alpha}{\mu_0} (\dot{V}_2 e^{\alpha z_1} - \dot{V}_3 e^{-\alpha z_1}). \quad (21)$$

Граница зон (2–3) имеет координату z_2 и граничные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} \dot{A}_2 \Big|_{z_2} &= \dot{A}_3 \Big|_{z_2}, \quad H_2 \Big|_{z_2} = H_3 \Big|_{z_2}, \\ \dot{V}_2 e^{\alpha z_2} + \dot{V}_3 e^{-\alpha z_2} &= \dot{V}_4 e^{\beta_3 z_2} + \dot{V}_5 e^{-\beta_3 z_2}, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\frac{\alpha}{\mu_0} (\dot{V}_2 e^{\alpha z_2} - \dot{V}_3 e^{-\alpha z_2}) = \frac{\beta_3}{\mu_3} (\dot{V}_4 e^{\beta_3 z_2} - \dot{V}_5 e^{-\beta_3 z_2}). \quad (23)$$

Граница зон (3–4) имеет координату z_3 и граничные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} \dot{A}_3 \Big|_{z_3} &= \dot{A}_4 \Big|_{z_3}, \quad H_3 \Big|_{z_3} = H_4 \Big|_{z_3}, \\ \dot{V}_4 e^{\beta_3 z_3} + \dot{V}_5 e^{-\beta_3 z_3} &= \dot{V}_6 e^{-\alpha z_3}, \end{aligned} \quad (24)$$

$$-\frac{\beta_3}{\mu_3} (\dot{V}_4 e^{\beta_3 z_3} - \dot{V}_5 e^{-\beta_3 z_3}) = \frac{\alpha}{\mu_0} \dot{V}_6 e^{-\alpha z_3}. \quad (25)$$

Систему уравнений (20–25) запишем в более удобном виде:

$$z_1 \dot{V}_1 - e^{\alpha z_1} \dot{V}_2 - e^{-\alpha z_1} \dot{V}_3 = 0, \quad (26)$$

$$\dot{V}_1 - \alpha \frac{\mu_1}{\mu_0} e^{\alpha z_1} \dot{V}_2 + \alpha \frac{\mu_1}{\mu_0} e^{-\alpha z_1} \dot{V}_3 = \mu_1 \dot{J}_n, \quad (27)$$

$$e^{\alpha z_2} \dot{V}_2 + e^{-\alpha z_2} \dot{V}_3 - e^{\dot{P}_3 z_2} \dot{V}_4 - e^{-\dot{P}_3 z_2} \dot{V}_5 = 0, \quad (28)$$

$$e^{\alpha z_2} \dot{V}_2 - e^{-\alpha z_2} \dot{V}_3 - \frac{\mu_0 \dot{P}_3}{\mu_3 \alpha} e^{\dot{P}_3 z_2} \dot{V}_4 + \frac{\mu_0 \dot{P}_3}{\mu_3 \alpha} e^{-\dot{P}_3 z_2} \dot{V}_5 = 0, \quad (29)$$

$$e^{\dot{P}_3 z_3} \dot{V}_4 + e^{-\dot{P}_3 z_3} \dot{V}_5 - e^{\alpha z_3} \dot{V}_6 = 0, \quad (30)$$

$$\frac{\mu_0 \dot{P}_3}{\mu_3 \alpha} e^{\dot{P}_3 z_3} \dot{V}_4 - \frac{\mu_0 \dot{P}_3}{\mu_3 \alpha} e^{-\dot{P}_3 z_3} \dot{V}_5 + e^{-\alpha z_3} \dot{V}_6 = 0. \quad (31)$$

Система уравнений (26–31) имеет шесть неизвестных $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$. Коэффициенты при неизвестных рассчитываются по исходным данным нагревателя (геометрические размеры, электропроводность и магнитная проницаемость зон расчетной модели). Решив систему уравнений (26–31), найдем значения $\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dot{V}_3, \dot{V}_4, \dot{V}_5$ и \dot{V}_6 , через которые легко находятся все параметры электромагнитного поля модели (см. рис. 2).

В зонах 1 и 3 расчетной модели (см. рис. 2) используются ферромагнитные материалы. Поэтому магнитные проницаемости μ_1 и μ_3 уточняются итерационным путем. Магнитная индукция зоны 1 не зависит от координаты z и находится через вычисленное значение \dot{V}_1 по формулам (9) и (18).

$$\dot{B}_1 = -\dot{V}_1; B_1 = \sqrt{[\operatorname{Re} \dot{B}_1]^2 + [\operatorname{Im} \dot{B}_1]^2}. \quad (32)$$

Магнитная индукция на нижней поверхности зоны 3 при $z = z_2$ находится по (14) и (18).

$$\dot{B}_3 \Big|_{z_2} = \dot{P}_3 (\dot{V}_3 e^{-\dot{P}_3 z_2} - \dot{V}_4 e^{\dot{P}_3 z_2}). \quad (33)$$

Модуль магнитной индукции при $z = z_2$

$$B_3 \Big|_{z_2} = \sqrt{[\operatorname{Re} \dot{B}_3]^2 + [\operatorname{Im} \dot{B}_3]^2}. \quad (34)$$

По значениям B_1 (32) и B_3 (34) уточняются значения μ_1 и μ_3 . Расчет продолжается до тех пор, пока полученные значения B_1 и B_3 будут мало отличаться от предшествующих значений.

Мощность, передаваемая от катушки нагревателя к обсадной трубе, называется электромагнитной. Эту мощность проще всего определить через линейную токовую нагрузку и напряженность электрического поля на границе зон 1 и 2 расчетной модели (см. рис. 2):

$$\dot{S}_{эм} = -b \int_0^L \dot{E}_1 J_{л}^* dx, \quad (35)$$

где \dot{E}_1 – напряженность электрического поля на границе зон 1 и 2, b – длина окружности обсадной трубы.

Значение E_1 получим из (2), (9), (16):

$$\dot{E}_1 = -j\omega \dot{V}_{1z_1} \cdot \sin(\alpha x) e^{j\omega t}. \quad (36)$$

Подставив это значение \dot{E}_1 в (35) и выполнив интегрирование, получим электромагнитную мощность нагревателя при неравномерном распределении магнитного поля по оси x :

$$\dot{S}_{эм} = j\omega \dot{V}_{1z_1} J_{л} b L \frac{2}{\pi}. \quad (37)$$

Активная реактивная и полная мощность нагревателя вычисляются по формулам:

$$P_{эм} = \text{Re} \dot{S}_{эм}, \quad Q_{эм} = \text{Im} \dot{S}_{эм}, \quad S_{эм} = \sqrt{P_{эм}^2 + Q_{эм}^2}. \quad (38)$$

Сопротивления, соответствующие электромагнитной мощности,

$$R_{эм} = \frac{P_{эм}}{I^2}, \quad X_{эм} = \frac{Q_{эм}}{I^2}. \quad (39)$$

Рассмотренная расчетная модель и соответствующий ей метод расчета позволяют определить энергетическую эффективность нагревателя при заданных параметрах нагревателя и обсадной трубы. Погрешность расчета в первую очередь будет зависеть от точности заданных значений магнитной проницаемости и электропроводности материала обсадной трубы. Погрешности, обусловленные допущениями расчетной модели, имеют второстепенное значение.

Библиографический список

1. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти. – М.: Изд-во РГУ нефти и газа, 2007. – 826 с.
2. Мищенков И.С. Воздействие на нефтяные залежи и призабойные зоны продуктивных пластов / Пермский политехн. ин-т. – Пермь, 1974. – 128 с.
3. Муслимов Р.Х. Современные методы повышения нефтеизвлечения. – Казань: Фэн, 2004. – 582 с.
4. Справочник мастера по ремонту нефтегазового технологического оборудования. – М.: Инфра-Инженерия, 2008. – 576 с.
5. Справочное руководство по проектированию разработки и эксплуатации нефтяных месторождений. Добыча нефти. – М.: Альянс, 2007. – 455 с.
6. Установки индукционного нагрева. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 272 с.
7. Кувалдин А.Б. Индукционный нагрев магнитной стали на промышленной частоте. – М.: Изд-во ВИНТИ, 1976. – 83 с.
8. Кувалдин А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 198 с.
9. Огарков Е.М. Квазитрехмерная теория линейных асинхронных двигателей. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2003. – 240 с.
10. Брынский Е.А., Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Электромагнитные поля в электрических машинах. – Л.: Энергия, 1979. – 476 с.

References

1. Mishchenko I.T. Skvazhinnaia dobycha nefiti [Downhole oil production]. Moscow: Rossiiskii gosudarstvennyi universitet nefiti i gaza, 2007. 826 p.
2. Mishchenkov I.S. Vozdeistvie na neftyanye zalezhi i prizaboinye zony produktivnykh plastov [The impact on the oil deposit and bottomhole zone of productive strata]. Permskii politekhnicheskii institut, 1974. 128 p.
3. Muslimov R.Kh. Sovremennye metody povysheniia nefteizvlecheniia [Modern methods of enhanced oil recovery]. Kazan': Fen, 2004. 582 p.
4. Spravochnik мастера по ремонту нефтегазового технологического оборудования [Oil and gas production equipment repairer guide]. Moscow: Infra-Inzheneriia, 2008. 576 p.
5. Spravochnoe rukovodstvo po proektirovaniu razrabotki i ekspluatatsii neftyanykh mestorozhdenii. Dobycha nefiti [Reference manual for

the oil deposits development and operation design. Oil extraction]. Moscow: Al'ians, 2007. 455 p.

6. Ustanovki induktsionnogo nagreva [Induction heating installations]. Leningrad: Energoizdat, 1981. 272 p.

7. Kuvaldin A.B. Induktsionnyi nagrev magnitnoi stali na promyshlennoi chastote [Induction heating of the magnetic steel on the industrial frequency]. Moscow: Vserossiiskii institut nauchnoi i tekhnicheskoi informatsii, 1976. 83 p.

8. Kuvaldin A.B. Induktsionnyi nagrev ferromagnitnoi stali [Induction heating of ferromagnetic steel]. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 198 p.

9. Ogarkov E.M. Kvazitrehmernaia teoriia lineinykh asinkhronnykh dvigatelei [Quasi-three-dimensional theory of linear induction motors]. Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2003. 240 p.

10. Brynskii E.A., Danilevich Ia.B., Iakovlev V.I. Elektromagnitnye polia v elektricheskikh mashinakh [Electromagnetic fields in electric machines]. Leningrad: Energiia, 1979. 476 p.

Сведения об авторах

Огарков Евгений Матвеевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, профессор кафедры электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: lis@pstu.ac.ru).

Вильданов Евгений Сергеевич (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: vild@polazna.com).

About the authors

Ogarkov Evgeny Matveevich (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Professor at the Department of Electrical Engineering and Electromechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: lis@pstu.ac.ru).

Vildanov Evgeny Sergeevich (Perm, Russian Federation) is a Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: vild@polazna.com).

Получено: 20.02.2016