ИНЖЕНЕРНЫЙ РАСЧЁТ СПИРАЛЬНОГО СВЧ-НАГРЕВАТЕЛЯ ЗАБОЯ НЕФТЯНОЙ СКВАЖИНЫ

ENGINEERING CALCULATION OF HELICAL MICROWAVE HEATER OF THE DOWNHOLE OIL WELLS

И. Ф. Янгиров
Ilgiz F. Yangirov

Уфимский государственный
авиационный технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Aviation
Technical University,
Ufa, Russian Federation

Р. А. Сафиуллин
Ruzil A. Safiullin

Нефтекамский филиал
Башкирского государственного
университета,
г. Нефтекамск,
Российская Федерация

Neftekamsk Branch
of Bashkir State University,
Neftekamsk, Russian Federation

В условиях Крайнего Севера и Заполярья проведение геодезических и буровых работ является очень затратным, трудоёмким и требует создания новых конструкций различных дополнительных оборудования, например различных нагревателей, способных сохранять реологические свойства извлекаемой нефти из пластов. Как показали исследования технологических процессов, для усиления нефтеотдачи пласта с высоковязкой нефтью и повышения производительности скважин прогрев забоя скважины является одним из эффективных методов в теплоэнергетике и нефтегазовом деле. Литературный анализ научных исследований в данной области показал, что при нагреве забоя скважины активно используются индукционные нагреватели соленоидного типа. Основным недостатком при проектировании и исследовании данных конструкций является то, что в них рассчитываются только электромагнитные характеристики, в отрыве от тепловых, а сами конструкции изделий являются материалоёмкими. Также данные индукторные устройства могут привести к коротким замыканиям внутри металлической обсадной трубы.

В статье представлена модель линейного асинхронного спирального СВЧ-нагревателя (СН) забоя нефтяной скважины на базе разработанной новой конструкции. Разработанная конструкция с её теоретическими выкладками и положениями может быть использована в машиностроении, теплоэнергетике и в нефтегазовом деле. От известных методов и конструкций предлагаемая модель отличается равномерностью нагрева забоя скважины за счёт подвижности спиральной конструкции по объёму изделия.

Это обусловлено тем, что 95 % тепловой энергии выделяется в обсадной трубе и идёт непосредственно на нагрев забоя скважины. Точность расчётов по предлагаемой модели, в первую очередь, зависит от точности исходных данных по электропроводности и магнитной проницаемости материала обсадной трубы. Поэтому данная модель СН сохраняет в себе потенциал крайне энергоэффективного метода нагрева различных материалов.

In the conditions of the Far North and the Arctic, conducting geodetic and drilling operations is very expensive, time-consuming and requires the creation of new designs of various additional equipment, for example, various heaters, capable of preserving the rheological properties of the recovered oil from the reservoirs. Studies of technological processes have shown, that in order to enhance oil recovery from highly viscous oil and increase well productivity, heating the bottom of a well is one of the

Ключевые слова

спиральная антенна;
СВЧ-нагреватель;
токи высокой частоты;
обсадная труба; магнетрон

Key words

spiral antenna;
microwave heater; high frequency
currents; casing pipe; magnetron

effective methods in the power industry and oil and gas business. A literature analysis of scientific research in this field has shown that when heating the bottom of a well, induction heaters of the solenoid type are actively used. The main drawback in the design and study of these structures is that they only calculate electromagnetic characteristics, in isolation from the thermal, and the product structures themselves are material-intensive. Also, these induction devices can lead to short circuits inside the metal casing.

The article presents the model of linear asynchronous spiral microwave heater (SHF) of oil well bottom on the basis of the developed new design. The developed design with its theoretical calculations and provisions can be used in mechanical engineering, heat power engineering and oil and gas business. The proposed model differs from the known methods and structures by uneven heating of the well bottom due to the mobility of the spiral structure along the volume of the product.

This is due to the fact that 95 % of the thermal energy is released in the casing and goes directly to heating the bottom of the well. The accuracy of the calculations according to the proposed model primarily depends on the accuracy of the initial data on the electrical conductivity and magnetic permeability of the casing material. Therefore, this SHF model retains the potential of an extremely energy-efficient method of heating various materials.

Введение

В условиях Крайнего Севера и Заполярья проведение геодезических и буровых работ является очень затратным, трудоёмким и требует создания новых конструкций различных дополнительных оборудования, например различных нагревателей, способных сохранять реологические свойства извлекаемой нефти из пластов. Как показали исследования технологических процессов, для усиления нефтеотдачи пласта с высоковязкой нефтью и повышения производительности скважин прогрев забоя скважины является одним из эффективных методов в теплоэнергетике и нефтегазовом деле. Литературный анализ научных исследований в данной области показал, что при нагреве забоя скважины активно используются индукционные нагреватели соленоидного типа [1]. Основным недостатком при проектировании и исследовании данных конструкций является то, что в них рассчитываются только электромагнитные характеристики, в отрыве от тепловых, а сами конструкции изделий являются материалоёмкими. Также данные индукторные устройства могут привести к коротким замыканиям внутри металлической обсадной трубы.

Постановка задачи

Согласно поставленной задаче, рассмотрим конструкцию линейного асинхронного спирального СВЧ-нагревателя (СНН) забоя нефтяной скважины на базе разработанной новой модели. В ней имеется основной модуль — это спиральный подвижной СВЧ-излучатель радиоволн сверхвысокой частоты,

который создаёт направленные вихревые электромагнитные токи, приводящие к нагреву забоя металлической скважины. Если сравнить традиционные системы нагрева, то в отличие от них, тепло, создаваемое СВЧ-нагревом, не поступает в обход нагрева окружающего пространства и теплоизоляции в нагреваемом материале, а может напрямую подключиться к нагреву материала металлической скважины. Это связано с преобразованием электромагнитной энергии в тепловую в связи с электромагнитными свойствами теплового излучения и зависит от материала скважины, температуры и частоты.

Для создания переменных пульсирующих и импульсных магнитных полей в электротехнике, радиотехнике используются антенны различной конфигурации, выполненные из различных материалов [2]. Рассмотрим СВЧ-нагреватель спиральной формы из изолированного рулона-катушки и внутренний магнетрон (рисунок 1).

Основное свойство спиральных антенн заключается в том, что она обладает широким диапазоном частот, круговой поляризацией и чисто активным сопротивлением, что фактически нивелирует задачу согласования.

Принцип работы СНН заключается в следующих этапах:

1. Магнетрон-генератор создаёт токи сверхвысокой частоты (СВЧ);
2. Система управления направляет эти токи на спиральную антенну;
3. Спиральная катушка-антенна, находящаяся непосредственно в поле переменного

1 — обсадная металлическая труба;
2 — призабойное пространство нефтяной скважины; 3 — жаропрочный стеклянный корпус со встроенным магнетроном 4; 5 — спиральная катушка-излучатель

Рисунок 1. Спиральный СВЧ-нагреватель

магнитного поля, излучает вихревую электромагнитную волну (ВЭМВ) в призабойное пространство обсадной скважины;

4. Отражающее зеркало и кольцо фокусируют ВЭМВ;

5. Под воздействием ВЭМВ происходит нагрев пространства обсадной скважины.

Как известно, между обсадной трубой и корпусом высокочастотного излучателя находится смесь нефтесодержащей скважинной жидкости, химических реагентов, смолопарафиновых и глиняных веществ. Это затрудняет передачу тепла от корпуса нагревателя к обсадной трубе и призабойному пространству. Электронагреватели с высокотемпературными нагревательными элементами всё тепло отдают скважинной смеси. При этом большая часть тепла уносится скважинной жидкостью, а до обсадной трубы и призабойного пространства доходит лишь малая её часть. Поэтому такие нагреватели малоэффективны при нагреве забоя и призабойного пространства скважины. Смесь нефтесодержащей скважинной жидкости является прозрачной для СВЧ-нагревателя, а так как немагнитный зазор между корпусом нагревателя и обсадной трубой достигает 10 мм, поэтому здесь следует применять СВЧ-нагреватель, показанный на рисунке 1. СВЧ-нагреватели лучше подходят для нагрева забоя скважины, так как ВЭМВ, вырабатываемая спиральной катушкой-антенной, передаёт полностью тепловой поток внутрь материала обсадной трубы с помощью электромагнитного поля.

Основные уравнения

Электромагнитные характеристики материалов будем описывать коэффициентами комплексной диэлектрической и магнитной проницаемостей, для которых выполняются

$$\varepsilon_{\text{рез}} = \varepsilon_0(\varepsilon_R - j\varepsilon_{\text{Im}}) = \varepsilon_0\varepsilon_a, \quad (1)$$

$$\mu_{\text{рез}} = \mu_0(\mu_R - j\mu_{\text{Im}}) = \mu_0\mu_a. \quad (2)$$

Основным фактором преобразования энергии электромагнитной волны в тепловую является реактивная составляющая диэлектрической константы $\varepsilon_R = \tan \delta \cdot \varepsilon_{\text{Im}}$ и коэффициент потерь $\tan \delta = \varepsilon_R / \varepsilon_{\text{Im}}$, где $\varepsilon_{\text{рез}} = \varepsilon_0\varepsilon_a$ — комплексная диэлектрическая константа; $\mu_{\text{рез}} = \mu_0\mu_a$ — комплексная магнитная проницаемость; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ A} \cdot \text{s} / \text{V} \cdot \text{m}$ — электрическая постоянная; $\mu_0 = 12,57 \cdot 10^{-12} \text{ V} \cdot \text{s} / \text{A} \cdot \text{m}$ — магнитная постоянная; ε_R — действительная часть диэлектрической константы; μ_R — действительная часть магнитной константы; ε_{Im} — реактивная часть диэлектрической константы; μ_{Im} — реактивная часть магнитной константы; ε_a — относительная диэлектрическая проницаемость; μ_a — относительная магнитная проницаемость; $\tan \delta$ — фактор потерь; δ — угол потерь.

Запишем основные дифференциальные уравнения электродинамики Максвелла для описания электромагнитных волн:

$$\text{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \sigma \vec{E} + \vec{j}_{\text{пров}}, \quad (3)$$

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t},$$

где $\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}$ — напряжённость и индукция электрического поля; $\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$ — индукция и напряжённость магнитного поля; σ , t , $j_{\text{пров}}$ — поверхностная плотность заряда, время и токи проводимости.

Из формул (3) следуют характеристики электромагнитного поля, такие как электрическая и магнитная энергии, описанные Максвеллом:

$$W_{\text{э}} = \int_V \frac{(\vec{E}, \vec{D})}{2} dV, \quad W_{\text{м}} = \int_V \frac{(\vec{H}, \vec{B})}{2} dV, \quad (4)$$

где V — объём пространства, в котором распространяется электромагнитная волна, а подынтегральные выражения характеризуют плотности энергии электрического и магнитного полей.

После упрощений формул (3), (4) с учётом формул (1) и (2) для ВЭМВ получим дифференциальные уравнения Гельмгольца, которые являются основой СВЧ-излучателей:

$$\nabla^2 E(\vec{r}) = \omega^2 \cdot \mu_{\text{рез}} \cdot \varepsilon_{\text{рез}} \cdot \vec{E}(\vec{r}),$$

$$\nabla^2 H(\vec{r}) = \omega^2 \cdot \mu_{\text{рез}} \cdot \varepsilon_{\text{рез}} \cdot \vec{H}(\vec{r}). \quad (5)$$

Излучаемая СВЧ-нагревателем энергия электромагнитных волн определяется уравнениями Максвелла (3), из которых следует формула средней по времени мощности излучения или переноса энергии электромагнитной волной по теореме Умова-Пойнтинга в частотном диапазоне:

$$P_{\text{изл}} = \frac{1}{2} \int_S [\vec{E}, \vec{H}] \cdot d\vec{S} = \frac{1}{2} \int_S P dS. \quad (6)$$

Теорема Умова-Пойнтинга означает, что проникаемая в огибающую поверхность S средняя энергия РИЗЛ, следуя от модуля и фазы, зависит от амплитуды, распределения и соответствующей фазы электрического и магнитного полей. Преобразование поверхностного интеграла в уравнении (6) согласно теореме Гаусса в интеграл по объему приводит к определению потери активной энергии вследствие конечной проводимости среды, потерь на переполяризацию и перемангничивание окружающей среды, т.е. потери мощности:

$$P_{\text{л}} = \frac{\sigma}{2} \int_V |\vec{E}|^2 dV + \frac{\omega}{2} \int_V (\varepsilon_{\text{лм}} |\vec{E}|^2 + \mu_{\text{лм}} |\vec{H}|^2) dV$$

или
$$P_{\text{л}} = 2\omega\varepsilon_0 \iiint_V \varepsilon_{\text{лм}} E^2 dV. \quad (7)$$

Формула (7) выражает закон Джоуля-Ленца, из которого можно получить 3D-источник нагрева плотности распределе-

Рисунок 2. Трехмерная диаграмма направленности на частоте 0,8 ГГц

Рассчитанные результаты показывают, что полученные параметры и характеристики спиральной антенны удовлетворяют поставленным требованиям. Например, на частоте 800 МГц она имеет эллиптическую поляризацию с заданным коэффициентом эллиптичности в секторе углов $\pm 90^\circ$.

ния электромагнитного поля в немагнитных и намагничиваемых материалах [3].

Результаты построенной модели.

Во время разработки установок СВЧ-нагрева решающим является распределение электромагнитного поля, но наряду с излучением электромагнитной энергии также играют важную роль термические процессы. Для экспериментального моделирования ССН по методу конечных элементов рассмотрим цилиндрическую СВЧ-камеру. Для транспортировки СВЧ-мощности от магнетрона в спиральный аппликатор применяется открытый волновод. Магнетрон СВЧ-камеры расположен сзади зеркального покрытия, который вместе с пластинкой фокусирует ВЭМВ в нужном направлении. Корпус аппликатора состоит из многослойного стального цилиндра, соразмерного диаметру обсадной скважины.

На рисунке 2 представлен результат расчета спиральной антенны на частоте 0,8 ГГц по формуле (5) в программном пакете MatLab. Коэффициент стоячей волны изменялся от 1,95 до 3,5 на всех заданных частотах.

На рисунке 3 приведены диаграммы коэффициента эллиптичности (вычисленного как отношение большой полуоси эллипса поляризации к малой) в меридиональной плоскости, рассчитанные для углов наблюдения $\varphi = \pm 90^\circ$.

Рисунок 3. Диаграммы коэффициента эллиптичности для частоты 800 МГц

Таким образом, в ходе работы была спроектирована спиральная антенна, работающая на частоте 0,8 ГГц. Сектор углов одновременного обзора антенны составляет не менее $\pm 65^\circ$, коэффициент стоячей волны не превышает 3,5 во всем диапазоне частот.

Рассмотрим реализацию данной установки методом конечных элементов с помощью компьютеризованного программного пакета Solidworks. Рисунок 4 показывает электромагнитное распределение источника нагрева, т.е. плотности напряженности поля в 3D модели. Здесь электромагнитное поле создано в цилиндрической СВЧ-камере, который имеет продольное расположение волновода.

Так как обсадная металлическая труба нагревается одновременно по всему объему, то во внутренней части образуется высокая температура. В данном случае распределение температуры является противоположным по

отношению к традиционному нагреву. С течением времени тепло с внутренней части трубы начинает накаливаться наружу и приобретает необходимую температуру нагрева.

На рисунке 5 представлена первоначальная плотность распределения температуры СВЧ-излучения.

По формуле (5) были рассчитаны плотность распределения источника нагрева в данной модели. Как видно из рисунков 5 и 6, первоначальный нагрев происходит внутри керамической камеры, а затем распространяется в призабойное пространство трубы.

Рисунок 4. Начальное распределение электрического поля вблизи спиральной катушки

Рисунок 5. Первоначальное распределение температуры возле катушки

Рисунок 6. Плотность распределения источника нагрева

Скоростью распространения СВЧ-излучения является скорость света в вакууме или в воздухе. Если СВЧ-источник включен, то он непосредственно присутствует в нагреваемой металлической трубе и сразу же начинается преобразование внутренней энергии. Например, неполярные материалы (например воздух, тефлон, кварцевое стекло) не могут преобразовывать энергию, и, тем самым, их не нагревают. СВЧ проникают через эти материалы, но преобразования энергии не происходит. В общем случае нагреваемый ма-

териал, который в состоянии провести преобразование энергии, рассматривают в качестве «нагревателей», так как материал сам по себе представляет источник нагрева. Жаропрочный стеклянный зеркальный корпус печи (СВЧ-камера) с фокусирующей пластинкой служит для того, чтобы направлять СВЧ-излучение на материал.

Проведём тепловой расчёт данной модели. Для этого рассмотрим расчётный участок забоя скважины, находящийся под воздействием СВЧ-нагревателя [5–7].

Рисунок 7. Представительный элемент забоя скважины

Электродвижущая сила (ЭДС), наводимая в контуре, равна:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{dBs}{dt} = -s \frac{dB}{dt} = -2\pi\Delta_T l_T \frac{dB}{dt}. \quad (8)$$

Представительный элемент скважины имеет сопротивление участка:

$$R = \rho \frac{l_T}{s} = \rho \frac{2\pi R_T}{2\pi\Delta_T l_T} = \rho \frac{R_T}{\Delta_T l_T}, \quad (9)$$

где ρ — удельное сопротивление участка материала трубы; $\frac{R_T}{\Delta_T l_T}$ — радиус, толщина и длина обрабатываемого участка соответственно (рисунок 7).

В результате образуется поверхностный ток (вихревой короткозамкнутый), проникающий в скважину и приводящий к его нагреву:

$$I_T = e/R = e \frac{\Delta_T l_T}{\rho R_T} = -2\pi\Delta_T l_T \frac{dB}{dt} \cdot \frac{\Delta_T l_T}{\rho R_T} = \frac{-2\pi\Delta_T^2 l_T^2}{\rho R_T} \cdot \frac{dB}{dt}. \quad (10)$$

Как известно, в соленоидальных системах переменный магнитный поток проникает только на определённую глубину металлической скважины. Например, чем меньше частота переменного электрического тока, тем больше глубина проникновения электромагнитных волн. Вихревой же ток проникает на всю глубину скважины, и тепловая энергия, выделяемая нагревательным элементом, определяется из уравнения Джоуля-Ленца:

$$Q = I_T^2 R \Delta_T = \left(\frac{-2\pi\Delta_T^2 l_T^2}{\rho R_T} \cdot \frac{dB}{dt} \right)^2 \cdot \rho \frac{R_T}{\Delta_T l_T} \cdot \Delta_T = \frac{4\pi^2 \Delta_T^4 l_T^4}{\rho^2 R_T^2} \cdot \rho \frac{R_T}{\Delta_T l_T} \cdot \Delta_T \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 = \frac{4\pi^2 \Delta_T^3 l_T^3 \Delta_T}{\rho R_T} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 = \frac{4\pi^2}{\rho} \cdot \frac{\Delta_T^3 l_T^3}{R_T} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2. \quad (11)$$

При этом выделяется количество теплоты, которое определяется формулой:

$$Q_c = cm\Delta T = c\rho_T 2\pi\Delta_T l_T \Delta T, \quad (12)$$

где c — теплопроводность материала; m — масса обрабатываемой поверхности; ΔT — температура обработки.

Приравняв формулу количества теплоты к величине переменного магнитного поля, получим формулу [3–6]:

$$c\rho_T 2\pi\Delta_T l_T \Delta T = \frac{4\pi^2}{\rho} \cdot \frac{\Delta_T^3 l_T^3}{R_T} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \cdot t,$$

$$\Delta T = \frac{4\pi^2}{\rho} \cdot \frac{\Delta_T^3 l_T^3}{R_T} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \cdot t / c\rho_T 2\pi\Delta_T l_T, \quad (13)$$

где ρ_T — плотность материала трубы; t — время обработки.

Отсюда можно определить мгновенное значение температуры, которое следует из уравнения Лапласа:

$$\Delta T = \frac{2\pi}{c\rho_T \rho} \cdot \frac{\Delta_T^2 l_T^2}{R_T} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \cdot t. \quad (14)$$

Переменное магнитное поле порождается изменяющимся электрическим:

$$\begin{aligned} \frac{dB}{dt} &= \frac{d}{dt} \left[B\delta_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau_1} \nu \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} B_m \sin \omega t + \frac{1}{2} B_m \sin \left(\omega t - 2\frac{\pi x}{\tau_1} \nu \right) \right] = \\ &= \omega B \delta_m \cos \left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau_1} \nu \right) + \frac{1}{2} \omega B_m \cos \omega t + \\ &\quad + \frac{1}{2} \omega B_m \cos \left(\omega t - 2\frac{\pi x}{\tau_1} \nu \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Это позволяет определить действующее значение квадрата индукции МП:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 &\approx \omega^2 B^2 \delta_m^2 \cos^2 \left(\omega t - \frac{2\pi x}{\tau_1} \nu \right); \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{dB}{dt} \right) &= \frac{\sqrt{2}}{2} 4\pi^2 f^2 B \delta_m = 2\sqrt{2} \pi^2 f^2 B^2 \delta_m. \end{aligned} \quad (16)$$

Отсюда получим выражение для действующего значения поверхностной температуры забоя скважины:

$$\begin{aligned} \Delta T_\theta &= \frac{2\pi}{c\rho_T \rho} \cdot \frac{\Delta_T^2 l_T^2}{R_T} \cdot 2\sqrt{2} \pi^2 B^2 \delta_m \cdot \Delta t; \\ \Delta T_\theta &= \frac{4\sqrt{2} \pi^3}{c\rho_T \rho} \cdot \frac{\Delta_T^2 l_T^2}{R_T} \cdot B^2 \delta_m \cdot \Delta t. \end{aligned} \quad (17)$$

В итоге можно вычислить КПД установки ССН:

$$\mu = Q / UI_T \cdot 100 \, \%.$$

Выводы

Таким образом, созданная математическая модель ССН, полученные расчётные формулы позволяют исследовать технологический процесс нагрева забоя скважины, расширяют возможности проектирования аналогичных конструкций по требованиям технологий производства и оптимизационному проектированию.

Это обусловлено тем, что 95 % тепловой энергии выделяется в обсадной трубе и идёт непосредственно на нагрев забоя скважины. Точность расчётов по предлагаемой модели, в первую очередь, зависит от точности исход-

ных данных по электропроводности и магнитной проницаемости материала обсадной трубы. Поэтому данная модель ССН сохраняет в себе потенциал крайне энергоэффективного метода нагрева различных материалов.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Муслимов Р.Х. Современные методы повышения нефтеизвлечения: проектирование, оптимизация и оценка эффективности. Казань: ФЭН, 2005. 688 с.
2. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти. М.: РГУ нефти и газа, 2007. 826 с.
3. Пальчиков Е.И., Рябчун А.М., Красников И.Ю. Модифицированный спиральный генератор высоких напряжений для питания импульсного рентгеновского аппарата // Журнал технической физики. 2012. Т. 82. Вып. 2. С. 136–147.
4. Сафиуллин Р.А., Янгиров И.Ф., Максудов Д.Ф. Методика инженерного расчёта электропружинного привода // Электротехнические комплексы и системы: матер. всеросс. науч.-практ. конф. / Отв. ред. Ф.Р. Исмагилов. Уфа: РИК УГАТУ, 2015. С. 278–284.
5. Антониади Д.Г., Гарушев А.Р., Шиханов В.Г. Настольная книга по термическим методам добычи нефти. Краснодар: Советская Кубань, 2000. 464 с.
6. Немцов М.В. Справочник по расчёту параметров индуктивности. М.: Энергоатомиздат, 1989. 192 с.
7. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. 417 с.

REFERENCES

1. Muslimov R.Kh. *Sovremennyye metody povysheniya nefteizvlecheniya: proektirovanie, optimizatsiya i otsenka effektivnosti* [Modern Methods of Oil Recovery Enhancement: Design, Optimization and Efficiency Evaluation]. Kazan, FEN Publ., 2005. 688 p. [in Russian].

2. Mishchenko I.T. *Skvazhinnaya dobycha nefi* [Downhole Oil Production]. Moscow, RGU nefi i gaza Publ., 2007. 826 p. [in Russian].
3. Palchikov E.I., Ryabchun A.M., Krasnikov I.Yu. *Modifitsirovannyi spiral'nyi generator vysokikh napyazhenii dlya pitaniya impul'nogo rentgenovskogo apparata* [Modified High-Voltage Helical Generator to Supply Pulsed X-Ray Machine]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki — Technical Physics*, 2012, Vol. 82, Issue 2, pp. 136–147. [in Russian].
4. Safiullin R.A., Yangirov I.F., Maksudov D.F. *Metodika inzhenernogo rascheta elektropuzhinnogo privoda* [Methodology of Engineering Calculation of an Electric Spring Drive]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy»* [Materials of the All-Russian Scientific-Practical Conference «Electrotechnical Complexes and Systems»]. Ed. F.R. Ismagilov. Ufa, RIK UGATU Publ., 2015, pp. 278–284. [in Russian].
5. Antoniadis D.G., Garushev A.R., Shikhanov V.G. *Nastol'naya kniga po termicheskim metodam dobychi nefi* [Handbook of Thermal Methods of Oil Production]. Krasnodar, Sovetskaya Kuban Publ., 2000. 464 p. [in Russian].
6. Nemtsov M.V. *Spravochnik po raschetu parametrov induktivnosti* [Guide to the Calculation of Inductance Parameters]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 192 p. [in Russian].
7. Vol'dek A.I. *Elektricheskie mashiny* [Electric Machine]. Leningrad, Energiya Publ., 1974. 417 p. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Янгиров Ильгиз Флюзович, д-р техн. наук, доцент кафедры электромеханики, УГАТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Ilgiz F. Yangirov, Doctor of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electrical Engineering Department, USATU, Ufa, Russian Federation

e-mail: yangirov@yandex.ru

Сафиуллин Рузил Ахнафович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры технических дисциплин, БашГУ, филиал, г. Нефтекамск, Российская Федерация

Ruzil A. Safiullin, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of Technical Disciplines Department, BashSU, Branch, Neftekamsk, Russian Federation

e-mail: savpon@mail.ru