

УДК 621.315.22

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГОННЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НЕФТЕПОГРУЖНОГО КАБЕЛЯ

Глазырин Александр Савельевич^{1,2},
asglazyrin@tpu.ru

Исаев Юсуп Ниязбекович¹,
isaev_yusup@mail.ru

Кладиев Сергей Николаевич¹,
kladiev@tpu.ru

Леонов Андрей Петрович¹,
leonov_ap@tpu.ru

Раков Иван Витальевич³,
rakovivan@live.com

Колесников Станислав Вячеславович¹,
svk3@tpu.ru

Ланграф Сергей Владимирович⁴,
sergeylgrf@gmail.com

Филипас Александр Александрович¹,
filipas@tpu.ru

Копырин Владимир Анатольевич⁵,
kopyrinva@gmail.com

Хамитов Рустам Нуриманович^{6,5},
apple_27@mail.ru

Ковалев Владимир Захарович²,
vz_kovalev@mail.ru

Лавринович Алексей Валериевич⁷,
lavrinovich86@yandex.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Югорский государственный университет,
Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16.

³ ООО Научно-производственное предприятие «Томская электронная компания»,
Россия, 634040, г. Томск, ул. Высоцкого, 33.

⁴ ООО «НПФ Мехатроника-Про»,
Россия, 634021, г. Томск, пр. Фрунзе, 119Е.

⁵ Тюменский индустриальный университет,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

⁶ Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

⁷ Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа,
Россия, 634027, г. Томск, пр. Мира, 72.

Актуальность. Определение основных электрических параметров нефтепогружных кабелей связано с необходимостью создания точных математических моделей станции управления системами – нефтепогружной кабель – погружной электродвигатель, в которых необходимо учитывать волновые процессы в протяженной кабельной линии, возникающие в связи с формой импульсов, генерируемых преобразователями частоты, входящими в состав современных пультов управления. Электрические параметры, такие как линейная емкость и индуктивность, не стандартизированы в технической литературе и не указываются в технических характеристиках производителями кабелей. Однако, очевидно, что создание систем управления и идентификация режимов работы ПЭД требует решения систем дифференциальных уравнений, включающих в качестве параметров заданные характеристики. Кроме того, современные концепции частотного регулирования электродвигателей, в частности погружных, указывают на то, что при работе преобразователей частоты на базе IGBT-транзисторов в сигнале питания ПЭД возникают высокочастотные перенапряжения, приводящие к появлению частичных разрядов в обмотках статора моторов. Этот факт будет усугубляться развитием более сильных полей с увеличением длины кабеля и, соответственно, большим влиянием волновых процессов на форму сигнала, подаваемого на ПЭД.

Цель исследования заключается в разработке методики определения погонных электротехнических параметров нефтепогружного кабеля любых конструкций и используемых материалов.

Методы: методы решения дифференциальных уравнений, полевых задач, численное конечно-элементное моделирование.

Результаты. Разработана методика определения погонных емкостей и погонных индуктивностей жил и брони нефтепогружного кабеля, основанная на решении дифференциальных уравнений для эталонной «справочной» модели и численном моделировании идентичной конструкции в COMSOL Multiphysics® Version 5.5a. Указано, что конечно-элементное моделирование в COMSOL Multiphysics® Version 5.5a корректно и с достаточной точностью (ошибка менее 5 %) совпадает с результатами решения уравнений, приведенных в справочной литературе. Определены погонные значения емкостей и индуктивностей для наиболее распространенных конструкций нефтепогружных кабелей.

Ключевые слова:

Механизированная добыча нефти, нефтепогружной кабель, электрическое поле, электрический потенциал, магнитное поле, векторный магнитный потенциал, уравнение Максвелла, скин-эффект, погружной электродвигатель.

Введение

Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 г. в качестве одной из мер обеспечения энергетической безопасности страны предусматривает «введение в экономический оборот ... трудноизвлекаемых запасов (в том числе баженовской свиты), ... на основе инновационных отечественных технологий и оборудования» [1].

Баженовская свита – крупнейшая в мире нефтеносная формация, располагающаяся в Западной Сибири на площади около одного миллиона км².

По оценкам Роснедр, в баженовской свите содержится 180–360 млрд баррелей извлекаемых запасов, а по мнению специалистов из US EIA (2013 г.), в свите суммарные запасы составляют около 1,2 трлн баррелей нефти, из которых 74 млрд могут быть технически извлекаемыми. Учитывая эти данные, возрастающее внимание к «бажену» легко объяснимо. Несомненно, свою роль здесь сыграла сланцевая революция в США, наглядно показав потенциальные перспективы разработки подобных горизонтов и необходимость создания соответствующих технологических инструментов.

Интерес, проявленный к «бажену» крупнейшими нефтедобывающими компаниями «Сургутнефтегаз», «Роснефть», «РуссНефть», РИТЭК и «Газпром нефть», привел к созданию в Ханты-Мансийском автономном округе (ХМАО) технологического центра «Бажен» [2]. Компанией «Газпром нефть» разработан паспорт федерального проекта «Освоение баженовской свиты в Западной Сибири» [2].

С технологических позиций баженовская свита по своему строению и геомеханическим свойствам пород является полным антиподом основного объекта сланцевой добычи – Среднего Бакена (Северная Дакота, США), на котором отработывались сланцевые технологии [3]. В частности, характерная особенность баженовской свиты – высокие пластовые температу-

ры и давление, осложненные глубиной залегания пластов [4–6, 7–10].

Указанная специфика «бажена» усугубляет проблему надежного и энергоэффективного извлечения продукции из скважины. Основной инструмент здесь – установки электроцентробежных насосов (УЭЦН). По данным ОАО «НК «Роснефть», работа группы из 223 скважин с высокой потребляемой мощностью на «традиционных» месторождениях, из-за тепловых потерь в кабельных линиях, питающих данные УЭЦН, привела к сверхнормативным потерям электроэнергии около 50 млн кВт*ч/год [7]. Эксплуатация УЭЦН в условиях «бажена» очевидно существенно усугубит эту ситуацию. Исправить ее можно только путем построения фундаментальной модели кабельной линии [11, 12], что создаст предпосылки для последующей энергоэффективной оптимизации модели и перехода к промышленной разработке баженовской свиты.

Нефтепогружные кабели (НПК) имеют полимерную изоляцию, медные или алюминиевые токопроводящие жилы, а также оболочку из материалов соответствующего класса нагревостойкости, поверх которых накладывается стальная броня. Кабели для нефтепогружных электронасосов представлены в круглом (К) (рис. 1, а) и плоском (П) (рис. 1, б) исполнении. НПК должен обеспечивать надёжное электроснабжение в условиях воздействия агрессивных факторов, возникающих в скважине в течение всего срока эксплуатации [13].

В задачах проектирования систем управления нефтепогружными двигателями значительной сложностью является моделирование электромагнитных процессов в кабельных линиях [14–17, 18–22].

Известно, что типовые П- и Г-образные электрические схемы замещения кабельных линий в общем виде состоят из погонных значений индуктивности $L_{\text{пог}}$ (Гн/м), сопротивления $r_{\text{пог}}$ (Ом/м), проводимости $g_{\text{пог}}$ (См/м) и ёмкости $C_{\text{пог}}$ (Ф/м).

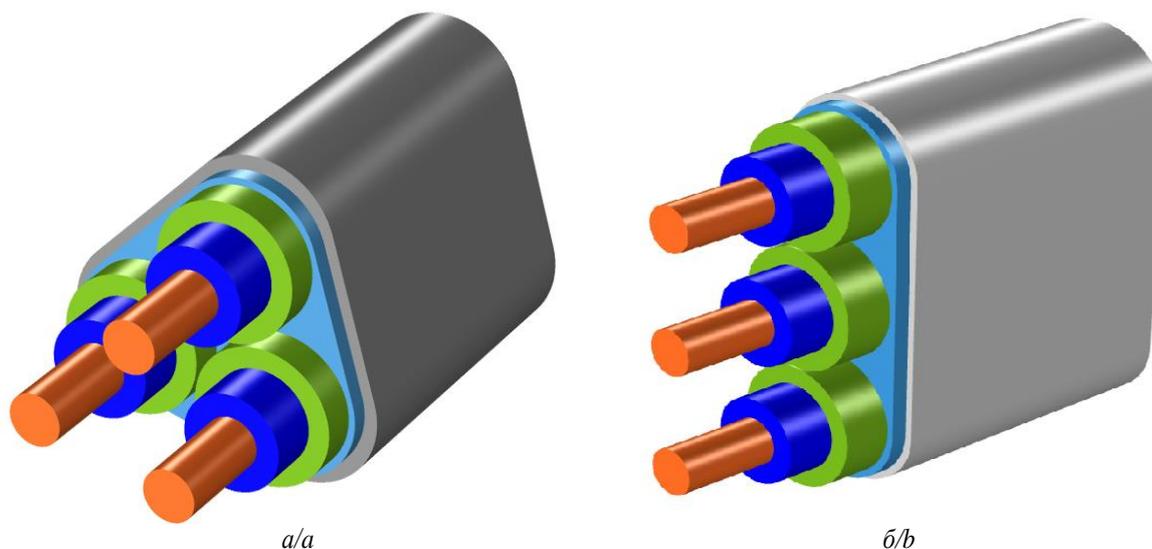


Рис. 1. Кабели для нефтепогружных электронасосов в круглом (К) (а) и плоском (П) (б) исполнении
Fig. 1. Oil submersible cable of round (a) and flat (b) design

Значения проводимости изоляции и сопротивления токопроводящих жил нормированы [18]. Однако определение погонных индуктивностей и погонных ёмкостей конструктивных элементов НПК представляет собой актуальную задачу.

В данной работе на основе методов численного компьютерного моделирования произведён расчёт погонных ёмкостей и погонных индуктивностей токопроводящих жил с учётом эффекта вытеснения токов. Произведено сравнение значений погонных параметров кабеля, полученных по предлагаемой методике, со значениями, полученными на основе известных аналитических выражений и справочных данных.

Описание общего подхода к моделированию

Численное моделирование выполнялось в программном пакете COMSOL Multiphysics® Version 5.5a. Алгоритм проверки результатов, полученных по предлагаемой методике, построен следующим образом:

- проводится решение аналитического уравнения для описанной в справочной литературе [19] геометрии, имеющей в своём составе тот же набор проводящих элементов, что и нефтепогружной кабель – три параллельных проводника, расположенных внутри цилиндрического экрана; пространство между ними заполнено однородным диэлектриком с заранее заданной диэлектрической проницаемостью. Геометрические размеры проводников и экрана соответствуют размерам для кабеля КПБК-90 3×25 и принимаются постоянными по всей длине кабеля;
- описанная выше геометрия, которая является аналитической моделью кабеля с «воздушным» диэлектриком (рис. 2), численно моделируется в COMSOL Multiphysics®;
- значения, полученные решением справочного аналитического уравнения, и значения, полученные при компьютерном моделировании, сравниваются, вычисляется ошибка, делается вывод о корректности численного моделирования.

Описание математической модели для расчета ёмкостей

Составим систему уравнений Максвелла для взаимных ёмкостей элементов кабеля.

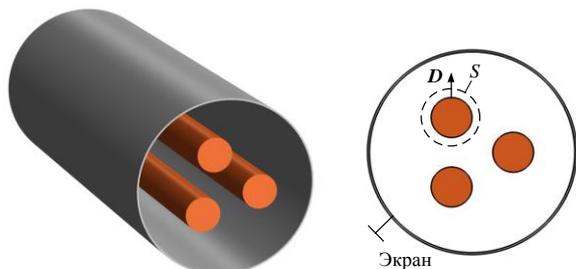


Рис. 2. Аналитическая модель кабеля с «воздушным» диэлектриком

Fig. 2. Analytical cable model with air gap

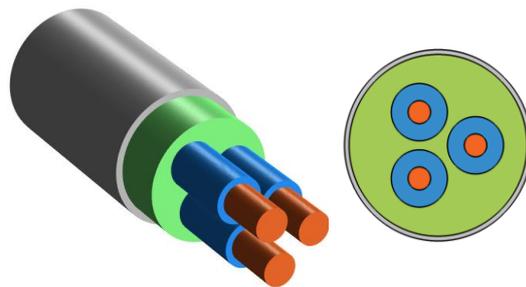


Рис. 3. Аналитическая модель кабеля с двухслойным (с разным значением ϵ) диэлектриком

Fig. 3. Analytical cable model with two-layer dielectric (with different values of ϵ)

Уравнения Максвелла для взаимных ёмкостей:

$$\begin{cases} Q_1 = C_{11}\varphi_1 + C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + C_{13}(\varphi_1 - \varphi_3); \\ Q_2 = C_{21}(\varphi_2 - \varphi_1) + C_{22}\varphi_2 + C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3); \\ Q_3 = C_{31}(\varphi_3 - \varphi_1) + C_{32}(\varphi_3 - \varphi_2) + C_{33}\varphi_3. \end{cases} \quad (1)$$

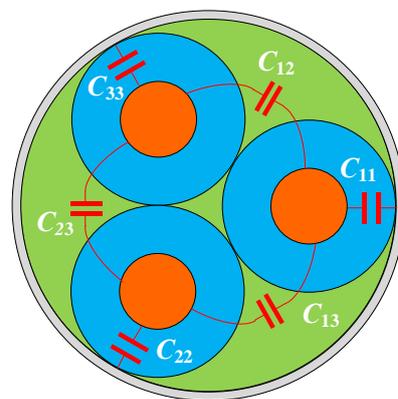


Рис. 4. Распределение ёмкостей в кабеле

Fig. 4. Distribution of capacities in the cable

Из представленной системы уравнений можно видеть, что, когда выполняется условие (рис. 4) $\varphi_3 = \varphi_2 = 0$, $\varphi_1 = 1$ заряды на поверхности электродов равны величине взаимных емкостей $Q_2 = C_{21}$, $Q_3 = C_{31}$ (второе и третье уравнения системы (1), отрицательный знак определяется направлением интегрирования (2)).

Для того чтобы найти заряд Q будем использовать теорему Гаусса, утверждающую, что заряд, образующийся на поверхности электродов, равен поверхностному интегралу от вектора смещения (рис. 2)

$$Q = \oint D dS. \quad (2)$$

Здесь \mathbf{D} – вектор электрического смещения; S – площадь поверхности интегрирования. Для определения вектора смещения \mathbf{D} будем использовать распределение потенциала электростатического поля для конфигурации электродов, представленных на рис. 2. Для этого необходимо решить уравнение Лапласа

$$\Delta\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

с учетом условий на границе раздела сред и краевых условий на поверхности экрана для уравнения (3) имеем, $\varphi=0$ и на поверхности электродов $\varphi_1=1$, $\varphi_2=0$, $\varphi_3=0$. Затем определяется градиент потенциала φ для расчета напряженности электростатического поля \mathbf{E} и вектор электрического смещения \mathbf{D} при известной диэлектрической проницаемости среды ε

$$\mathbf{E} = \text{grad}(\varphi) = \mathbf{i} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad \mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}. \quad (4)$$

Для решения поставленной задачи использовался пакет COMSOL Multiphysics® Version 5.5a. Верификация расчета производилась на справочной аналитической модели, представленной на рис. 2, 3. Результаты расчетов приведены на рис. 5.

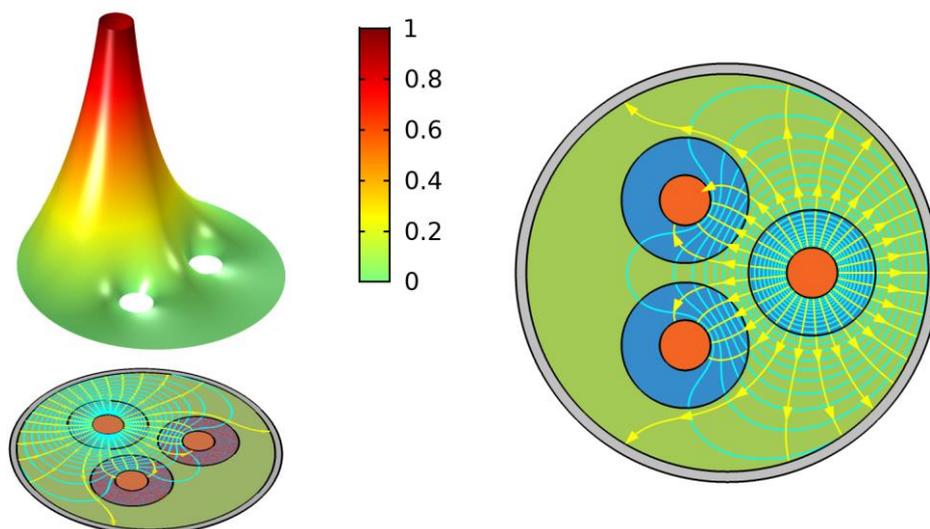


Рис. 5. Конечно-элементная модель. Линии со стрелочками – силовые линии электростатического поля \mathbf{E} , поверхность – распределение потенциала φ в области, ограниченной экраном. Видно, что для потенциалов на электродах выполняется условие $\varphi_3=\varphi_2=0$, $\varphi_1=1$. Справа на рисунке приведена шкала потенциалов. Диэлектрическая проницаемость среды и изоляции считались одинаковыми, $\varepsilon=1$

Fig. 5. FEM-model. Arrowed lines – the lines of force of the electrostatic field \mathbf{E} , the surface – potential φ distribution in the area bounded by the cable screen. It can be seen that the condition $\varphi_3=\varphi_2=0$, $\varphi_1=1$ is satisfied for potentials on the electrodes. The potential scale is shown on the right in the figure. The permittivity was considered to be the same, $\varepsilon=1$

Таблица 1. Расчёт ёмкостей для кабеля с «воздушным» диэлектриком (рис. 2, 3)

Table 1. Calculation of capacitances for cable model with air gap dielectric (Fig. 2, 3)

Геометрические размеры, мм/Geometric dimensions, mm				
Радиус экрана $R=22$ Screen radius $R=22$		Расстояние от центра кабеля до центра жилы $d=0,58$ Distance from the cable center to the core center $d=0,58$		
Идеализированная модель Idealized model	C_{12}	C_{13}	C_{23}	C_{11}
	Ф/м/F/m			
	3.483E-12	3.483E-12	3.483E-12	2.0735E-11
Конечно-элементная модель Finite element model	C_{12}	C_{13}	C_{23}	C_{11}
	Ф/м/F/m			
	3.522E-12	3.522E-12	3.520E-12	2.086E-11
Ошибка/Error, %	1,11	1,11	1,07	0,58

Рассчитаем аналитическое выражение (5) из справочника [19] для трехпроводной линии, расположенной симметрично внутри цилиндрической оболочки (рис. 2). Тот же результат будет справедливым и для рис. 3, если положить все диэлектрические проницаемости равными одинаковой величине.

$$C_{12} = C_{13} = C_{23} \approx \frac{2\pi\varepsilon}{3 \ln \left[\frac{\sqrt{3}d}{a} \cdot \frac{R^2 - d^2}{\sqrt{d^4 + R^4 + R^2 d^2}} \right]} - N, \quad (5)$$

$$N \approx \frac{2\pi\varepsilon}{3 \ln \left\{ \frac{R^3}{3d^2 a} \left[1 - \left(\frac{d}{R} \right)^6 \right] \right\}}$$

Как видно, расхождение значений, полученных аналитическим и конечно-элементным моделированием (табл. 1), составляет менее 2 %.

На рис. 7 приведен результат расчета распределения потенциалов φ и электростатического поля \mathbf{E} , токопроводящая жила с конфигурацией, представленной на рис. 6, для кабеля КПБК-90 3×25, имеющего треугольную поперечную форму. Расчет ёмкостей для кабеля сведен в табл. 2.

Таблица 2. Расчёт ёмкостей для кабеля КПБК-90 3×25

Table 2. Calculation of capacities for cable КПБК-90 3×25

Расчетная модель Computational model	C_{12}	C_{13}	C_{23}	C_{11}
	Ф/м/F/m			
	1.2761E-11	1.2761E-11	1.2761E-11	5.0786E-11

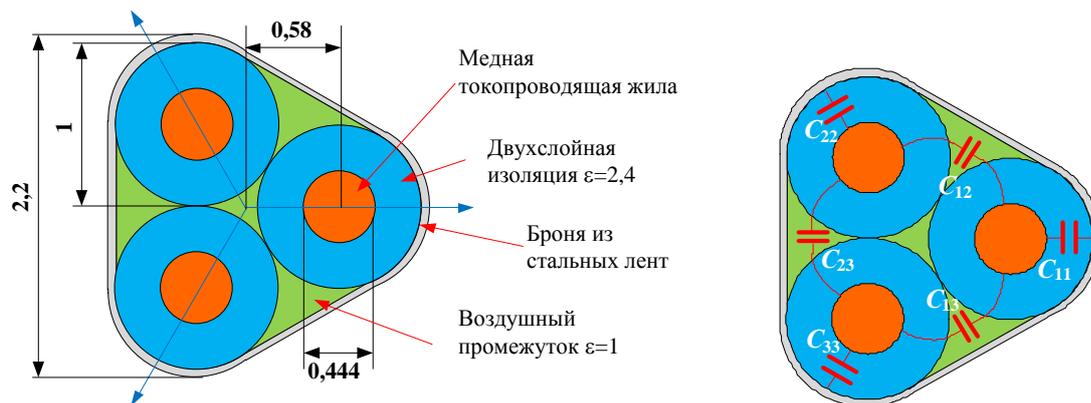


Рис. 6. Моделируемый кабель марки КПБК-90 3×25. Здесь C_{11} , C_{22} , C_{33} – ёмкости между жилами и бронёй, C_{12} , C_{13} , C_{23} – ёмкости между жилами

Fig. 6. Simulated cable KPBK-90 3×25. C_{11} , C_{22} , C_{33} are the capacitances between the cores and the armoring, C_{12} , C_{13} , C_{23} are the capacities between the cores

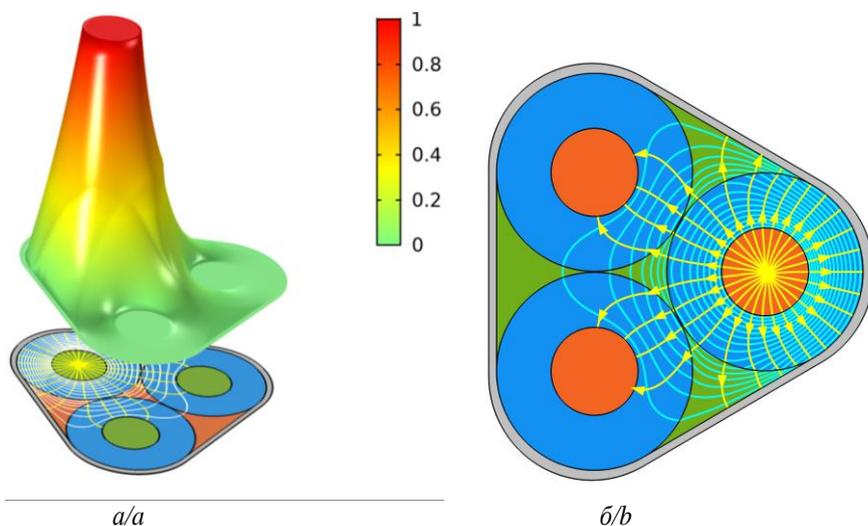


Рис. 7. а) Поверхность – пространственное распределение потенциала φ ; б) распределение потенциала φ и силовых линий E в плоскости

Fig. 7. a) spatial distribution of potential; b) distribution of potential φ and electric field E lines on the plane

Таблица 3. Расчёт ёмкостей для кабеля КПБП-90 3×25
 Table 3. Calculation of capacities for cable KPBP-90 3×25

Расчетная модель Computational model	C_{11}	C_{12}	C_{13}
	Ф/м/Ф/м		
	1.0164E-10	1.9501E-11	9.7672E-15
	C_{21}	C_{22}	C_{23}
	Ф/м/Ф/м		
	1.9501E-11	6.7408E-11	1.9481E-11
	C_{31}	C_{32}	C_{33}
	Ф/м/Ф/м		
	9.7672E-15	1.9481E-11	1.0164E-10

На рис. 9, 10 приведены результат расчета распределения потенциалов φ и электростатического поля E , токопроводящая жила с конфигурацией, представленной на рис. 8, для кабеля КПБК-90 3×25, имеющего плоскую поперечную форму. Расчет ёмкостей для кабеля сведен в табл. 2. На рис. 9 представлено распределение электрических величин φ и E для определения погонных емкостей центральной жилы, а на рис. 10 – распределение электрических величин φ и E для определения погонных емкостей

крайних жил. Результаты расчетов емкостей сведены в табл. 3.

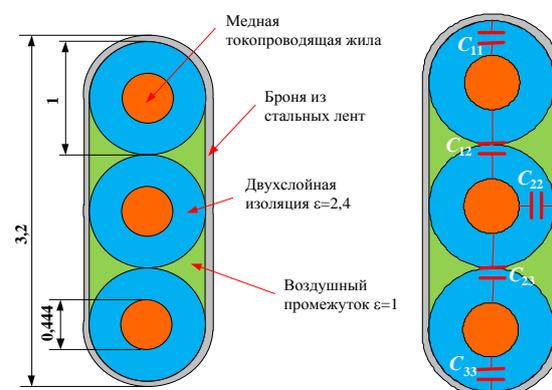


Рис. 8. Моделируемый кабель марки КПБП-90 3×25. Здесь C_{11} , C_{22} , C_{33} – ёмкости между жилами и бронёй; C_{12} , C_{13} , C_{23} – ёмкости между жилами

Fig. 8. Simulated cable KPBP-90 3×25. C_{11} , C_{22} , C_{33} are the capacitances between the cores and the armoring, C_{12} , C_{13} , C_{23} are the capacities between the cores

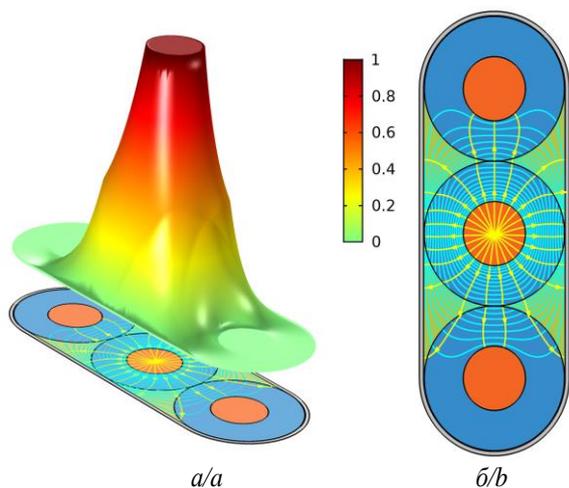


Рис. 9. а) пространственное распределение потенциала φ в нефтепогружном кабеле для определения C_{12} , C_{23} , C_{13} ; б) распределение потенциала и силовых линий \mathbf{E} в нефтепогружном кабеле для определения C_{12} , C_{23} , C_{13}

Fig. 9. a) spatial distribution of the potential in the oil-submersible cable for determining C_{12} , C_{23} , C_{13} ; б) distribution of potential and magnetic field lines in the oil-submersible cable for determining C_{12} , C_{23} , C_{13}

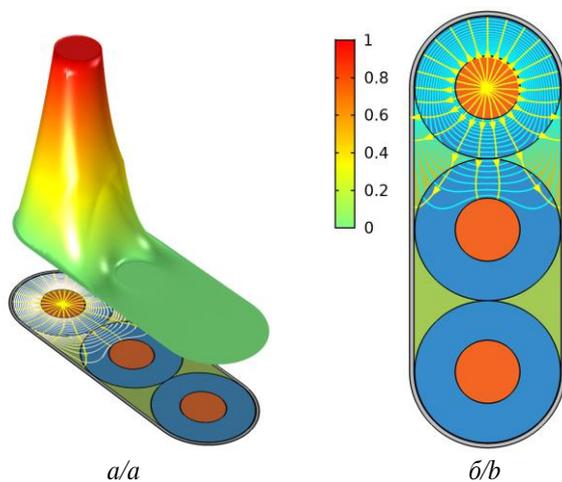


Рис. 10. а) Пространственное распределение потенциала φ в нефтепогружном кабеле для определения C_{11} , C_{22} , C_{33} ; б) распределение потенциала и силовых линий \mathbf{E} в нефтепогружном кабеле для определения C_{11} , C_{22} , C_{33}

Fig. 10. a) spatial distribution of the potential in the oil-submersible cable for determining C_{11} , C_{22} , C_{33} ; б) distribution of potential and magnetic field lines in the oil-submersible cable for determining C_{11} , C_{22} , C_{33}

Описание математической модели для расчета индуктивностей и сопротивления

Оценка скин-эффекта. При подаче высокочастотного напряжения на проводник в нём будут протекать высокочастотные токи, которые порождают явление скин-эффекта и представляют собой распределение плотности тока по сечению проводника таким образом, что оно оказывается выше на периферии проводника, а в центре происходит его ослабление. При этом чем выше частота тока, тем сильнее проявление скин-

эффекта. Проанализируем явление скин-эффекта в проводнике круглого сечения. Рассчитаем распределение тока в проводнике в цилиндрических координатах.

Циркуляции напряженности магнитного и электрического полей описываются уравнением Максвелла:

$$\begin{aligned} \mathbf{rot} \mathbf{H} &= \begin{pmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ H_x & H_y & H_z \end{pmatrix} = \mathbf{i} \left(\frac{\partial}{\partial y} H_z - \frac{\partial}{\partial z} H_y \right) + \\ &+ \mathbf{j} \left(\frac{\partial}{\partial z} H_x - \frac{\partial}{\partial x} H_z \right) + \\ &+ \mathbf{k} \left(\frac{\partial}{\partial x} H_y - \frac{\partial}{\partial y} H_x \right) = \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \\ \mathbf{rot} \mathbf{E} &= \begin{pmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{pmatrix} = \mathbf{i} \left(\frac{\partial}{\partial y} E_z - \frac{\partial}{\partial z} E_y \right) + \\ &+ \mathbf{j} \left(\frac{\partial}{\partial z} E_x - \frac{\partial}{\partial x} E_z \right) + \\ &+ \mathbf{k} \left(\frac{\partial}{\partial x} E_y - \frac{\partial}{\partial y} E_x \right) = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{H}. \end{aligned} \quad (6)$$

Перейдя в частотную область и выполнив операцию взятия ротора первого уравнения (6), получим дифференциальное уравнение:

$$\begin{aligned} \mathbf{rot} \mathbf{E} &= j\omega\mu_0\mu\mathbf{H} \rightarrow \mathbf{rot} \mathbf{J} = \\ &= -j\omega\mu_0\mu\sigma\mathbf{H} \rightarrow \mathbf{rot} \mathbf{rot} \mathbf{J} = -j\omega\mu_0\mu\sigma\mathbf{J} \end{aligned}$$

с учетом уравнения непрерывности $\nabla \mathbf{J} = 0$ получаем уравнения Гельмгольца для расчета распределения плотности тока по сечению проводника

$$\Delta \mathbf{J} + j\omega\mu_0\mu\sigma\mathbf{J} = 0. \quad (7)$$

Для расчета уравнения Гельмгольца (7) авторами использовался COMSOL Multiphysics® Version 5.5a, основанный на методе конечных элементов. Выполнялись следующие краевые условия для данной задачи:

- при заданном полном токе провода $I=1$ А для напряженности магнитного поля \mathbf{H} на краю проводника при $r=R$ выполнялось соотношение:

$$H = \frac{1}{q} \frac{dJ}{dr} = \frac{I}{2\pi R}, \quad q^2 = -j\omega\mu_0\sigma;$$

- при $r=0$ плотность тока J является величиной конечной.

Результаты расчетов приведены на рис. 11.

Наряду с распределением плотности поля вычислялись индуктивность L и сопротивление R провода от частоты f с помощью напряжения проводника U , которое определялось через напряженность электрического поля \mathbf{E} на поверхности проводника

$$\frac{U}{I} = Z = R + j\omega L, \quad \rightarrow R(\omega) = \text{Re} \left(\frac{U}{I} \right), \quad L(\omega) = \text{Im} \left(\frac{U}{\omega I} \right).$$

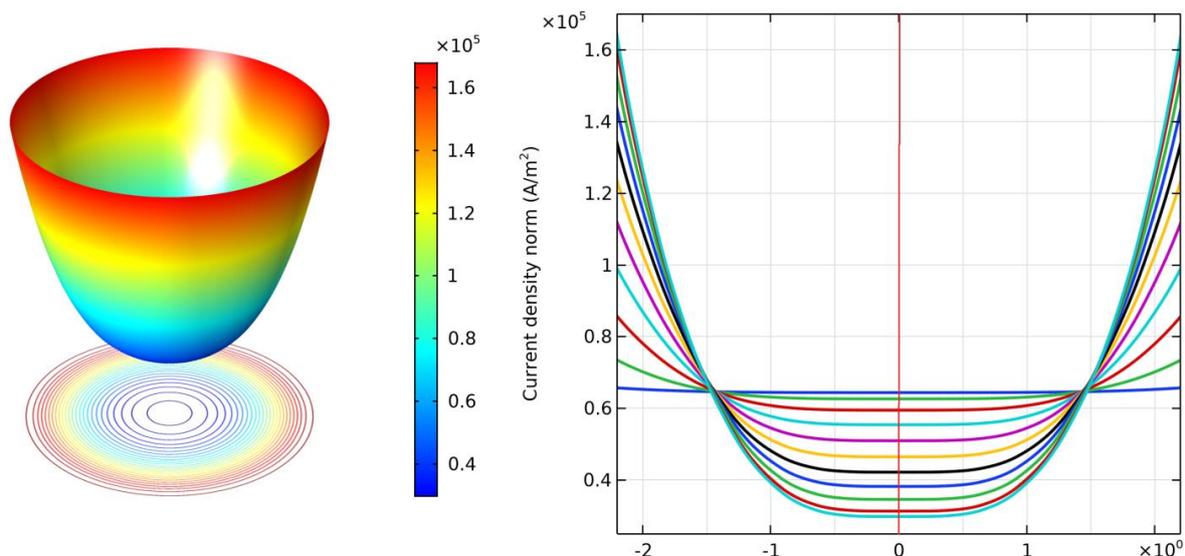


Рис. 11. Пространственное распределение плотности тока по сечению проводника при частоте $f=10$ кГц (слева), профиль распределения плотности тока для частот от 500 Гц до 10 кГц с интервалом 1 кГц (справа). Радиус проводника 0,222 см

Fig. 11. Spatial distribution of current density over the conductor cross-section at frequency $f=10$ kHz (left), current density distribution profile for frequencies from 500 Hz to 10 kHz with interval of 1 kHz (right). The radius of the conductor is 0,222 cm

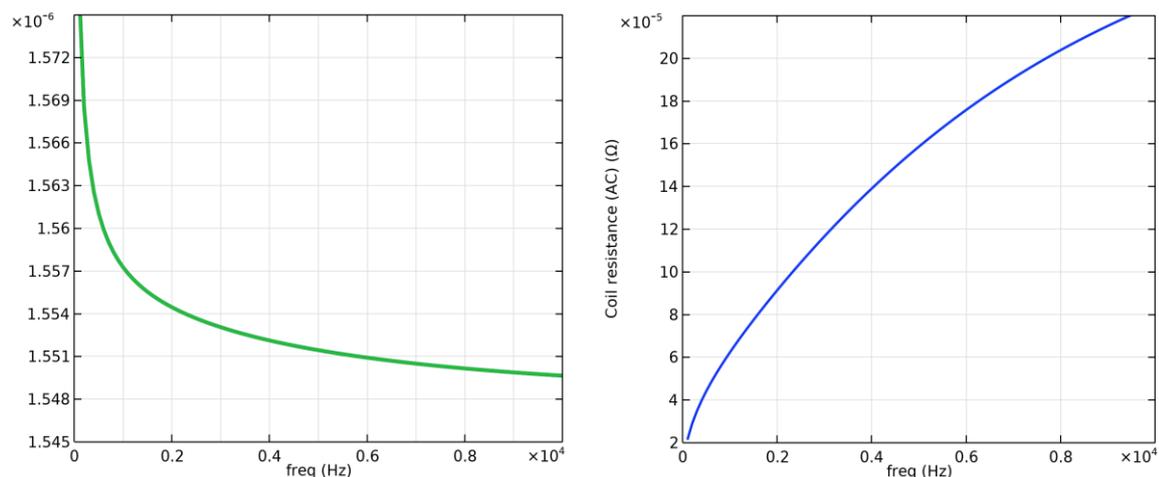


Рис. 12. Зависимость индуктивности (левая кривая) и сопротивления проводника от частоты для диапазона частот от 0 до 10 кГц. Радиус проводника 0,222 см

Fig. 12. Dependence of inductance (left curve) and resistance of the conductor on frequency for the frequency range from 0 to 10 kHz, the radius of the conductor is 0,222 cm

Расчеты показывают (рис. 12), что индуктивность в заданном частотном диапазоне изменяется приблизительно на 2 % по отношению к индуктивности при постоянном токе, в то время как сопротивление меняется существенно.

Расчет индуктивностей и сопротивлений типовых конфигураций нефтепогружных кабелей

Рассчитаем индуктивности и сопротивления для конфигураций кабелей, приведенных на рис. 1.

Приведем необходимую систему уравнений для расчёта индуктивностей и сопротивлений трехфазной системы проводников. Запишем плотность тока проводимости и смещения и циркуляцию вектора магнитной напряженности:

$$\mathbf{J} = (\sigma + j\omega\epsilon)\mathbf{E}, \quad \text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}. \quad (8)$$

Принимая во внимание калибровку полей через вспомогательную величину – векторный магнитный потенциал \mathbf{A} ,

$$\text{rot } \mathbf{A} = \mathbf{H}, \quad \text{rot } \mathbf{E} = -j\omega \text{rot } \mathbf{A}, \quad (9)$$

получим уравнение Гельмгольца на основе (8), (9) для векторного магнитного потенциала:

$$\frac{1}{\mu\mu_0} \Delta \mathbf{A} + (j\sigma\omega - \omega^2\epsilon)\mathbf{A} = 0. \quad (10)$$

При расчете принималось, что амплитуды токов в проводниках определялись соотношением:

$$I_1 = 1A, I_2 = \exp(j2\pi/3)A, I_3 = \exp(-j2\pi/3)A. \quad (11)$$

Использование пакета COMSOL Multiphysics® Version 5.5a, позволило рассчитать распределение магнитного потенциала \mathbf{A} из (10) для трехфазных токов (11) методом конечных элементов. Распределение напряженности электрического поля \mathbf{E} позволило определить потенциалы и напряжения проводников U . Ниже приводятся результаты расчетов.

Комплексы сопротивлений определялись выражениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U_1}{I_1} = Z_1 = R_1 + j\omega L_1, \rightarrow R_1(\omega) = \operatorname{Re}\left(\frac{U_1}{I_1}\right), \\ L_1(\omega) = \operatorname{Im}\left(\frac{U_1}{\omega I_1}\right), \\ \frac{U_2}{I_2} = Z_2 = R_2 + j\omega L_2, \rightarrow R_2(\omega) = \operatorname{Re}\left(\frac{U_2}{I_2}\right), \\ L_2(\omega) = \operatorname{Im}\left(\frac{U_2}{\omega I_2}\right), \\ \frac{U_3}{I_3} = Z_3 = R_3 + j\omega L_3, \rightarrow R_3(\omega) = \operatorname{Re}\left(\frac{U_3}{I_3}\right), \\ L_3(\omega) = \operatorname{Im}\left(\frac{U_3}{\omega I_3}\right). \end{array} \right. \quad (12)$$

Для верификации метода рассчитанная индуктивность основанная на соотношениях (11), (12) сравнивалась с индуктивностью, полученной аналитическим методом, приведенной в справочнике [19] для трехфазной симметричной системы проводов без экрана (рис. 13).

Примем $d=0,5$ см, $r=0,12$ см, тогда

$$L_1 = L_2 = L_3 \approx \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln\left(\frac{d\sqrt{3}}{r}\right) + \frac{1}{4} \right) = 4,4528 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.}$$

Конечно-элементное моделирование дает следующие величины индуктивностей и сопротивлений при частоте 1000 Гц:

$$L_1 = L_2 = L_3 = 4,4515 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м;}$$

$$R_1 = R_2 = R_3 = 3,69 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/м.}$$

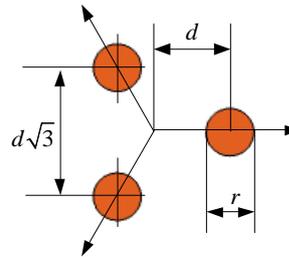
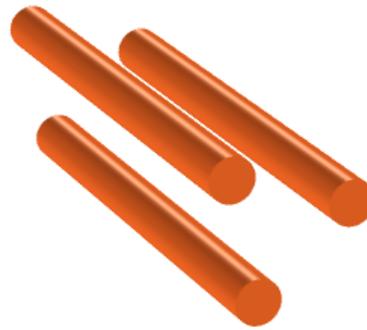


Рис. 13. Симметричное расположение проводников
 Fig. 13. Symmetrical arrangement of conductors

Для расчета индуктивностей и сопротивлений кабелей, представленных на рис. 1, необходимо учитывать наведения токов Фуко в броне кабеля, обусловленных вращающимся магнитным полем. Поэтому расчет индуктивностей по справочным формулам будет неточным. Авторами использовался алгоритм конечных элементов, реализованный в пакете COMSOL Multiphysics. Рассчитывался векторный магнитный потенциал \mathbf{A} (9) с учетом наличия заземленного провода, далее рассчитывалось электрическое поле \mathbf{E} (8) и напряжение U . При известных напряжениях и токах рассчитывались комплексные сопротивления и индуктивности на основе формул (12). Изменяющееся вращающееся магнитное поле продемонстрировано на рис. 14, для случая плоской конфигурации жил. Для случая треугольной конфигурации жил, вращающееся магнитное поле приведено на рис. 15. Результаты расчета индуктивностей и сопротивлений для кабеля КПБП-90 3×25 сведены в табл. 4.

Результаты расчетов емкостей и сопротивлений сведены в табл. 5.

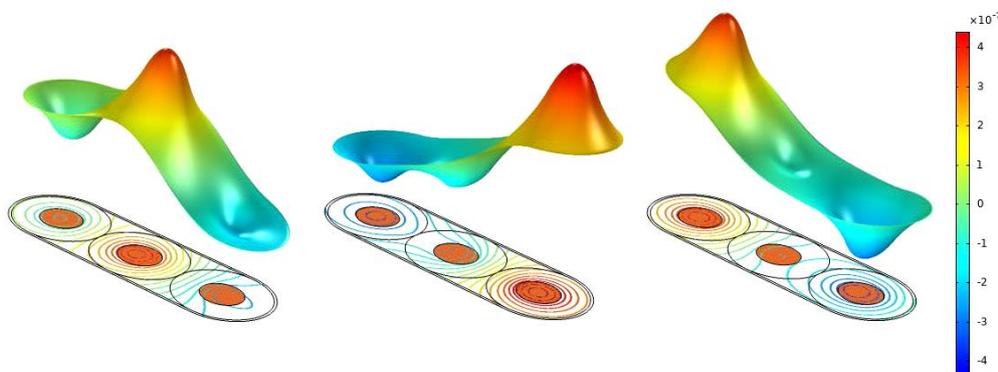


Рис. 14. Распределение векторного магнитного потенциала \mathbf{A} в пределах экранирующей брони в различные моменты времени, показывающее вращение магнитного поля для кабеля плоского сечения

Fig. 14. Distribution of the vector magnetic potential \mathbf{A} within the shielding armor at various points in time, showing the rotation of the magnetic field for a flat-section cable

Таблица 4. Расчет индуктивностей и сопротивлений для кабеля КПБП-90 3×25

Table 4. Calculation of inductances and resistances for cable KPBP-90 3×25

Расчетная модель Computational model	L_1	L_2	L_3	R_1	R_2	R_3
	Гн/м/Н/м			Ом/м/Ω/м		
	3.8706E-7	3.8706E-7	3.8706E-7	0,001404	0,001404	0,001404

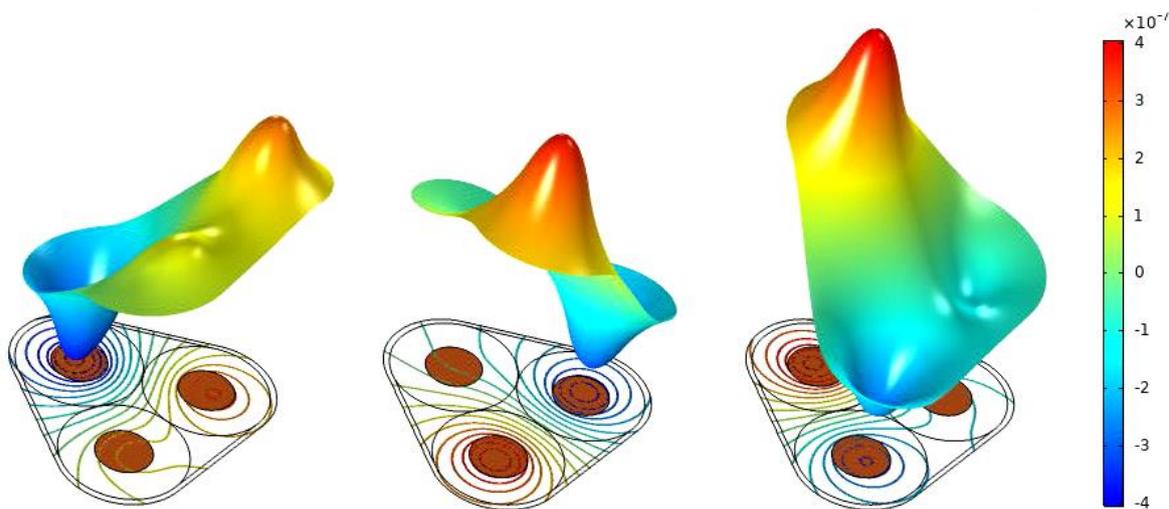


Рис. 15. Распределение векторного магнитного потенциала A в пределах экранирующей брони в различные моменты времени, показывающее вращение магнитного поля для кабеля круглого сечения

Fig. 15. Distribution of the vector magnetic potential A within the shielding armor at various points in time, showing the rotation of the magnetic field for a round design cable

Таблица 5. Расчет индуктивностей и сопротивлений для кабеля КПБК-90 3×25

Table 5. Calculation of inductances and resistances for cable KPBC-90 3×25

Расчетная модель Computational model	L_1	L_2	L_3	R_1	R_2	R_3
	Гн/м/Н/м			Ом/м/Ω/м		
	3.5191E-7	3.5191E-7	3.5191E-7	0,010769	0,010769	0,010769

Заключение

На основе метода конечных элементов, реализованного в пакете COMSOL Multiphysics, авторами рассчитаны электротехнические параметры погружных кабелей, таких как погонные индуктивности, сопротивления и ёмкости. Расчеты проведены для кабелей марок КПБК-90 3×25 (круглый) и КПБП-90 3×25 (плоский). Частотный спектр электромагнитных по-

лей находился в диапазоне 0...10 кГц. Результаты расчетов электротехнических параметров погружных кабелей показали, что алгоритм, используемый авторами, дает удовлетворительные результаты и в частных случаях совпадает с результатами расчётов по аналитическим выражениям с погрешностью в пределах 1...2 %. В работе показано, что ошибка, вносимая скин-эффектом, не превышает 2 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. – М.: Юрид. лит., 2020. – 93 с.
2. Тихонов С. Короля играет свита. Баженовская свита и поддержание объемов нефтедобычи в Западной Сибири // Нефтегазовая Вертикаль. – 2019. – № 12. – С. 34–43.
3. Глухманчук Е.Д., Крупицкий В.В., Леонтьевский А.В. Баженовская нефть – «сланцевые технологии» и отечественный опыт добычи // Недропользование XXI век. – 2015. – № 7. – С. 32–37.
4. Баженовский горизонт Западной Сибири: строение, корреляция и толщины / С.В. Рыжкова, Л.М. Бурштейн, С.В. Ершов, В.А. Казаненков, А.Э. Конторович, В.А. Конторович, А.Ю. Нехаев, Б.Л. Никитенко, М.А. Фомин, Б.Н. Шурыгин, А.Л. Бейзель, Е.В. Борисов, О.В. Золотова, Л.М. Калинина, Е.В. Пономарева // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59. – № 7. – С. 1053–1074.
5. Баженовская свита – главный источник ресурсов нетрадиционной нефти в России / А.Э. Конторович, Л.М. Бурштейн, В.А. Казаненков, В.А. Конторович, Е.А. Костырева, Е.В. Пономарева, С.В. Рыжкова, П.А. Ян // Георесурсы, геознергетика, геополитика. – 2014. – № 2 (10). – С. 2–10.
6. Конторович А.Э. За нефтью и газом нужно идти в Арктику. На баженовскую свиту и на мелкие месторождения... // Нефтегазовая вертикаль. – 2019. – № 14 (458). – С. 12–17.
7. Якимов С.Б. Современное состояние и перспективные направления снижения тепловых потерь в кабельных линиях УЭЦН большой мощности в ОАО «НК "Роснефть"» // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2016. – № 3. – С. 40–46.
8. Liang X., He J., Du L. Electrical submersible pump system grounding: current practice and future trend // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2015. – V. 5. – P. 5030–5037.
9. Liang X., Ghoreishi O., Xu W. Downhole tool design for conditional monitoring of electrical submersible motors in oil field facilities // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2017. – V. 53. – P. 3164–3174.
10. Evolving technologies: electrical submersible pumps / C. Bremner, G. Harris, A. Kosmala, B. Nicholson, A. Ollre, M. Percy et al. // Oilfield Rev. – 2006. – V. 18. – P. 30–43.
11. Electrical modelling of an electrical submersible pump system three-phase power cable used in power line communication / D. Fonseca, A. Salazar, N. Goncalves, V. Villarreal // Przegląd Elektrotechniczny. – 2019. – V. 10. – P. 22–26.
12. Mathematical models of synchronous generators for different spatial distances of disturbance point / Y.N. Isaev, V.A. Kolchanova,

- S.S. Tarasenko, O.V. Tikhomirova // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). – 2015. – P. 1–5. URL: ieeexplore.ieee.org/document/7414894 (дата обращения 20.04.2021).
13. IEEE Draft Recommended Practice for Specifying Electric Submersible Pump Cable-Ethylene-Propylene Rubber Insulation // IEEE P1018/D07. – 2012 17 November. – P. 1–43. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6357350> (дата обращения 20.04.2021).
14. Downhole telemetry systems to monitor electric submersible pumps parameters in oil well / D.A. de Moura Fonsêca, A.O. Salazar, E.R.L. Villarreal, G.A. Echaiz Espinoza, A.C.Q.B. Leite // IEEE Access. – 2021. – V. 9. – P. 12824–12839.
15. Han J., Qiang G. Research on downhole multi-parameters monitoring system // Proc. of the 7th International Power Electronics and Motion Control Conference. – Harbin, China, 2012. – P. 2765–2768.
16. Fully retrievable ESP: a new artificial lift concept / S. Spagnolo, S. Pilone, L. Corti, G. Liantonio, G. Rizza, G.E. Tita, D.N. Kitsoukou // International Petroleum Technology Conference. – Beijing, China, 2013. – 115 p.
17. Liang X., Fleming E. Electrical submersible pump systems: evaluating their power consumption // IEEE Ind. Appl. Mag. – 2013. – V. 19. – P. 46–55.
18. ГОСТ Р 51777-2001. Кабели для установок погружных электронасосов. Общие технические условия. – М.: ИПК «Издательство стандартов», 2001. – 18 с.
19. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: справочная книга. 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
20. Metwally I.A., Gastli A. Factors affecting transient overvoltages of electric submersible pumps // IEEE Potentials. – 2006. – V. 25. – № 5. – P. 13–17.
21. Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. – СПб: Энергоиздат, 1981. – 288 с.
22. Overvoltage mitigation of submersible motors with long cables of different lengths / Y. Liu, L. Wang, H. Gao, H. Zhang, D. Xu // 17th International Conference on Electrical Machines and Systems. – Hangzhou, China, 2014. – P. 638–644.

Поступила 22.05.2021 г.

Информация об авторах

Глазырин А.С., доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета; профессор Института нефти и газа Югорского государственного университета.

Исаев Ю.Н., доктор физико-математических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета; профессор отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кладиев С.Н., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Леонов А.П., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Раков И.В., инженер-проектировщик АСУ ТП, ООО Научно-производственное предприятие «Томская электронная компания».

Колесников С.В., ассистент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ланграф С.В., кандидат технических наук, руководитель сектора разработки встроенного ПО, ООО «НПФ Мехатроника-Про».

Филипас А.А., кандидат технических наук, доцент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Копырин В.А., кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

Хамитов Р.Н., доктор технических наук, профессор кафедры электрической техники Омского государственного технического университета; профессор кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

Ковалев В.З., доктор технических наук, профессор Института нефти и газа Югорского государственного университета.

Лавринович А.В., инженер I категории, отдела по высоковольтному оборудованию, Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа.

UDC 621.315.22

DETERMINATION OF RUNNING ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF OIL SUBMERSIBLE CABLE

Alexander S. Glazyrin^{1,2},
asglazyrin@tpu.ru

Yusup N. Isaev¹,
isaev_yusup@mail.ru

Sergey N. Kladiev¹,
kladiev@tpu.ru

Andrey P. Leonov¹,
leonov_ap@tpu.ru

Ivan V. Rakov³,
rakovivan@live.com

Stanislav V. Kolesnikov¹,
svk3@tpu.ru

Sergey V. Langraf⁴,
sergeylgrf@gmail.com

Alexander A. Filipas¹,
filipas@tpu.ru

Vladimir A. Kopyrin⁵,
kopyrinva@gmail.com

Rustam N. Khamitov^{6,5},
apple_27@mail.ru

Vladimir Z. Kovalev²,
vz_kovalev@mail.ru

Alexey V. Lavrinovich⁷,
lavrinovich86@yandex.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Yugra State University, 1
6, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russia.

³ Scientific Manufacturing Enterprise «Tomsk Electronic Company», Ltd.,
33, Vysotsky street, Tomsk, 634040, Russia.

⁴ NPF Mechatronica-Pro LTD,
119E, Frunze avenue, Tomsk, 634021, Russia.

⁵ Industrial University of Tyumen,
38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

⁶ Omsk State Technical University,
11, Mira avenue, Omsk, 644050, Russia.

⁷ Tomsk Research and Design Institute of Oil and Gas,
72, Mira avenue, Tomsk, 634027, Russia.

The relevance. Determination of the main electrical parameters of oil submersible cables is associated with the need to create accurate mathematical models of the systems control station – oil submersible cable – submersible motor, in which it is necessary to take into account wave processes in a long cable line arising in connection with the shape pulses generated by frequency converters included in the set of modern control stations. Electrical parameters such as linear capacities and inductances are not standardized in the technical literature and are not indicated in the technical specifications by cable manufacturers. However, it is obvious that the creation of control systems and identification of the SEM operation modes requires the solution of systems of differential equations, which include the specified characteristics as parameters. In addition, modern concepts of frequency control of electric motors, in particular submersible, indicate that during operation of frequency converters based on IGBT transistors, high-frequency overvoltages arise in the SEM supply signal, leading to the appearance of partial discharges in the stator windings of the motors. This fact will be aggravated by the development of deeper fields, with a longer cable length and, accordingly, a greater influence of wave processes on the shape of the signal supplied to the SEM.

The main aim of the research consists in development of a method for determining the linear electrical parameters of the submersible cable of any designs and materials used.

Methods: methods for solving differential equations, field problems, numerical finite element modeling, and a physical experiment.

Results. A method was developed for determining the linear capacities and inductances of conductors and armor of an oil-submersible cable, based on solving differential equations for a «reference» model, numerical modeling of an identical design in COMSOL Multiphysics® Version 5.5a, comparison of the obtained values with experimental data. It is indicated that the finite element modeling in COMSOL Multiphysics® Version 5.5a is correct and with sufficient accuracy (error less than 5 %) coincides with the results of solving the equations given in the reference literature. The linear values of capacities and inductances have been determined for the most common designs of oil-submersible cables.

Key words:

Mechanized oil production, oil submersible cable, electric field, electric potential, magnetic field, vector magnetic potential, Maxwell's equation, skin effect, submersible electric motor.

REFERENCES

1. *Energeticheskaya strategiya Rossiyskoy federatsii na period do 2035 goda* [Energy strategy of the Russian Federation for the period up to 2035]. Moscow, State Publ. House of Legal Literature, 2020. 93 p.
2. Tikhonov S.A. *Korolya igraet svita. Bazhenovskaya svita i podderzhanie obemov nefte dobychi v Zapadnoy Sibiri* [The Bazhenovskaya suite plays the king and the maintenance of oil production in Western Siberia]. Moscow, Neftegazovaya Vertikal Publ., 2019. No. 12, pp. 34–43.
3. Glukhmanchuk E.D., Krupitsky V.V., Leontievsky A.V. Bazhenov oil – «shale technologies» and domestic production experience. *Subsoil use of the XXI century*, 2015, no. 7, pp. 32–37. In Rus.
4. Ryzhkova S.V., Burshtein L.M., Ershov S.V., Kazanekov V.A., Kontorovich A.E., Kontorovich V.A., Nekhaev A.Yu., Nikitenko B.L., Fomin M.A., Shurygin B.N., Beizel A.L., Borisov E.V., Zolotova O.V., Kalinina L.M., Ponomareva E.V. Bazhenov horizon of Western Siberia: structure, correlation and thickness. *Geology and Geophysics*, 2018, vol. 59, no. 7, pp. 1053–1074. In Rus.
5. Kontorovich A.E., Burshtein L.M., Kazanekov V.A., Kontorovich V.A., Kostyreva E.A., Ponomareva E.V., Ryzhkova S.V., Yan P.A. Bazhenov formation – the main source of unconventional oil resources in Russia. *Georesources, geoenergy, geopolitics*, 2014, no. 2 (10), pp. 2–10. In Rus.
6. Kontorovich A.E. *Za neftyu i gazom nuzhno idti v Arktiku. Na bazhenovskuyu svitu i na melkie mestorozhdeniya...* [For oil and gas you need to go to the Arctic. To the Bazhenov suite and small deposits]. Moscow, Oil and Gas Vertical, 2019. – No. 14 (458), pp. 12–17.
7. Yakimov S.B. Current state and promising directions for reducing heat losses in cable lines of high-power ESP in OAO NK Rosneft. *Equipment and technologies for the oil and gas complex*, 2016, no. 3, pp. 40–46. In Rus.
8. Liang X., He J., Du L. Electrical submersible pump system grounding: current practice and future trend. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2015, vol. 5, pp. 5030–5037.
9. Liang X., Ghoreishi O., Xu W. Downhole tool design for conditional monitoring of electrical submersible motors in oil field facilities. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2017, vol. 53, pp. 3164–3174.
10. Bremner C., Harris G., Kosmala A., Nicholson B., Ollre A., Percy M. Evolving technologies: electrical submersible pumps. *Oil-field Rev.*, 2006, vol. 18, pp. 30–43.
11. Fonsêca D., Salazar A., Gonçalves N., Villarreal V. Electrical modelling of an electrical submersible pump system three-phase power cable used in power line communication. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2019, vol. 10, pp. 22–26.
12. Isaev Y.N., Kolchanova V.A., Tarasenko S.S., Tikhomirova O.V. Mathematical models of synchronous generators for different spatial distances of disturbance point. *International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. 2015. pp. 1–5. Available at: ieeexplore.ieee.org/document/7414894 (accessed 20.04.2021).
13. IEEE draft recommended practice for specifying electric submersible pump cable-ethylene-propylene rubber insulation. *IEEE P1018/D07*, 17 Nov. 2012, pp. 1–43. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6357350> (accessed 20.04.2021).
14. De Moura Fonsêca D.A., Salazar A.O., Villarreal E.R.L., Echaiz Espinoza G.A., Leite A.C.Q.B. Downhole telemetry systems to monitor electric submersible pumps parameters in oil well. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 12824–12839.
15. Han J., Qiang G. Research on downhole multi-parameters monitoring system. *Proc. of the 7th International Power Electronics and Motion Control Conference*. Harbin, China, 2012. pp. 2765–2768.
16. Spagnolo S., Pilone S., Corti L., Liantonio G., Rizza G., Tita G.E., Kitsoukou D.N. Fully retrievable ESP: a new artificial lift concept. *International Petroleum Technology Conference*. Beijing, China, 2013. 115 p.
17. Liang X., Fleming E. Electrical submersible pump systems: evaluating their power consumption. *IEEE Ind. Appl. Mag.*, 2013, vol. 19, pp. 46–55.
18. GOST R 51777-2001. *Kabeli dlya ustanovok pogruzhnykh elektronasov. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [State Standart R 51777-2001. Cables for installations of submersible electric pumps. General technical conditions]. Moscow, StandardInform Publ., 2001. 18 p.
19. Kalantarov P.L., Zeitlin L.A. *Raschet induktivnostey: spravochnaya kniga* [Calculation of inductances: reference book]. 3rd ed., rev. and add. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986. 488 p.
20. Metwally I.A., Gastli A. Factors affecting transient overvoltages of electric submersible pumps. *IEEE Potentials*, 2006, vol. 25, no. 5, pp. 13–17.
21. Iossel Yu.Ya., Kochanov E.S., Strunsky M.G. *Raschet elektricheskoy emkosti* [Calculation of capacitances]. St-Petersburg, Energoizdat Publ., 1981. 288 p.
22. Liu Y., Wang L., Gao H., Zhang H., Xu D. Overvoltage mitigation of submersible motors with long cables of different lengths. *17th International Conference on Electrical Machines and Systems*. Hangzhou, China, 2014. pp. 638–644.

Received: 20 May 2021.

Information about the authors

Alexander S. Glazyrin, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University; professor, Yugra State University.

Yusup N. Isaev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University

Sergey N. Kladiev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Andrey P. Leonov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Ivan V. Rakov, design engineer, Scientific Manufacturing Enterprise «Tomsk Electronic Company».

Stanislav V. Kolesnikov, graduate assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey V. Langraf, head of the embedded software development sector, NPF Mechatronica-Pro Ltd.

Alexander A. Filipas, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vladimir A. Kopyrin, Cand. Sc., associate professor, Industrial University of Tyumen.

Rustam N. Khamitov, Dr. Sc., professor, Omsk State Technical University; professor, Tyumen Industrial University.

Vladimir Z. Kovalev, Dr. Sc., professor, Yugra State University.

Alexey V. Lavrinovich, engineer, Tomsk Research and Design Institute of Oil and Gas.