

Тепловой расчет погружных электродвигателей

© Р.Р. Гизатуллин¹, С.Н. Пещеренко¹, А.В. Шиверский²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г. Пермь, 614990, Россия

²АО «Новомет-Пермь», г. Пермь, 614065, Россия

Предложена методика теплового расчета погружных электродвигателей (ПЭД), предназначенная для использования на стадии их концептуального проектирования. В основе модели лежит полная система уравнений гидродинамики, осредненных по поперечному сечению ПЭД и кольцевого канала, по которому прокачивается охлаждающая жидкость. Задаются все геометрические размеры и свойства вещества. Вычисляются распределение температуры по поперечному сечению и по длине электродвигателя. Используются два приближения. В первом — распределение температуры в сечении электродвигателя осредняется по углам, для чего требуется задать эффективный коэффициент теплопроводности внутри пазов статора, заполненных проводами обмотки и электроизоляцией. При втором приближении теплопередачу на границе твердое тело — жидкость задавали через эмпирическую зависимость числа Нуссельта от чисел Рейнольдса и Прандтля. Для верификации модели полученные результаты сравнивали с расчетами методом вычислительной гидродинамики в программном комплексе ANSYS Fluent. Ошибка вычислений температуры изоляции была не более 5 %.

Ключевые слова: погружной электродвигатель, тепловые расчеты, теплопередача, вычислительная гидродинамика, ANSYS.

Введение. В настоящее время примерно 30 % отказов электроцентробежной погружной установки для добычи нефти происходит ввиду отказа погружных электродвигателей (ПЭД), происходящего в результате перегрева его электроизоляции [1–3], что указывает на недостаточную точность тепловых расчетов, выполняемых при проектировании.

Существует большое количество методик тепловых расчетов погружных электродвигателей — как аналитических [4–8], так и численных [9–11]. Аналитические методики основаны на уравнениях теплопроводности, теплообмена, представляя ПЭД в упрощенном виде (в качестве цилиндра). Для задания тепловых потерь берутся суммарные потери, хотя они разные в каждой части (проводники, ротор, статор, корпус). В большинстве источников учитывается теплообмен между двигателем и охлаждающей жидкостью. Однако элементы ПЭД изготавливаются из разных материалов (проводники — из меди, ротор и статор — из стали, пазы заполняют изоляционным материалом и т. д.), которые имеют разные теплофизические свойства, влияющие на передачу теплоты от проводников в паз, из паза — в статор, из статора — в корпус, из корпуса — в охлаждающую жид-

кость. Поэтому необходимо учитывать теплообмен и между этими элементами ПЭД.

Специализированное программное обеспечение, использующее методы численного моделирования [9–11], в большинстве случаев основано на уже имеющихся конструкциях и для проектирования новых двигателей не подходит.

Методы вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD) позволяют решать тепловые задачи для ПЭД в стационарной [12] и в нестационарной [13] постановке с достаточно высокой точностью. Правда, они весьма трудоемки. Требуется задавать полную 3D-модель ПЭД, строить подробную расчетную сетку, поэтому для реализации подобного расчета необходим высокопроизводительный компьютер. Обычно на выполнение такой работы затрачивается несколько суток, поскольку при проектировании ПЭД варьируют до десятка параметров, проводят десятки, а то и сотни миллионов расчетов, необходимых при поиске оптимальной конструкции. Поэтому применять трудоемкие CFD-методы на этапе создания нового двигателя невозможно. На основании изложенного выше цель представленной работы заключалась в разработке методики быстрого теплового расчета ПЭД для использования на стадии их концептуального проектирования.

Методики расчета средствами вычислительной гидродинамики [14]. Поперечное сечение ПЭД представлено на рис. 1. Статор имеет пазы, в которых размещены провода статорной обмотки и электроизоляция. Ротор состоит из вала, сердечника, постоянных магнитов и гильзы.

Взятая для расчета область содержала один паз статорной обмотки (рис. 2). На границах области задавали условия периодичности.

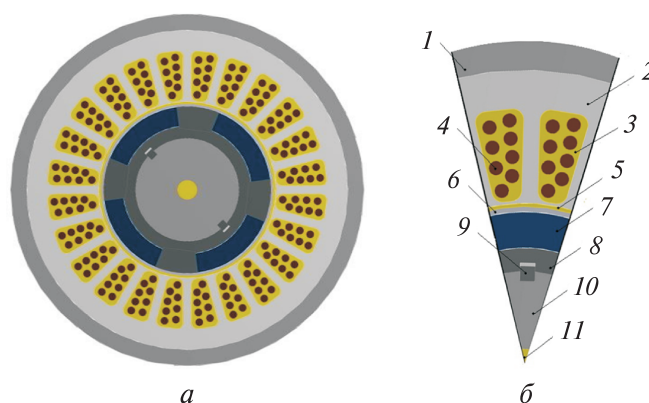


Рис. 1. Поперечное сечение погружного электродвигателя:

a — общий вид; *б* — сектор; 1 — корпус; 2 — лист статора; 3 — изоляция; 4 — проводники обмотки; 5 — зазор между статором и ротором (масло); 6 — гильза; 7 — магнит; 8 — сердечник; 9 — шпонка; 10 — вал; 11 — центральное отверстие вала (масло)

Приняты следующие упрощения геометрии: тонкий зазор между корпусом и статором двигателя не учитывался, что позволило объединить их в одну область; элементы ротора (вал, магниты, шпонка, гильза, сердечник) также объединили в одну общую область с эффективными свойствами.

Кольцевой канал между ротором и статором, а также центральный канал вала ротора заполнены маслом. Боковая поверхность корпуса ПЭД и нижний торец корпуса омываются скважинной жидкостью.

Расчет течения и теплопередачи в жидкости проводился в RANS-приближении с использованием SST-модели турбулентности. Строили структурированную гексаэдрическую сетку со сгущением в пристеночных областях до $y^+ < 5$ и числом элементов $\sim 650\,000$ (см. рис. 2). В данной работе применили CFD-метод только для тестирования разрабатываемых быстрых методик теплового расчета.

В расчетах приняты следующие граничные условия: на входе в расчетную область задавали расход и температуру жидкости, на выходе из этой области принимали открытую границу и нулевое давление.

Внутри расчетной области задавали объемные источники теплоты, в которых объемная плотность тепловыделения рассчитывается в соответствии с потерями мощности на каждом компоненте двигателя. Суммарные тепловые потери вычисляют согласно известной инженерной методике [15]:

$$N_q = N(1 - \eta),$$

где N — мощность электродвигателя; η — КПД электродвигателя.

Тепловые потери складываются из потерь на внутреннее трение в жидкости $N_{ж}$ (в зазоре ротор — статор), трение в радиальных подшипниках $N_{п}$, нагрев проводников статорной обмотки N_R (омические потери) и потерь на вихревые токи $N_{в}$ (токи Фуко) в роторе и статоре. Задавали вращение ротора с частотой 6000 об/мин неподвижный и статор.

Методом CFD был проведен расчет ПЭД-130, для верификации использовали результаты стендовых испытаний этого электродвига-

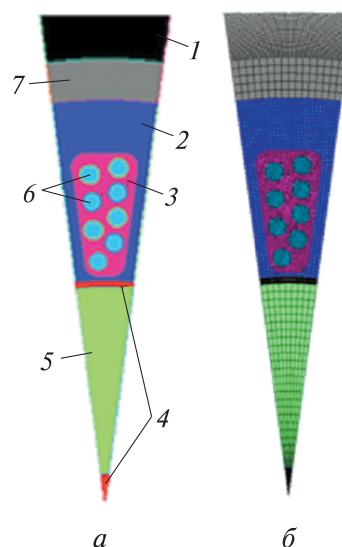


Рис. 2. CFD-методика: *a* — расчетная область; *б* — расчетная сетка; 1 — скважинная жидкость; 2 — статор; 3 — изоляция; 4 — масло; 5 — ротор; 6 — проводники; 7 — корпус

теля. Результаты расчета и измерения максимальной температуры изоляции отличались не более чем на 6 %.

Методика быстрого расчета средней температуры изоляции и магнитопровода статора. Приняли, что расчетная область аксиально-симметричная (рис. 3), она состоит из кольцевого слоя, заполненного скважинной жидкостью, охлаждающей ПЭД, корпуса ПЭД и статора. Статор также считали аксиально-симметричным в поперечном сечении (см. рис. 3): R_1 и R_4 — внутренний и внешний радиусы магнитопровода статора. В кольцевом слое R_2 , R_3 (соответственно, внутренний и внешний радиусы паза статора) расположены пазы статорной обмотки, разделенные зубцами магнитопровода, которые на рис. 3 не показаны. Эту область также считаем аксиально-симметричной.

Электродвигатель длиной L , расположенный соосно обсадной колонне, охлаждается скважинной жидкостью температурой T_0 и с подачей Q .

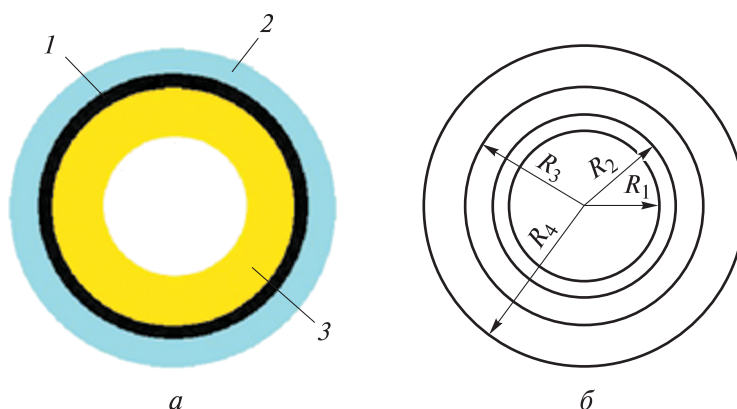


Рис. 3. Схема к методике быстрого расчета средней температуры изоляции:
 а — расчетная область (1 – корпус ПЭД; 2 – скважинная жидкость; 3 – статор ПЭД);
 б — модель магнитопровода статора;

Осредненные уравнения течения жидкости. Поскольку скорость охлаждающей жидкости много меньше скорости звука и жидкость несжимаемая, течение аксиально-симметричное

$$\bar{v} = (v_r, v_\varphi, v_x) = (0, 0, v).$$

Тогда из уравнения непрерывности [16] следует

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \bar{v} = 0, \rightarrow \frac{\partial \rho v}{\partial x} = 0, \rightarrow v = \text{const}(x), \rightarrow v = v(t, r).$$

Здесь ρ — плотность жидкости; \bar{v} — вектор скорости с радиальной v_r , угловой v_ϕ и осевой v_x компонентами; x — осевая координата; r — радиальная координата; t — время.

Уравнение Навье — Стокса принимает вид [16]

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\bar{v} \nabla) \bar{v} \right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \bar{v}, \rightarrow \rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial v}{\partial r},$$

где ∇ — оператор набла; p — давление; η — динамическая вязкость жидкости.

Осреднив его по сечению, перпендикулярному скорости:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \int_{R_d}^{R_k} v 2\pi r dr = -\frac{\partial}{\partial x} \int_{R_d}^{R_k} p 2\pi r dr + \eta \int_{R_d}^{R_k} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial v}{\partial r} 2\pi r dr,$$

где R_k — радиус корпуса электродвигателя; R_d — радиус обсадной колонны, получим

$$\rho \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial t} = -\frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x} - \tau, \quad -\frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x} = \left| \frac{\Delta p}{L} \right| = \text{const}.$$

Здесь

$$\langle v \rangle = \frac{1}{\pi(R_k^2 - R_d^2)} \int_{R_d}^{R_k} v(t, r) 2\pi r dr,$$

$$\tau = \frac{\eta}{\pi(R_k^2 - R_d^2)} \int_{R_d}^{R_k} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial v}{\partial r} 2\pi r dr = \frac{2\pi r \eta}{\pi(R_k^2 - R_d^2)} \frac{\partial v}{\partial r} \Big|_{R_d}^{R_k} = -\frac{F_{\text{тр}}}{\pi L (R_k^2 - R_d^2)}$$

($F_{\text{тр}}$ — сила трения охлаждающей жидкости со стенками ПЭД и обсадной колонны; τ — плотность силы трения (сила трения, деленная на объем канала)).

При ламинарном течении жидкости в кольцевом зазоре между корпусом ПЭД и обсадной колонной

$$\begin{aligned} v(r) &= \frac{1}{4\eta} \left| \frac{\Delta p}{L} \right| \left[R_d^2 - r^2 + (R_k^2 - R_d^2) \left(\ln \frac{r}{R_1} / \ln \frac{R_2}{R_1} \right) \right] = \\ &= \frac{\langle v \rangle}{2 \left(1 + \frac{2R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} - \ln \frac{R_2}{R_1} \right)} \left[\frac{R_2^2 - r^2}{R_2^2 - R_1^2} + \left(\ln \frac{r}{R_1} / \ln \frac{R_2}{R_1} \right) \right], \rightarrow \tau = B \langle v \rangle, \\ &\rightarrow \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial t} = A - B \langle v \rangle, \quad (A, B) = \text{const} > 0. \end{aligned}$$

При турбулентном течении обычно считают $\tau \sim \langle v \rangle^2$, тогда

$$\frac{\partial \langle v \rangle}{\partial t} = A - B \langle v \rangle^2, \quad (A, B) = \text{const} > 0.$$

Осредненное уравнение теплопроводности в жидкости. Жидкость течет в зазоре между корпусом электродвигателя R_k и стенкой обсадной колонны R_d , постепенно нагреваясь от теплоты, получаемой от электродвигателя. Этот процесс можно описать следующим равенством [17, 18]:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\bar{v} \nabla) T \right) = \lambda \nabla^2 T,$$

где c_p — теплоемкость; λ — коэффициент теплопроводности; T — температура.

Поскольку $\bar{v} = (0, 0, v(t, r))$, $T = T(t, r, x)$, справедлива запись

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \lambda \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right). \quad (1)$$

Осреднив температуру и скорость жидкости по поперечному сечению потока, перпендикулярному скорости, получим

$$\rho c_p \left(\frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle vT \rangle}{\partial x} \right) = \lambda \frac{\partial^2 \langle T \rangle}{\partial x^2} + q, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \langle T \rangle &= \frac{1}{\pi(R_k^2 - R_d^2)} \int_{R_d}^{R_k} T(t, r, x) 2\pi r dr; \\ \langle vT \rangle &= \frac{1}{\pi(R_k^2 - R_d^2)} \int_{R_d}^{R_k} v(t, r) T(t, r, x) 2\pi r dr; \\ q &= \frac{\eta}{\pi(R_k^2 - R_d^2)} \int_{R_d}^{R_k} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T}{\partial r} 2\pi r dr \end{aligned}$$

(q — теплота, передаваемая от электродвигателя в единицу объема жидкости за единицу времени, т. е. эффективный объемный источник теплоты).

Поскольку кольцевой канал, по которому течет охлаждающая ПЭД жидкость, обычно узкий, $T(t, r, x) = \text{const}(r)$. Тогда $\langle vT \rangle = \langle v \rangle \langle T \rangle$ и

$$\rho c_p \left(\frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} + \langle v \rangle \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x} \right) = \lambda \frac{\partial^2 \langle T \rangle}{\partial x^2} + q. \quad (3)$$

Найдем решение этого уравнения в установившемся режиме. Упростим обозначения и будем опускать обозначение осреднения, т. е. угловые скобки, в уравнении (3), тогда

$$v \frac{dT}{dx} = \chi \frac{d^2 v}{dx^2} + \frac{q}{\rho c_p}, \quad \chi = \frac{\lambda}{\rho c_p},$$

где χ — температуропроводность.

Решение этого уравнения для $(\chi, q, \rho c_p) = \text{const}$ имеет следующий вид:

$$T(x) = \frac{q}{\rho c_p v} + \frac{c_1 \chi}{v} \exp \left\{ \frac{v}{\chi} x \right\} + c_2. \quad (4)$$

Константы c_1, c_2 находятся из граничных условий. Первое граничное условие: $T(0) = T_1$ — задаем температуру жидкости на входе в кольцевой канал ПЭД — обсадная колонна.

Второе граничное условие найдем из баланса энергии. В стационарном режиме за время Δt жидкость в кольцевом канале

- получает энергию $q \Delta t L S$ (где q — эффективный объемный источник теплоты; L — длина канала; S — площадь его поперечного сечения);

- отдает энергию $\Delta m c_p (T_2 - T_1) = \rho S v \Delta t c_p (T_2 - T_1)$, где $T_2 = T(L)$ — температура жидкости на выходе из канала, следовательно,

$$q \Delta t L S = \rho S v \Delta t c_p (T_2 - T_1), \rightarrow T_2 = T_1 + \frac{qL}{\rho v c_p}.$$

Второе граничное условие имеет вид $T(L) = T_2$. Тогда из уравнения (4) следует

$$T(x) = T_1 + \frac{qx}{\rho c_p v} + \frac{T_2 - T_1 - qL/\rho c_p v}{\exp \left\{ \frac{v}{\chi} L \right\} - 1} \left(\exp \left\{ \frac{v}{\chi} x \right\} - 1 \right), \quad (5)$$

т. е. температура жидкости линейно возрастает при ее движении по кольцевому каналу, который образован обсадной колонной и поверхностью ПЭД.

Уравнение теплопроводности в твердой фазе внутри статора. Это уравнение имеет следующий вид [17, 18]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + q, \quad (6)$$

где ρ — плотность; c_p — теплоемкость; λ — коэффициент теплопроводности; q — эффективный объемный источник теплоты.

В установившемся режиме решение (6) для аксиально симметричной расчетной области и в отсутствие объемных источников теплоты

$$T = a \ln r + b, \quad (a, b) = \text{const},$$

а при наличии объемного источника теплоты ($q = \text{const}$)

$$T = -\frac{qr^2}{4\lambda} + a \ln r + b, \quad (a, b) = \text{const}.$$

Граничные условия:

- на внутренней границе статора $r = R_1$ (см. рис. 3) задан поток теплоты от ротора в статор (q_{rot}):

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{R_1} 2\pi R_1 L = q_{rot}; \quad (7)$$

- на границах областей $r = R_2, r = R_3, r = R_4$ задано равенство температур и потоков теплоты;

- на внешней поверхности корпуса ПЭД, где $r = R_k$, которая охлаждается протекающей жидкостью, задавали условия теплоотвода:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{R_k} = \alpha (T_k - T_{liq}) \Big|_{R_k}; \quad (8)$$

$$\alpha = \lambda_{liq} \frac{Nu}{d}; \quad d = 4 \frac{S}{P} = 4 \frac{\pi(R_k^2 - R_d^2)}{2\pi R_k + 2\pi R_d} = 2(R_k - R_d),$$

где T_k — температура корпуса; T_{liq} — температура жидкости, λ_{liq} — коэффициент теплопроводности жидкости; Nu — число Нуссельта; d — гидродинамический диаметр канала.

Число Нуссельта Nu вычисляли следующим образом [17, 18]:

- для ламинарного течения $Re < 2300$

$$Nu = 1,4 \left(Re_{liq} \frac{d}{L} \right)^{0,33} Pr_k^{0,33} \left(\frac{Pr_{liq}}{Pr_k} \right)^{0,25};$$

$$\text{Re}_{liq} = \frac{v d}{\nu_{liq}}; \text{Pr}_k = \frac{\nu_k}{\chi_k}; \text{Pr}_{liq} = \frac{\nu_{liq}}{\chi_{liq}},$$

где Re_{liq} — число Рейнольдса для жидкости в канале ПЭД — обсадная колонна; Pr_k и Pr_{liq} — число Прандтля для внешней поверхности корпуса ПЭД и для жидкости соответственно;

- для турбулентного течения

$$\text{Nu} = 0,021 \text{Re}_{liq}^{0,8} \text{Pr}_k^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}_{liq}}{\text{Pr}_k} \right)^{0,25}.$$

Таким образом, вычисляется зависимость средней температуры ПЭД от радиуса. Осреднение проводится по кольцу, охватывающему пазы обмотки статора. Ресурс изоляции статора (в большинстве случаев он определяет и ресурс всего ПЭД) регламентирован максимальной температурой изоляции. Между максимальной и средней температурой имеется корреляционная связь: зная среднюю температуру, всегда можно вычислить максимальную.

В этой методике использовали приближение об аксиальной симметрии конструкции ПЭД, а значит, применяли эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{эфф}$. Данный коэффициент задавали по правилу смеси. Поскольку его величина зависит от размера, числа пазов статорной обмотки, числа проводников в пазу и способа их разделения многослойной электроизоляцией, определение значения $\lambda_{эфф}$ также проводили численными методами.

Методика быстрого расчета максимальной температуры изоляции. Расчетная область состоит из корпуса ПЭД и статора, в котором заданы пазы и распределение изоляции и проводников обмотки внутри пазов. В этом случае коэффициент теплопроводности для всей системы определяется численно.

На границе корпус — скважинная жидкость задаются условия теплопередачи (8), на внутренней границе статора — тепловой поток от ротора (7).

Для того чтобы найти распределение температуры внутри расчетной области, решаем уравнение теплопроводности в твердой фазе (6).

Задача решалась в стационарной постановке в пакете ANSYS Thermal. Число конечных элементов в расчетной области было порядка 100 000. Сетка сгущалась внутри пазов статора (минимальный размер элемента 0,05 мм) и была более грубой в магнитопроводе статора (максимальный размер элемента 1 мм). Решение не зависело от степени дискретизации конечно-элементной сетки (была проведена оценка на сеточную сходимость).

Результаты расчетов. Для сравнения всех методик была выполнена серия из трех расчетов с разными охлаждающими жидкостями,

мощностями ПЭД, частотами вращения, скоростями и температурами охлаждающих жидкостей. Входные параметры представлены в табл. 1.

Таблица 1

Входные параметры для расчетов

Номер расчета	Охлаждающая жидкость	Температура охлаждающей жидкости, °С	Скорость охлаждающей жидкости, м/с	Частота вращения, об/мин	Мощность ПЭД, кВт
1	Вода	80	0,60	6000	397
2	Нефть ($\eta = 370$ сП, $b = 0\%$)	80	0,60	6000	397
3	Вода	25	0,07	3000	160

Поскольку самым нагретым в ПЭД является паз, сравнивали картины распределения температур по 1-й и 3-й методикам в изоляции, а также в статоре и корпусе (рис. 4–6).

Как видно из данных, представленных на рис. 4–6, были получены похожие картины распределения температур для всех трех вариантов: максимальная температура находится в пазу статора ближе к центру расчетной области; чем дальше от центра, тем температура ниже. Следует также отметить, что диапазоны температур были близки.

Полученные значения температур в пазу статора и на корпусе электродвигателя для всех трех методик приведены в табл. 2.

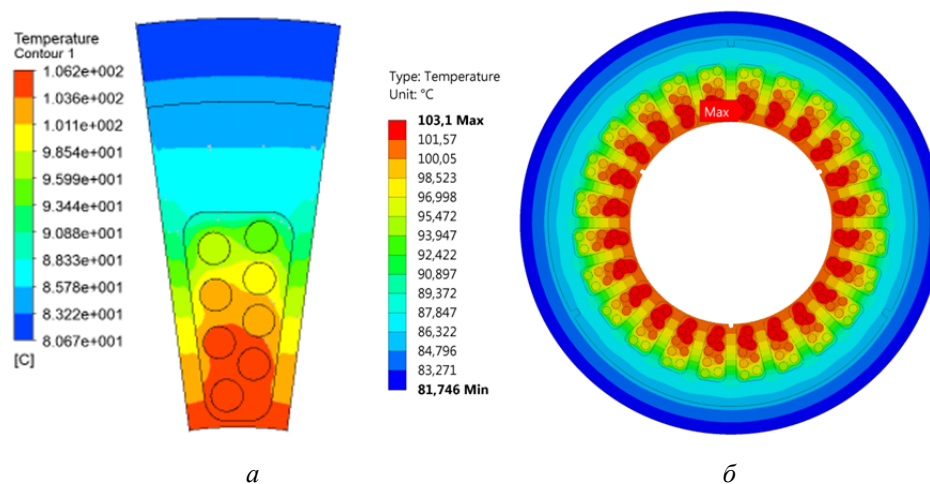


Рис. 4. Распределение температуры в поперечном сечении ПЭД. Расчет № 1: а — по методике 1; б — по методике 3

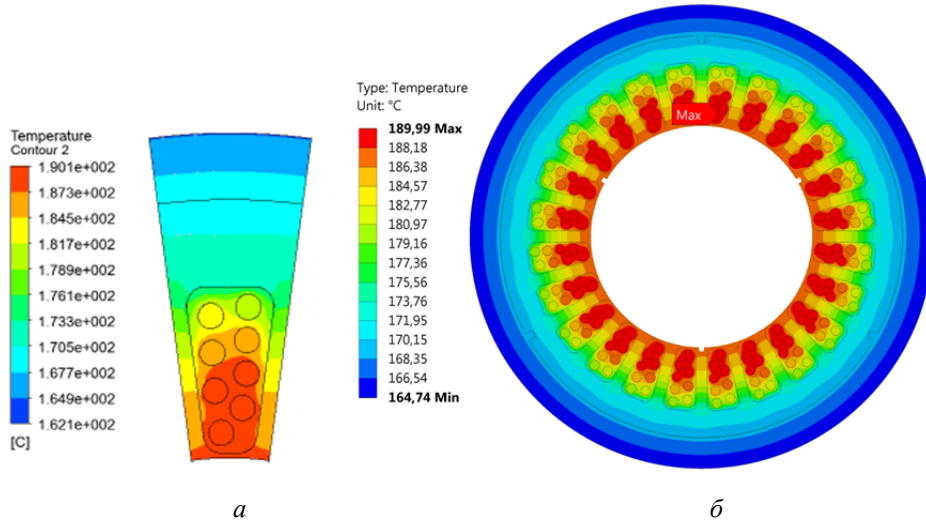


Рис. 5. Распределение температуры в поперечном сечении ПЭД. Расчет № 2:
 а — по методике 1; б — по методике 3

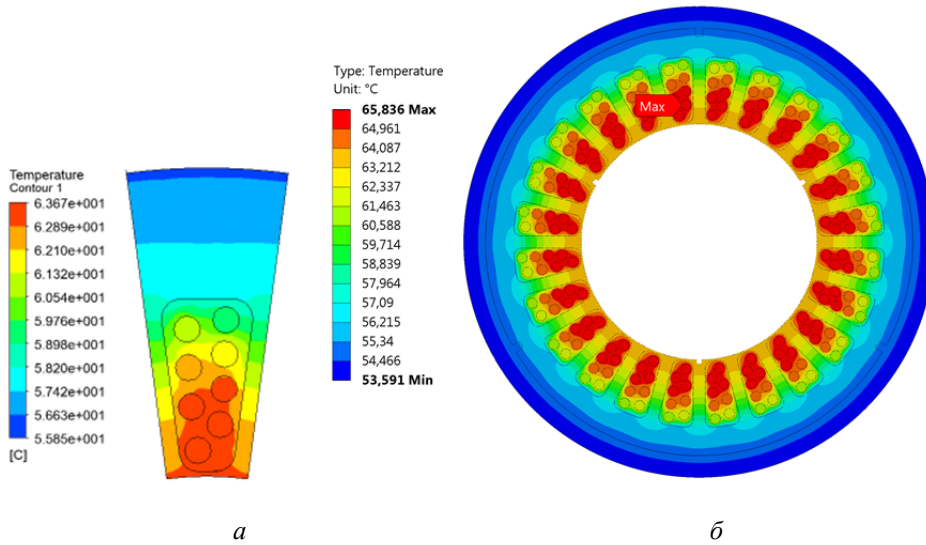


Рис. 6. Распределение температуры в поперечном сечении ПЭД. Расчет № 3:
 а — по методике 1; б — по методике 3

Таблица 2

Максимальная температура в пазу статора и на корпусе ПЭД

Расчет	Максимальная температура в пазу, °С			Температура на корпусе, °С		
	Методика № 1	Методика № 2	Методика № 3	Методика № 1	Методика № 2	Методика № 3
1	106,2	111,6	103,1	80,7	81,0	81,7
2	190,1	191,0	190,0	162,1	165,0	164,7
3	63,7	62,0	65,8	55,9	57,0	53,6

Данные табл. 2 позволяют сделать вывод, что при расчете по всем трем методикам получают близкие значения температур. Так, в случае применения методики № 2 максимальное относительное отклонение по температуре в пазу не превысило 5 %, по температуре на корпусе составило не более 2 %. При использовании методики № 3 максимальное относительное отклонение по температуре в пазу составило чуть более 3 %, по температуре на корпусе — не более 2 %.

Заключение. Предлагаемая методика быстрого теплового расчета ПЭД основана на аналитическом решении осредненных по поперечному сечению ПЭД уравнений теплопроводности и уравнений течения охлаждающей жидкости. Для того чтобы расчеты были быстрыми, использовали приближение об аксиальной симметрии конструкции ПЭД, а значит, применяли эффективный коэффициент теплопроводности. Этот коэффициент задавали двумя способами: по правилу смеси (методика 2) и с помощью численного моделирования элементов паза статора (методика 3).

CFD-метод и результаты стендовых испытаний ПЭД использовали для верификации разрабатываемой методики. Поскольку относительная разница температур лежит в пределах 3...5 %, можно отметить, что разработанная методика применима на стадии концептуального проектирования погружных электродвигателей.

С помощью методик, представленных в настоящей статье, можно быстро и с достаточной точностью рассчитывать большое количество различных вариантов геометрии ПЭД и выбирать из них оптимальные, что существенно облегчает разработку нового оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мельниченко В.Е. *Оценка влияния основных технологических характеристик добывающих скважин на ресурс погружных электроцентробежных насосов: дис. ... канд. техн. наук.* Москва, 2017, 161 с.
- [2] Мельниченко В.Е. Подходы к определению причин снижения надежности УЭЦН. *Бурение и нефть*, 2017, № 2, с. 16–21.
- [3] Язьков А.В. Исследование влияния изменения технологических параметров на охлаждение погружного электродвигателя. *Нефтепромысловое оборудование*, 2007, № 11, с. 125–125.
- [4] Купцов С.М. Температурное поле погружного электродвигателя скважинных насосных установок. *Территория нефтегаз*, 2010, № 4, с. 36–38.
- [5] Воловодов А.В. Расчет теплового режима скважины. *Экспозиция. Нефть. Газ*, 2018, № 6, с. 42–43.
- [6] Нугаев И.Ф., Байгускаров И.С., Стыскин А.В., Уразбахтина Н.Г. Динамическая модель тепловых процессов в погружном электродвигателе насосной установки нефтедобывающей скважины. *Электротехнические и информационные комплексы и системы*, 2014, т. 10, № 3, с. 38–44.
- [7] Язьков А.В., Росляк А.Т., Арбузов В.Н. Моделирование процесса теплообмена между трехфазным флюидом и погружным электродвигателем. *Нефтепромысловое дело*, 2007, № 10, с. 27–34.

- [8] Шмидт С.А., Люстрицкий В.М. Тепловой режим ПЭД в процессе освоения скважины, оборудованной УЭЦН. *Сб. тр. ин-та Гипровостокнефть*. Самара, Изд-во Гипровостокнефть, 2000, 73 с.
- [9] Staton D., Hawkins D., Popescu M. Practical Strategies for Improved Cooling of Electrical Motors and Generators. In: *The International Conference for Inductive and Electromagnetic Components, Systems and Devices including Manufacturing and Processing*, 2012.
- [10] Maiyuschenko A.V. Analysts of thermal state of traction brushless permanent motor for mine electric locomotive. *Electrical Engineering and Electromechanics*, 2016, no. 6, pp. 15–18. DOI: 10.20998/2074-272X. 2016.6.03
- [11] Рымша В.В., Процына З.П., Демьяненко С.К. Расчет двухмерного стационарного теплового поля вентильно-реактивного двигателя методом конечных элементов. *Электротехника и электромеханика*, 2010, № 4, с. 26–28.
- [12] Денисова А.С., Пещеренко С.Н., Пошвин Е.В. Тепловой режим работы погружного электродвигателя. *Бурение и нефть*, 2010, № 10, с. 46–48.
- [13] Денисова А.С., Пещеренко С.Н. Модель нестационарного теплоотвода от погружного электродвигателя. *Научные исследования и инновации*, 2010, т. 4, № 1, с. 114–117.
- [14] Гизатуллин Р.Р., Пещеренко М.П., Пещеренко С.Н. Моделирование теплоотвода от погружного электродвигателя с магнитной муфтой. *Тепловые процессы в технике*, 2019, т. 11, № 3, с. 106–114.
- [15] Морозкин В.П., Тодос П.И., Токарев Б.Ф. *Двигатели постоянного тока для подводной техники*. Москва, Энергия, 1977, 184 с.
- [16] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика*. Москва, Физматлит, 2001, 736 с.
- [17] Михеев М.А., Михеева И.М. *Основы теплопередачи*. Изд. 2-е, стереотип. Москва, Энергия, 1977, 344 с.
- [18] Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. *Теплопередача*. Москва, Энергия, 1981, 417 с.

Статья поступила в редакцию 03.08.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Гизатуллин Р.Р., Пещеренко С.Н., Шиверский А.В. Тепловой расчет погружных электродвигателей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 12. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-12-2036>

Гизатуллин Роман Ринатович — старший преподаватель кафедры ОФ, Пермский национальный исследовательский политехнический университет.
e-mail: Roman.Gizatullin@novometgroup.com

Пещеренко Сергей Николаевич — д-р физ.-мат. наук, заведующий кафедрой ФТПН, Пермский национальный исследовательский политехнический университет.

Шиверский Александр Владимирович — инженер по расчетам, инженерно-технический центр, АО «Новомет-Пермь».

Thermal calculation of submersible motors

© R.R. Gizatullin¹, S.N. Pescherenko¹, A.V. Shiverskiy²

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russia

²“Novomet-Perm”, Perm, 614065, Russia

The paper proposes a method of thermal calculation of submersible electric motors intended for use at the stage of their conceptual design. The model is based on the complete system of hydrodynamic equations averaged over the motor cross section and the annular channel through which coolant is pumped. All geometric dimensions and properties of the substance are set. The temperature distribution over the cross section and along the length of the motor is calculated. Two approximations are used. In the first one, the temperature distribution in the cross section of the electric motor was averaged over the corners, which requires setting an effective coefficient of thermal conductivity inside the stator grooves filled with winding wires and electrical insulation. In the second approximation, the heat transfer at the solid – liquid interface was specified through the empirical dependence of the Nusselt number on the Reynolds and Prandtl numbers. To verify the model, the results obtained were compared with calculations by the method of computational fluid dynamics in the ANSYS Fluent software package. The error in calculating the insulation temperature was not more than 5%.

Keywords: submersible motor, thermal calculations, heat transfer, computational fluid dynamics, ANSYS

REFERENCES

- [1] Melnichenko V.Ye. *Otsenka vliyaniya osnovnykh tekhnologicheskikh kharakteristik dobyvayushchikh skvazhin na resurs pogrzhnykh elektrosentrobezhnykh nasosov*. Diss. kand. tehn. nauk [Assessment of the influence of the main technological characteristics of production wells on the resource of submersible electric centrifugal pumps. Cand. eng. sc. diss.]. Moscow, 2017, 161 p.
- [2] Melnichenko V.Ye. *Burenie i nefi (Drilling and oil)*, 2017, no. 2. pp. 16–21.
- [3] Yazkov A.V. *Neftyanoe khozyaystvo — Oil Industry*, 2007, no. 11, pp. 125–125.
- [4] Kuptsov S.M. *Territoriya neftegaz — Oil and Gas Territory*, 2010, no. 4. pp. 36–38.
- [5] Volovodov A.V. *Ekspozitsiya nefi gaz — Exposition Oil & Gas*, 2018, no. 6. pp. 42–43.
- [6] Nugayev I.F., Bayguskarov I.S., Styskin A.V., Urazbakhtina N.G. *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekxy i sistemy (Electrical and information complexes and systems)*, 2014, vol. 10, no. 3, pp. 38–44.
- [7] Yazkov A.V., Roslyak A.T., Arbutov V.N. *Neftpromyslovoye delo — Oilfield Engineering*, 2007, no. 10, pp. 27–34.
- [8] Shmidt S.A., Lyustritskiy V.M. Teplovoy rezhim PED v protsesse osvoyeniya skvazhiny, oborudovannoy UETSN [Thermal mode of submersible electric motor during development of a well equipped with an ESP]. *Sbornik trudov instituta Giprovostokneft* [Proceedings of the Giprovostokneft Institute]. Samara, Giprovostokneft Publ., 2000, 73 p.
- [9] Staton D., Hawkins D., Popescu M. Practical Strategies for Improved Cooling of Electrical Motors and Generators. In: *The International Conference for Inductive and Electromagnetic Components, Systems and Devices including Manufacturing and Processing*, 2012.

- [10] Maiyuschenko A.V. Analysts of thermal state of traction brushless permanent motor for mine electric locomotive. *Electrical engineering and electromechanics*, 2016, no. 6, pp. 15–18. DOI: 10.20998/2074-272X. 2016.6.03
- [11] Rymsha V.V., Protsyna Z. P., Demyanenko S. K. *Elektrotehnika & elektromekhanika — Electrical engineering & Electromechanics*, 2010, no. 4, pp. 26–28.
- [12] Denisova A.S., Pescherenko S.N., Poshvin Ye.V. *Burenie i neft (Drilling and oil)*, 2010, no. 10, pp. 46–48.
- [13] Denisova A.S., Pescherenko S.N. *Nauchnyye issledovaniya i innovatsii (Research and innovation)*, 2010, vol. 4, no. 1, pp. 114–117.
- [14] Gizatullin R.R., Pescherenko M.P., Pescherenko S.N. *Teplovyye protsessy v tekhnike — Thermal Processes in Engineering*, 2019, vol. 11, no. 3, pp. 106–114.
- [15] Morozkin V.P., Todos P.I., Tokarev B.F. *Dvigateli postoyannogo toka dlya podvodnoy tekhniki [Motors for underwater equipment]*. Moscow, Energia Publ., 1977, 184 p.
- [16] Landau L.D., Lifshitz E.M. *Teoreticheskaya fizika. T. VI. Gidrodinamika [Course of theoretical physics. Vol. VI. Hydrodynamics]*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001, 736 p.
- [17] Mikheev M.A., Mikheeva I.M. *Osnovy teploperedachi [Fundamentals of heat transfer]*. Moscow, Energia Publ., 1977, 344 p.
- [18] Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha [Heat transfer]*. Moscow, Energia Publ., 1981, 417 p.

Gizatullin R.R., Assist. Professor, Department of General Physics, Perm National Research Polytechnic University. e-mail: Roman.Gizatullin@novometgroup.com

Pescherenko S.N., Dr. Sc. (Phys.-and Math.), Head of the Department of Physical and Technological Problems of Oil Production, Perm National Research Polytechnic University.

Shiverskiy A.V., CAE engineer, Engineering and Technology Center, “Novomet-Perm”.