

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

e-mail: Roman.Gizatullin@novometgroup.com

Аннотация

Предложена методика теплового расчета погружных электродвигателей, 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. Первое: распределение температуры в сечении электродвигателя осредняли по углам, что требует задания эффективного коэффициента теплопроводности внутри пазов статора, заполненных проводами обмотки и электроизоляцией. Второе: теплопередачу на границе твердое тело - жидкость задали 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

Момент сил, создаваемый погружными электродвигателями (ПЭД), определяются взаимодействием вращающегося магнитного поля статора с постоянными магнитами на роторе (в вентильных двигателях) или с индуцированным магнитным полем ротора (в асинхронных двигателях). А время их безотказной работы зависит, главным образом, только от температуры электроизоляции статорной обмотки, которая может быть найдена как стационарное решение тепловой задачи. Источниками тепла являются электромагнитные потери в стали и проводах статора, а также механические потери на внутреннее трение в зазоре ротор – статор и подшипниках. В современных ПЭД мощности электромагнитных и механических потерь примерно равны.

В настоящее время примерно в 30% случаев отказов электроцентробежной погружной установки для добычи нефти происходит из-за отказа ПЭД по причине перегрева его электроизоляции [1-3], что

указывает не недостаточную точность тепловых расчетов, выполняемых при их проектировании.

Существует большое количество методик тепловых расчетов погружных электродвигателей, как аналитических [4-8], так и с помощью методов численного моделирования [9-11]. Аналитические методики основаны на уравнениях теплопроводности, теплообмена и представляют ПЭД в упрощенном виде (в качестве цилиндра). Для задания тепловых потерь берутся суммарные потери, хотя в каждой части (проводники, ротор, статор, корпус) они разные. В большинстве источников учитывается теплообмен между двигателем и охлаждающей жидкостью, но элементы ПЭД изготавливаются из разных материалов (проводники из меди, ротор и статор из стали, пазы заполняются изоляционным материалом и т.д.), которые имеют разные теплофизические свойства, влияющие на передачу тепла от проводников в паз, из паза в статор, из статора в корпус, из корпуса в охлаждающую жидкость, поэтому необходимо учитывать теплообмен и между этими элементами ПЭД.

Методики для численного моделирования чаще всего реализованы в рамках специализированного ПО. Рассмотрим некоторые из них. Программный комплекс Motor-CAD имеет модуль для теплового расчета, который включает в себя модели цепей с сосредоточенными параметрами для расчета потерь и метод конечных элементов для оптимизации систем охлаждения машин и вывода полей температур. Тем самым в данном ПО реализована связка сразу двух методов численного моделирования [9].

Аналогичный прием был применен в программном комплексе для моделирования и разработки электрических устройств JMAG Designer [10]. Однако чаще всего специализированное ПО включает лишь один способ расчета. Например, классический метод конечных элементов был реализован в программном комплексе для расчета электромагнитных и тепловых задач ELCUT [11].

Методы вычислительной гидродинамики (CFD) позволяют решать тепловые задачи для ПЭД как в стационарной [12], так и нестационарной [13] постановках, но они весьма трудоемки. Требуется задание полной 3D модели ПЭД. Построение подробной расчетной сетки и наличие высокопроизводительного компьютера, что необходимо для реализации подобного расчета. Типичное время, для выполнения такой работы составляет несколько суток.

При проектировании ПЭД варьируются до десятка параметров. Поскольку число уровней варьирования должно быть таким, чтобы иметь возможность выбрать оптимальное значение, т.е. порядка 5–7, то общее число сравниваемых конструкции будет $5^{10} - 7^{10}$, или порядка 10 – 100 миллионов вариантов. Столько же потребуется провести тепловых расчетов, поэтому ресурсоемкие CFD методы не применяются при проектировании электродвигателей.

В данной работе применили CFD метод только для тестирования разрабатываемых быстрых методик теплового расчета. Методом CFD был проведен расчет ПЭД-130. Для его верификации использовали результаты

стендовых испытаний этого электродвигателя. Результаты расчета и измерения максимальной температуры изоляции отличались не более чем на 6%.

Предложены две методики быстрого теплового расчета. Первая методика основана на аналитическом решении осредненных по поперечному сечению ПЭД уравнений теплопроводности и течения охлаждающей жидкости. Конструкцию ПЭД считали аксиально симметричной. Данная методика позволяет вычислить среднюю температуру электроизоляции.

Вторая методика основана на численном решении уравнения теплопроводности в статоре ПЭД. Задавали подводимый поток тепла от ротора и поток тепла, отводимый охлаждающей жидкостью (коэффициент теплопередачи вычисляли методами подобия).

1. Методики расчета средствами вычислительной гидродинамики [14]

Поперечное сечение ПЭД имеет следующий вид, см. рис. 1. Статор содержит пазы, в которых размещаются провода статорной обмотки и электроизоляция. Ротор состоит из вала, магнитопровода ротора и четырех постоянных магнитов.

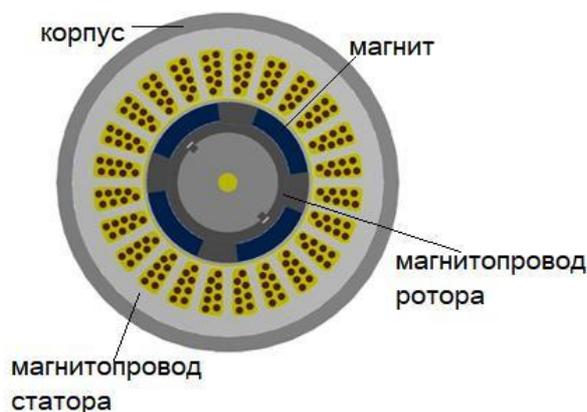


Рис. 1. Поперечное сечение ПЭД

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

Кольцевой канал между ротором и статором и центральный канал в вале ротора заполнены маслом. Боковая поверхность корпуса ПЭД и нижний торец корпуса омываются скважинной жидкостью.

Расчет течения и теплопередачи в жидкости вели в RANS приближении с использованием SST модели турбулентности. Строили структурированную гексаэдрическую сетку со сгущением в пристеночных областях до $y^+ < 5$ и числом элементов ~ 650000 (рис. 2).

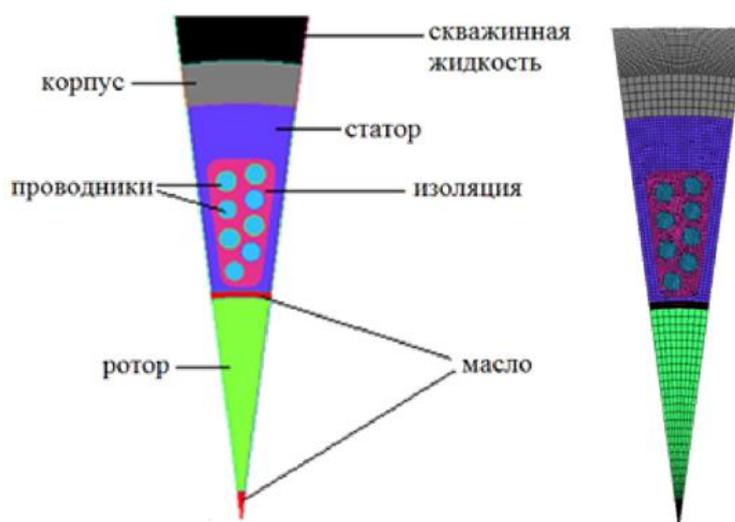


Рис. 2. CFD методика

Слева – расчетная область, справа – расчетная сетка

Использовали следующие граничные условия: на входе в расчетную область задавали расход и температуру жидкости, на выходе из нее — открытая граница и нулевое давление.

Задавали следующие источники тепла: в объеме жидкости (тепловыделение за счет внутреннего трения), в медных проводниках, находящихся в пазу статора (омические потери), выделение тепла в

магнитопроводах статора и ротора и магнитах ротора. Задавали вращение ротора с частотой 6000 об/мин, статор неподвижен.

2. Методика быстрого расчета средней температуры изоляции и магнитопровода статора

Считали, что расчетная область аксиально-симметричная (рис. 3). Расчетная область состоит из кольцевого слоя, заполненного скважинной жидкостью, корпуса ПЭД и статора. Статор также считали аксиально-симметричным в поперечном сечении (рис. 3): R_1 и R_4 — внутренний и внешний радиусы магнитопровода статора. В кольцевом слое R_2 , R_3 расположены пазы статорной обмотки, разделенные зубцами магнитопровода, на рис. 3 не показаны (считаем эту область также аксиально-симметричной).

Электродвигатель имеет длину L , располагается соосно обсадной колонне и охлаждается скважинной жидкостью с температурой T_0 и подачей Q .

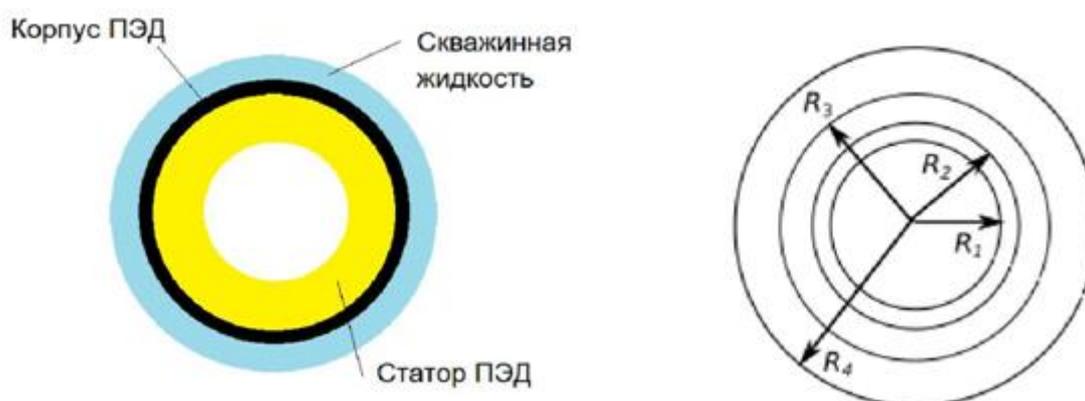


Рис. 3. Методика быстрого расчета средней температуры изоляции
Слева – расчетная область, справа – модель магнитопровода статора

Осредненные уравнения течения жидкости

Поскольку скорость охлаждающей жидкости много меньше скорости звука, то жидкость несжимаемая. Течение аксиально-симметричное $\bar{v} = (v_r, v_\varphi, v_x) = (0, 0, v)$, тогда из уравнения непрерывности [15] следует:

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

Уравнение Навье–Стокса принимает следующий вид [15]:

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

осреднив его по сечению перпендикулярному скорости:

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

получим:

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

где

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

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

где F_{mp} – 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 корпус ПЭД – обсадная колонна

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

При турбулентном течении обычно считают $\tau \sim \langle v \rangle^2$, см. например [16],

тогда

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

Осредненное уравнение теплопроводности в жидкости

Жидкость течет в зазоре R_k – корпус электродвигателя и R_d – стенка обсадной колонны, и постепенно нагревается теплом, получаемым от электродвигателя, имеет следующий вид [17,18]:

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

поскольку $\bar{v} = (0, 0, v(t, r))$, $T = T(t, r, x)$, то

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

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

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

$$q = \frac{\eta}{\pi(R_k^2 - R_d^2)} \int_{R_d}^{R_k} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T}{\partial r} 2\pi r dr,$$

q – тепло, передаваемое от электродвигателя в единицу объема жидкости за единицу времени (эффективный объемный источник тепла).

Поскольку кольцевой канал, по которому течет охлаждающая ПЭД жидкость, обычно узкий, то $T(t, r, x) = const(r)$, 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

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

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

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

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 $q\Delta tLS$, L – длина канала, S – площадь его поперечного сечения, q – эффективный объемный источник тепла.

- отдает энергию $\Delta mc_p(T_2 - T_1) = \rho Sv\Delta t c_p(T_2 - T_1)$, $T_2 = T(L)$ – температура жидкости на выходе из канала, следовательно

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

второе граничное условие имеет вид $T(L) = T_2$.

Тогда из (4) следует

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

температура жидкости линейно возрастает при ее движении по кольцевому каналу, который образован стенками обсадной колонны и поверхностью ПЭД.

Уравнение теплопроводности в твердой фазе внутри статора

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 – объемная плотность источников тепла.

Его решение в установившемся режиме для аксиально симметричной расчетной области и при отсутствии объемных источников тепла

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

при наличии объемного источника тепла $q = \text{const}$

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

Граничные условия:

- на внутренней границе статора $r = R_1$, (рис. 3) задан поток тепла от ротора в статор

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

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

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

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{R_d} = \alpha (T_{4d} - T_{liq}) \Big|_{R_d}. \quad (8)$$

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

d – гидродинамический диаметр канала.

Число Нуссельта вычисляли следующим образом [19]:

- для ламинарного течения, $Re < 2300$

$$Nu = 0.17 Re^{0.33} Pr_{cp}^{0.43} Gr^{0.1} \left(\frac{Pr_{liq}}{Pr_k} \right)^{0.25},$$

$$Re \Big|_{T_{liq}} = \frac{ud}{\nu \Big|_{T_{liq}}}, \quad Pr \Big|_{T_{liq}} = \frac{\nu \Big|_{T_{liq}}}{\chi \Big|_{T_{liq}}}, \quad Pr \Big|_{T_d} = \frac{\nu \Big|_{T_d}}{\chi \Big|_{T_d(R_d)}},$$

- для турбулентного течения $Re \in (2300, 10^4)$

$$Nu = 0.0008 Re^{0.9} Pr_{cp}^{0.43},$$

- для турбулентного течения $Re > 10^4$

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr_{cp}^{0.4}.$$

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

Максимальная температура обмотки статора вычисляется по методике, изложенной ниже.

3. Методика быстрого расчета максимальной температуры изоляции

При проектировании нового устройства важно уметь быстро изменять геометрию и заново оценивать его работоспособность. Как следствие из выше сказанного, появляется потребность в быстром способе пересчета. В данной статье описывается способ численного расчета, который можно применять именно в таких целях.

Расчетная область состоит из корпуса ПЭД и статора, в котором заданы пазы и распределение изоляции и проводников обмотки внутри пазов.

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

Распределение температуры внутри расчетной области находим из решения уравнения теплопроводности в твердой фазе (6).

Задача решалась в стационарной постановке в пакете Ansys Thermal. Число конечных элементов в расчетной области было порядка 100000. 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 (оценка на сеточную сходимость была проведена).

4. 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 таблице 1.

Таблица 1. Входные параметры

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 местом в ПЭД является паз, сравнивали картины распределения температур по 1-ой и 3-ей методиками в изоляции, а также статоре и корпусе (рис. 4-6).

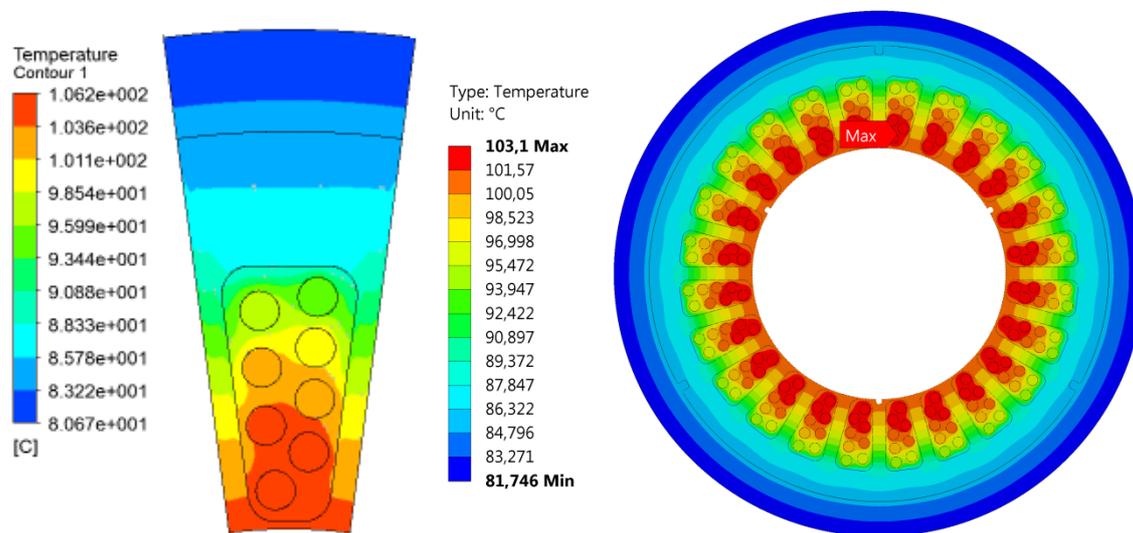


Рис.4. Распределение температуры в поперечном сечении ПЭД. Расчет № 1.

Слева – методика 1, справа методика 3

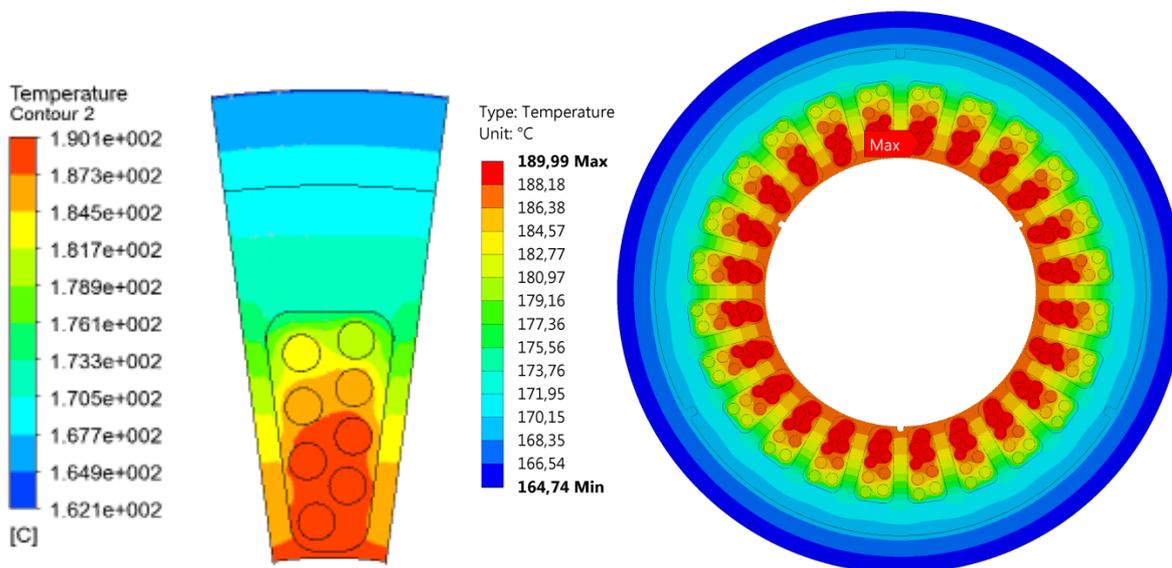


Рис.5. Распределение температуры в поперечном сечении ПЭД. Расчет № 2.

Слева – методика 1, справа методика 3

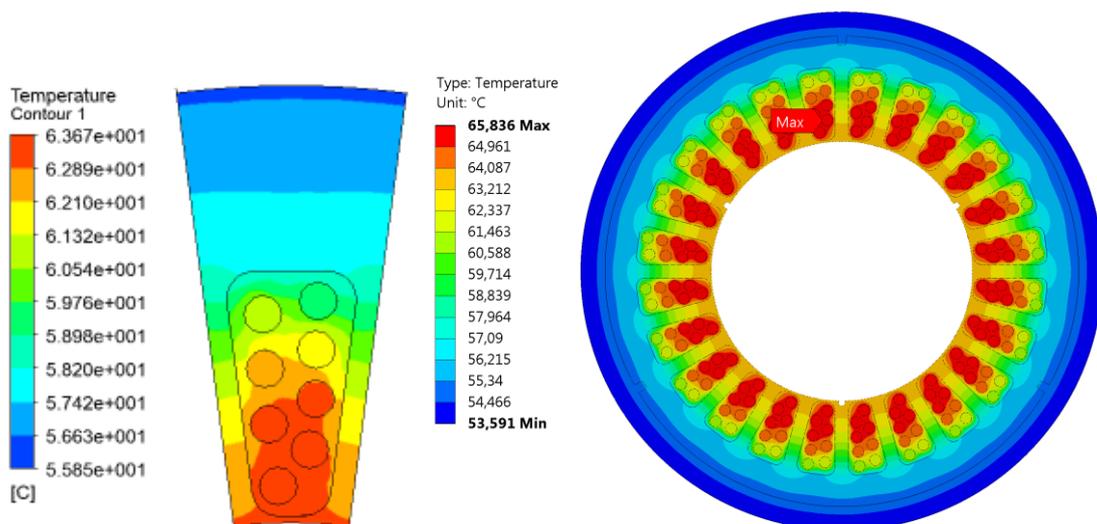


Рис.6. Распределение температуры в поперечном сечении ПЭД. Расчет № 3.

Слева – методика 1, справа методика 3

Как видно из рис. 4-6, получили 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. Также нужно отметить, что диапазоны температур были близки.

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

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

Из таблицы видно, что все три методики получают близкие значения температур. Так для методики № 2 максимальное относительное отклонение по температуре в пазу не превысило 5%, по температуре на корпусе

составило не более 2%. Для методики № 3 максимальное относительное отклонение по температуре в пазу составило чуть более 3%, по температуре на корпусе не более 2%.

Заключение

В данной статье приведены методики ускоренного расчета температуры погружных электродвигателей. Проведено качественное и количественное сравнение результатов методик с результатами CFD моделирования [14], которые в свою очередь верифицированы с испытаниями. Поскольку относительная разница температур лежит в пределах 3-5%, то разработанные методики могут быть применимы на стадии концептуального проектирования погружных электродвигателей.

Список литературы

1. Мельниченко В.Е. Оценка влияния основных технологических характеристик добывающих скважин на ресурс погружных электроцентробежных насосов: диссертация кандидата технических 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. 73с.
9. Dave Staton, Douglas Hawkins and Mircea Popescu: «Practical Strategies for Improved Cooling of Electrical Motors and Generators Dave Staton», Motor Design Ltd., Ellesmere, SY12 0EG, U.K
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. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. М.: Физматлит. 2001. 736 с.
16. Попов Д.Н., Панайотти С.С., Рябинин М.В. Гидромеханика: Учеб. для вузов/ Под ред. Д.Н. Попова. 2-е изд., стереотип. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 384 с., ил.: (Сер. Механика в техническом университете; Т. 6).
17. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М., «Энергия», 1977, 344 с. с ил.
18. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача.— М.: Энергия, 1981. — 417 с.

19. Арутюнов В.А., Крупенников С.А., Сборщиков Г.С. Теплофизика и теплотехника: Теплофизика: Курс лекций. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2010 – 228 с.

Сведения об авторах

Гизатуллин Роман Ринатович, старший преподаватель каф. ОФ, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Roman.Gizatullin@novometgroup.com.

Пещеренко Сергей Николаевич, доктор физ.-мат. наук, заведующий каф. ФТПН, Пермский национальный исследовательский политехнический университет.

Шиверский Александр Владимирович, инженер-расчетчик, инженерно-технический центр, АО «Нововет-Пермь».

Thermal calculation of submersible motors

© R.R. Gizatullin¹, S.N. Peshcherenko¹, A.V. Shiverskiy²

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm 614990, Russia

²«Novomet-Perm», Perm 614065, Russia

e-mail: Roman.Gizatullin@novometgroup.com

Abstract

The method of thermal calculation of submersible electric motors is proposed, 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. First: 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. Second: 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 elektrotsentrobezhnykh nasosov. Diss. kand. tehn. Nauk. Moscow, 2017. 161 p.
2. Melnichenko V.Ye. Podkhody k opredeleniyu prichin snizheniya nadezhnosti UETSN. Burenie & neft. 2017. № 2. pp. 16-21.

3. YAzkov A.V. Issledovaniye vliyaniya izmeneniya tekhnologicheskikh parametrov na okhlazhdeniye pogruzhnogo elektrodvigatelya. Neftepromyslovoye oborudovaniye. 2007, no 11, pp. 125-125.
4. Kuptsov S.M. Temperaturnoye pole pogruzhnogo elektrodvigatelya skvazhinnykh nasosnykh ustanovok. Territoriya neftegaz. 2010, no 4. pp. 36-38.
5. Volovodov A.V. Raschet teplovogo rezhima skvazhiny. Ekspozitsiya nefte gaz. 2018, no 6. pp. 42-43.
6. Nugayev I.F., Bayguskarov I.S., Styskin A.V., Urazbakhtina N.G. Dinamicheskaya model teplovykh protsessov v pogruzhnom elektrodvigatele nasosnoy ustanovki neftedobyvayushchey skvazhiny. Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy. 2014, vol. 10, no 3, pp. 38-44.
7. YAzkov A.V., Roslyak A.T., Arbuzov V.N. Modelirovaniye protsessa teploobmena mezhdru trekhfaznym flyuidom i pogruzhnym elektrodvigatelem. Neftepromyslovoye delo. 2007, no 10. pp. 27-34.
8. Shmidt S.A., Lyustritskiy V.M. Teplovoy rezhim PED v protsesse osvoyeniya skvazhiny, oborudovannoy UETSN. Samara, Giprovostokneft, 2000, 73 p.
9. Dave Staton, Douglas Hawkins and Mircea Popescu: «Practical Strategies for Improved Cooling of Electrical Motors and Generators Dave Staton», Motor Design Ltd., Ellesmere, SY12 0EG, U.K

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., Dem'yanenko S. K. Raschet dvukhmernogo stacionarnogo teplovogo polya ventil'no-reaktivnogo dvigatelya metodom konechnykh elementov. *Elektrotehnika & elektromekhanika*. 2010, no 4. pp. 26-28.
12. Denisova A. S., Peshcherenko S. N., Poshvin Ye.V. Teplovoy rezhim raboty pogruzhnogo elektrodvigatelya. *Bureniye & nef't*. 2010, № 10, pp. 46-48.
13. Denisova A. S., Peshcherenko S. N. Model' nestatsionarnogo teplootvoda ot pogruzhnogo elektrodvigatelya. *Nauchnyye issledovaniya i innovatsii*. 2010, vol. 4, no 1, pp. 114-117.
14. Gizatullin R.R., Peshcherenko M.P., Peshcherenko S.N. Modelirovaniye teplootvoda ot pogruzhnogo elektrodvigatelya s magnitnoy muftoy. *Teplovyye protsessy v tekhnike*. 2019, vol. 11. no 3, pp. 106-114.
15. Landau L.D., Lifshitz E.M. *Teoreticheskaya fizika. T. VI. Gidrodinamika* [Course of theoretical physics. VI. Hydrodynamics]. Moscow: Fizmatlit, 2001. 736 p. In Russ.
16. Popov D.N., Panaiotti S.S., Ryabinin M.V. *Gidromekhanika*. Moscow, Bauman Moscow State University, 2002. — 384 p.

17. Mikheyev M.A., Mikheyeva I.M. Osnovy teploperedachi. Moscow, Energiya Publ., 1977, 344 p.
18. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Teploperedacha. Moscow, Energiya Publ., 1981, 417 p.
19. Arutyunov V.A., Krupennikov S.A., Sborshchikov G.S. Teplofizika & teplotekhnika: Teplofizika. Moscow, NUST MISIS Publ., 2010, 228 p.

About authors

Gizatullin Roman Rinatovich, Senior Lecturer, Department of General Physics, Perm National Research Polytechnic University, Roman.Gizatullin@novometgroup.com.

Peshcherenko Sergey Nikolayevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department, Perm National Research Polytechnic University.

Shiverskiy Aleksandr Vladimirovich, CAE engineer, Engineering and Technology Center, «Novomet-Perm».