

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.

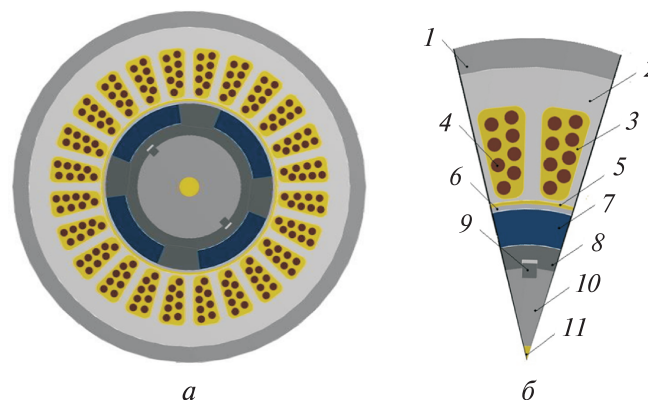


Рис. 1. Поперечное сечение погружного электродвигателя:

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 методов 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 $N_{\text{ж}}$ (в зазоре ротор — статор), трение в радиальных подшипниках $N_{\text{п}}$, нагрев проводников статорной обмотки N_R (омические потери) и потерь на вихревые токи $N_{\text{в}}$ (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-

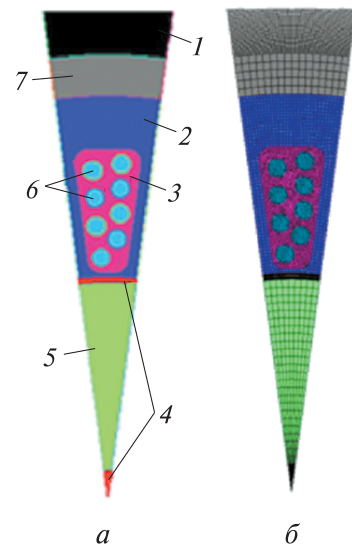


Рис. 2. CFD-методика:
а — расчетная область; б — расчетная сетка; 1 — скважинная жидкость; 2 — статор; 3 — изоляция; 4 — масло; 5 — ротор; 6 — проводники; 7 — корпус