

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ЧАСТОТЫ ПОДВОДИМОГО ТОКА И НАЛИЧИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩЕГО СЛОЯ**

**М.Ц. Жалсанов, Е.И. Кухаренко**

Научный руководитель - профессор С.Н. Харламов

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

Введение. Известно, что около 80 % добычи нефти в России осуществляется с помощью погружных электроцентробежных насосов (УЭЦН) [1]. Данное оборудование играет огромную роль в нефтяной отрасли. Поэтому задачи исследование этого оборудования, моделирование процессов, связанных с его работой, являются актуальными на сегодняшний день. В данной работе объектом исследования является составной элемент УЭЦН – погружной электродвигатель.

Цель работы - моделирование температурного поля электродвигателя, а также поведения этого поля при изменении частоты подводимого тока и образовании на поверхности двигателя загрязняющего слоя.

Режим работы установки контролируется и изменяется с помощью станции управления (СУ). На СУ можно регулировать частоту переменного тока, подводимого к ПЭД с поверхности. Мощность двигателя линейно зависит от частоты [2]:

$$N = N_{50} \cdot \frac{F}{50} (Bm) \quad (1)$$

где: N – расчетная мощность;  $N_{50}$  – мощность при 50 Гц, F – частота Гц.

Изменение частоты для отечественных двигателей возможно в диапазоне 40 – 60 Гц [2]. Очевидно, что при изменении мощности будет изменяться количество теплоты, выделяемое двигателем. В связи с изменением выделяющегося количества теплоты будет изменяться температурное поле ПЭД.

В процессе эксплуатации ПЭД на его поверхности будет происходить осаждение смол, парафинов и др. Эти элементы будут образовывать на поверхности двигателя загрязняющий слой. Наличие загрязняющего слоя также будет приводить к дополнительному термическому сопротивлению, что в свою очередь, приведет к нагреву двигателя.

Моделирование. Итак, для моделирования температурного поля ПЭД необходимо строить математическую модель на основе которой будет решаться задача. И задать конкретные численные параметры двигателя и среды, в которой он эксплуатируется. Для начала необходимо определить теоретические, физические предпосылки для решения. Для моделирования температурного поля необходимо допустить упрощения.

Предполагается, что погружной электродвигатель является однородным сплошным стальным цилиндром. Все процессы не зависят от времени – стационарны. Жидкость, омывающая двигатель, – нефть.

Тогда задача решается на основе уравнения Пуассона [1-3]:

$$\nabla^2 t + \frac{q_v}{\lambda} = 0 \quad (2)$$

Где:  $q_v$  - объемная плотность внутренних источников теплоты, Вт/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности материала цилиндра, Вт/(м\*К).

Далее, необходимо сформулировать уравнение (2) для цилиндрической системы координат, произвести интегрирование. Константы интегрирования найдутся из граничных условий третьего рода [3]:

$$\begin{cases} r = 0; \left(\frac{dt}{dr}\right)_{r=0} = 0 \\ r = r_0; \left(\frac{dt}{dr}\right)_{r=r_0} = -\frac{\alpha}{\lambda}(t_c - t_{жк}) \end{cases} \quad (3)$$

Где:  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>\*К);  $t_c$  - температура поверхности цилиндра (стенке);  $t_{жк}$  - средняя температура жидкости;  $r_0$  - радиус цилиндра;

После проведения всех преобразований получаем [3]:

$$t = t_{жк} + \frac{q_v r_0}{2\alpha} + \frac{q_v}{4\lambda} (r_0^2 - r^2) \quad (4)$$

С помощью (4) возможно рассчитать температурное поле двигателя при отсутствии загрязняющего слоя, в случае наличия такого слоя (толщиной  $\delta$ ) необходимо учесть дополнительное термическое сопротивление:

$$t = t_{жк} + \frac{Q}{2\pi l(r_0 + \delta)\alpha} + \frac{Q}{2\pi\lambda l} \ln \frac{r_0 + \delta}{r_0} + \frac{Q}{4\pi r_0^2 \lambda} (r_0^2 - r^2) \quad (5)$$

Где: L – длина цилиндра.

Далее, необходимо задать условия среды, параметры скважины, среды и параметры самого двигателя.

Для придания большего практического веса данной работе были взяты параметры скважины и среды близкие к реальным, после чего к данным условиям был подобран ПЭД с помощью методики П.Д. Ляпкина [4]. Часть необходимых параметров была взята из справочников [4,5,6]. Все параметры сведены в таблицу (Рис. 1):

**СЕКЦИЯ 17. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСПОРТИРОВКИ И ХРАНЕНИЯ НЕФТИ И ГАЗА. ПОДСЕКЦИЯ 1. МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТРАНСПОРТА И ХРАНЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ**

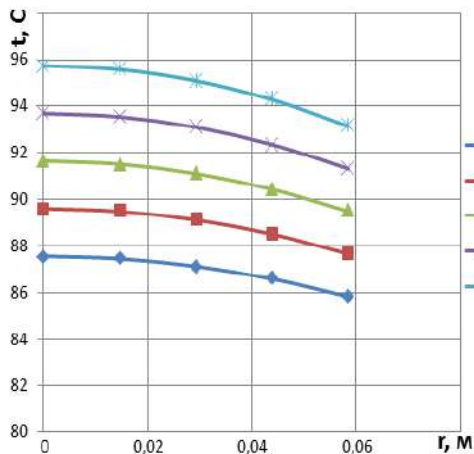
**Таблица 1**

**Данные для расчета**

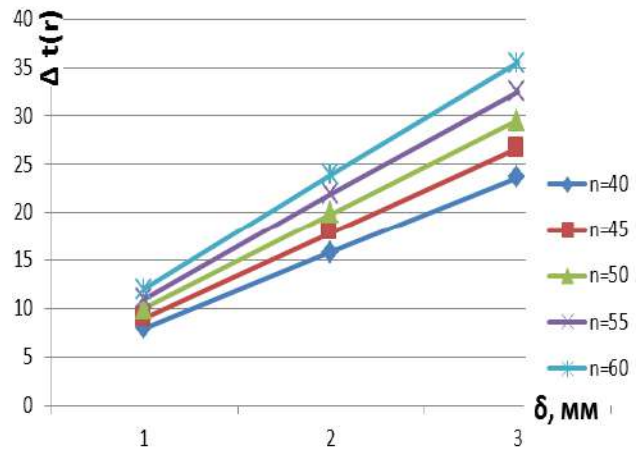
Вт/(м*К)	Вт/(м*К)	Вт/(м*К)	Вт/(м*К)	l, м	N, Вт	КПД	G, м3/с
$\lambda_{\text{параф}}$	$\lambda_{\text{битум}}$	$\lambda_1$	$\lambda$				
0,267	0,47	0,3685	52	3,64	28000	0,845	0,001157407
$\rho_{\text{ж}}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\nu$ , м <sup>2</sup> /с	$\mu$ Па*с	$R_{\text{обс}}$ , м	$r_0$ , м	$\alpha$ , Вт/м <sup>2</sup> *К	$C_p$ , Дж/(кг*К)	$t_{\text{ж1}}$ , К
880	$2,3 \cdot 10^{-6}$	0,002024	0,08485	0,0585	210	2100	70

Где:  $\lambda_{\text{параф}}$ - коэффициент теплопроводности парафина,  $\lambda_{\text{битум}}$  – коэффициент теплопроводности битума,  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности загрязняющего слоя,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности ПЭД (сталь),  $l$ - длина,  $N$  – мощность,  $G$  – объемный расход жидкости,  $\rho_{\text{ж}}$ - плотность жидкости (чистая нефть),  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости,  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости,  $R_{\text{обс}}$ - радиус проходного канала обсадной колонны,  $r_0$ - радиус ПЭД,  $\alpha$ - коэффициент теплоотдачи,  $C_p$ - удельная теплоемкость нефти,  $t_{\text{ж1}}$ - температура жидкости под двигателем.

По приведенным данным с помощью формул 4, 5 был произведен расчет температурного поля. Расчет производился для различных значений частот (40, 45, 50, 55, 60 Гц) и различных значений толщины слоя (1-3 мм). В ходе расчета получен ряд графиков:



**Рис.1 График зависимости температуры двигателя от радиуса при разных частотах**



**Рис.2 Зависимости увеличения температуры в произвольной точке r внутри двигателя от толщины загрязняющего слоя при разных частотах**

Выводы. По данным рисунка 2 можно заключить, что температура внутри ПЭД увеличивается с повышением частоты (примерно на 2 градуса каждые 5 Гц). Так же при увеличении частоты возрастает значение перегрева между осью двигателя и его стенкой. Из рисунка 3, видно, что при работе на одной и той же частоте в случае оседания 1 мм загрязнителя температура поднимается довольно сильно (около 8 градусов). При увеличении частоты, прирост температуры возрастает, скорость прироста также увеличивается.

В заключении отметим, что поставленная цель в работе была достигнута. Расчет выполнен со значительными допущениями. Однако может быть использован в качестве оценочного. В целом, зависимости, полученные в работе, не противоречат данным с производства.

**Литература**

1. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти: Учебное пособие для вузов. – М: М71 ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 816 с. ISBN 5-7246-0234-2.
2. Потапов А.В. Инструкция по запуску, выводу на режим и эксплуатации скважин, оборудованных УЭЦН. – Томск: 2010.
3. Теплопередача. Учебник для вузов. / Исаченко В.П, Осипова В.А, Сукомел А.С., – 3 изд. – М.: Энергия, 1975.
4. Ляпков, П.Д. Подбор установки погружного центробежного насоса к скважине / П.Д. Ляпков Н.Н. – М.: МИНГ.
5. Купцов С.М. Температурное поле погружного электродвигателя скважинных насосных установок // Территория нефтегаз. - 2010. - №4. – С. 36 - 38.
6. Справочные материалы для решения задач по курсу "Тепломассообмен", Бухмиров В.В., Ракутина Д.В., Солнышкова Ю.С. и др. – Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2009. (парафин, сталь)