

# Термостойкий погружной электродвигатель



**Е. В. ПОШВИН**  
директор департамента  
инновационных разработок

ЗАО «Новомет–Пермь»  
poshvin@novomet.ru

**Предложена технология объемного компаундирования обмотки погружных электродвигателей. Сравнительные стендовые испытания показали снижение перегрева обмотки на ~ 7 – 10°. Эксплуатационные испытания дали увеличение среднего времени безотказной работы с 700 до 980 сут., т. е. на 40%.**

## HEAT-PROOF SUBMERSIBLE ELECTRICAL MOTOR

E. POSHVIN CJSC Novomet-Perm

The technology for volumetric compounding of submersible electrical motor windings is suggested.

Key Words: heat-proof submersible electrical motor, technology of submersible electrical motor volumetric compounding

**В** последнее время в связи с увеличением глубины скважин возросла температура добываемой жидкости. Из-за широкого применения технологии интенсификации нефтедобычи путем снижения забойного давления ниже давления насыщения возросла концентрация свободного газа и ухудшился теплоотвод от погружных электродвигателей (ПЭД). Кроме того, дополнительный нагрев изоляции происходит из-за перегрузки ПЭД при подклинивании насоса, которое вызвано выносом породы или проппанта.

Поскольку увеличилась рабочая температура обмоток статоров, то возросла вероятность пробоя изоляции и выхода ПЭД из строя. Ведь по статистике перегрев изоляции всего на 10°C уменьшает срок ее службы примерно в 2 раза. Эффективным способом повышения ресурса ПЭД в таких условиях является увеличение термостойкости и теплопроводности электроизоляционных материалов, уменьшение вероятности формирования между слоями изоляции полостей, заполненных газом.

## НОВЫЙ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ И ТЕХНОЛОГИЯ ЕГО НАНЕСЕНИЯ

Основными рабочими характеристиками изоляции являются ее теплопроводность, термостойкость (т. к. тепло, выделяемое в проводах статорной обмотки, отводится в окружающую среду через изоляцию) и электрическое сопротивление.

Для повышения теплопроводности обмотки ее обычно пропитывают лаком, который имеет высокий класс термостойкости, хорошую адгезию ко всем материалам, применяемым при производстве статора и высокую эластичность. Пропитки исключают перемещение проводников обмотки относительно друг друга. Жаропрочность применяемого лака составляет 20 000 час. при 215°C и 40 000 час. при 205°C. Коэффициент теплопроводности 0,23 – 0,28 Вт/м К.

Однако при лакировании образуются несплошности в виде воздушных включений. Поскольку воздух обладает меньшей теплопроводностью, это приводит к увеличению перегрева изоляции и снижению ее сопротивления. Кроме того, уменьшается механическая прочность изоляции, что приводит к ускорению износа обмотки за счет трения.

Для увеличения стойкости к перегревам изоляции вместо лака был применен более теплопроводный и термостойкий материал – двухкомпонентный компаунд. Его отличительные особенности: более высокая теплопроводность по сравнению с лаком до 0,4 Вт/м К, (в том числе – за счет введения наполнителя SiO<sub>2</sub>), высокая диэлектрическая прочность и жаропрочность (20 000 час. при 240°C).

В отличие от других российских производителей, которые обмотку статора пропитывают компаундом, компания «Новомет» осуществляет объемное компаундирование обмотки, так называемое «капсулирование» [1]. Данная технология позволяет получать монолитную конструкцию изоляции обмоток без воздушных включений. Внешний вид обмотки показан на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид компаундированной обмотки статора ПЭД



Компаундирование серийно изготавливаемых двигателей осуществляется с помощью специально разработанного оборудования – шкафа токовой сушки. Он позволяет в автоматическом режиме поддерживать необходимый ток сушки и равномерный нагрев статора по всей длине, кроме того, без вмешательства оператора реализовывать алгоритм ступенчатого увеличения температуры. Для извещения оператора о необходимости выполнить какое-либо действие вручную разработана система оповещения. Предусмотрено удаленное управления токовыми, температурными и временными режимами процесса сушки, а также – контроль давления воздуха в рукаве расточки статора.

### СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ СТАТОРА

Были проведены сравнительные стендовые испытания компаундированного и лакированного ПЭДН63-117 в скважинных условиях, имитирующих эксплуатационные. Измерялась зависимость нагрева обмотки статора относительно температуры охлаждающей жидкости от потребляемой мощности при различных скоростях охлаждающей жидкости (воды).

Средняя температура обмоток вычислялась по замеренному сопротивлению (использовали известную зависимость сопротивления материала проводов от температуры).

При замере сопротивления в холодном состоянии оба электродвигателя находились в нерабочем состоянии более 6 часов. За температуру обмотки при этом принимали температуру окружающей среды в момент измерения сопротивления. Каждое сопротивление измерялось 3 раза при различных значениях постоянного тока, не превышающего 5% от номинального. За действительное сопротивление принимали среднее арифметическое из всех измеренных значений. Сопротивление замерялось между каждой парой линейных выводов.

Замер сопротивления в нагретом состоянии осуществлялся на той паре фаз, омическое значение сопротивления которой являлось средним из всех проведенных замеров в холодном состоянии. Замер проводился 6 раз (через каждые 10 сек). В качестве нагрузки электродвигателя использовался генератор (по схеме – с возвратом энергии в сеть). Испытания проводились при 5 различных нагрузках в пределах от холостого хода до  $1,2P_{ном}$  при скоростях охлаждающей жидкости (воды), равных 0,05 и 0,3 м/с.

Зависимость нагрева обмотки статора относительно температуры охлаждающей жидкости от потребляемой мощности при различных скоростях жидкости представлена на рис. 2,3. Как видно из рисунков, нагрев компаундированного двигателя был в среднем меньше, чем лакированного, на 7 – 10°.

Стационарная задача о нагреве ПЭД имеет следующий вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{R_2} = \alpha (T - T_0) \Big|_{R_2}, \quad (1)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{R_1} = \frac{q}{2\pi R_1},$$

где  $\lambda$ ,  $\alpha$  – коэффициенты теплопроводности и теплопередачи,  $T_0$  – температура охлаждающей жидкости,  $q$  – выделение тепла на единицу длины ПЭД,  $R_2$ ,  $R_1$  – радиус ПЭД и внутренний радиус статора соответственно. Считаем слабой зависимостью температуры от азимутального угла и длины ПЭД. Решение этой задачи имеет следующий вид:

$$T(r) - T_0 = \frac{q}{2\pi R_2} \left( \frac{1}{\alpha} - \frac{R_2}{\lambda} \ln \frac{r}{R_2} \right), \quad (2)$$

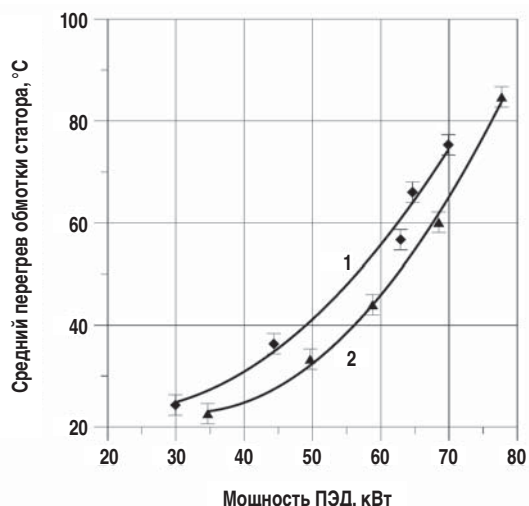


Рис. 2. Зависимость среднего перегрева обмоток статора от развиваемой мощности ПЭД 63-117 при скорости охлаждающей жидкости 0,05 м/с: 1 – лакированный, 2 – компаундированный

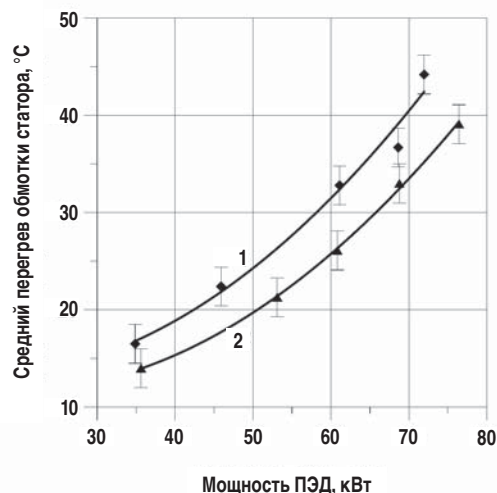


Рис. 3. Зависимость среднего перегрева обмоток статора от развиваемой мощности ПЭД 63-117 при скорости охлаждающей жидкости 0,3 м/с: 1 – лакированный, 2 – компаундированный

откуда следует, что перегрев обмотки статора относительно охлаждающей жидкости должен быть пропорционален  $q$  – количеству тепла, выделяемого на единицу длины ПЭД. Однако из рис. 2 и 3 видно, что до мощности ПЭД ~60 кВт зависимость действительно близка к линейной ( $q$  равняется мощности ПЭД, умноженной на  $1-\eta$ ,  $\eta$  – КПД). При дальнейшем увеличении мощности перегрев  $q$  возрастает нелинейно, что обусловлено увеличением электрического сопротивления проводов и «железа» статора с ростом температуры.

Если аппроксимировать линейной функцией первые три точки (соответствующие малым мощностям ПЭД) зависимостей 1 и 2, приведенных на рис. 3, то видно, что прирост перегрева статора из-за зависимости  $q(T)$  составляет примерно 5°.

Достоверность данных, представленных на рис. 2 и 3, подтверждается обоснованностью примененной нами и описанной выше методики. Дополнительно в достоверности этих данных можно убедиться следующим образом: рассчитаем по зависимости (2) и данным, приведенным на рис. 2 и 3, эффективный коэффициент теплопроводности  $\lambda$  и сравним с его оценкой, получаемой по значениям теплопроводности и толщинам слоев стали и электроизоляции в статоре.

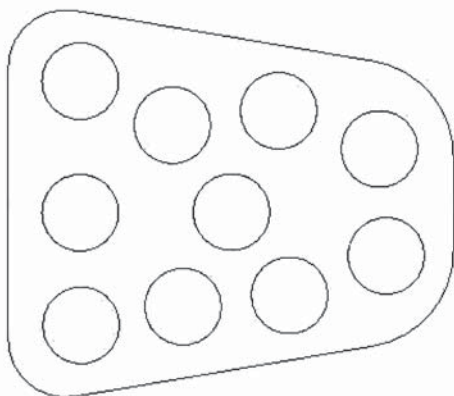


Рис. 4. Типичный вид расположения проводников (d = 2 мм) в пазе статора

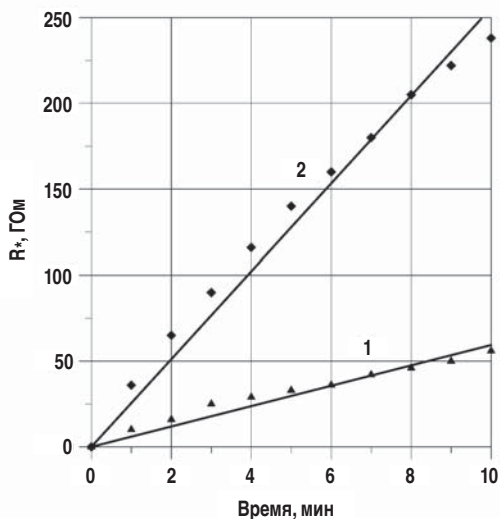


Рис. 5. Зависимость измеренного сопротивления  $R = E/I$  от времени: 1 – для лакированного, 2 – для компаундированного ПЭД63-117

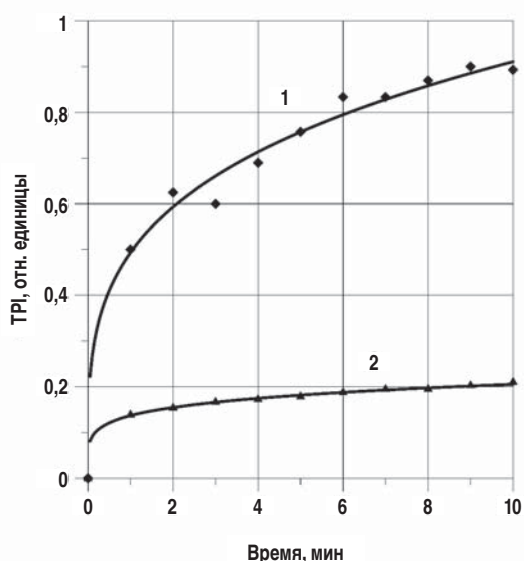


Рис. 6. Зависимость обобщенного индекса поляризации TPI от времени: 1 – для лакированного, 2 – для компаундированного ПЭД63-117

Начнем с определения типа течения жидкости в кольцевом канале вокруг ПЭД. Для этого вычислим гидравлический диаметр  $d$  этого канала [2] (равный частному от деления его учетверенной площади на периметр). Поскольку внешний диаметр кольцевого канала 14,8 см, внутренний – 11,7 см, то  $d=3$  см. Число Рейнольдса  $Re = (d \cdot u) / \nu$ , для скоростей  $u = 0,05$  м/с и  $0,3$  м/с, кинематической вязкости  $\nu = 0,01$  см<sup>2</sup>/с и диаметра  $d = 3$  см будет равно 1600 и 9300 соответственно, а значит [2] течение является турбулентным.

Коэффициент теплопередачи  $\alpha$  для турбулентного течения вычисляли по зависимости [2]:

$$\alpha = \frac{\lambda_{ж}}{d} \cdot 0,021 \cdot Re^{0,8} Pr_0^{0,43} \left( \frac{Pr_0}{Pr} \right)^{0,25}, \quad (3)$$

где  $Pr_0 = 3,59$  число Прандтля при температуре на входе  $50^\circ\text{C}$ ;  $Pr = 2,4$  – число Прандтля при средней температуре поверхности ПЭД  $75^\circ\text{C}$  и скорости жидкости  $0,05$  м/с,  $Pr = 2,8$  – число Прандтля при средней температуре поверхности ПЭД  $65^\circ\text{C}$  и скорости жидкости  $0,3$  м/с;  $\lambda_{ж} = 0,64$  Вт/(м·град.) – коэффициент теплопроводности жидкости. Получили:  $\alpha_{0,05} = 296$  Вт/м<sup>2</sup> град и  $\alpha_{0,3} = 1195$  Вт/м<sup>2</sup> град.

Из рис. 2 и 3 взяли значения  $T - T_0$  при мощности 60 кВт (55 и  $45^\circ\text{C}$  при скорости  $0,05$  м/с и 32 и  $25^\circ\text{C}$  при  $0,3$  м/с для лакированного и компаундированного ПЭД соответственно). Из уравнения (2) при  $q = 1900$  Вт/м, получили:  $\lambda = 5 \pm 1$  Вт/м град для лакированного ПЭД и  $\lambda = 6,5 \pm 1$  Вт/м град для компаундированного.

Эффективный коэффициент теплопроводности  $\lambda$  равен [2]:

$$\lambda = \ln(R_2/R_1) / [1/\lambda_{ст} \ln(R_1 + \Delta/R_1) + 1/\lambda_{ре} \ln(R_2/R_1 + \Delta)], \quad (4)$$

где  $\Delta$  толщина изоляции,  $\lambda_{ре} = 45,4$  Вт/м град коэффициент теплопроводности стали,  $\lambda_{ст}$  коэффициент теплопроводности изоляции. Подставив в (4) найденные значения  $\lambda$ , нашли, что  $\Delta \approx 1$  мм как в лакированном, так и компаундированном ПЭД, что вполне разумно (рис. 4). Таким образом, мы получаем дополнительное подтверждение данных, представленных на рис. 2 и 3.

Выражение, аналогичное (4), позволяет оценить влияние несплошностей изоляции, заполненных воздухом с  $\lambda_{в} = 0,03$  Вт/м град:

$$\lambda = \ln(R_2/R_1) / [1/\lambda_{ст} \ln(R_1 + \Delta/R_1) + 1/\lambda_{в} \ln(R_1 + \Delta + a/R_1 + \Delta) + 1/\lambda_{ре} \ln(R_2/R_1 + \Delta + a)], \quad (5)$$

где  $a$  радиальная толщина воздушной прослойки. Табуляция зависимости (5) показала, что воздушные прослойки с  $a \leq 0,02$  мм практически не влияют на величину эффективного коэффициента теплопроводности, а значит, не приводят к значимому изменению перегрева изоляции. Согласованность расчетов эффективного коэффициента теплопроводности по (2), (3) и результатов стендовых испытаний с оценкой (4) указывает на то, что в разработанной нами технологии опасные воздушные прослойки не возникали.

#### ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

В настоящее время считается, что основной причиной отказов электрических машин является разрушение изоляции вследствие воздействия на нее электрического поля и вибрации, протекающих в ней химических реакций. Другими словами – диэлектрическая жизнь изоляции короче термической [3] – [4].

В процессе эксплуатации электрических машин меняется структура материала изоляции. В последнее время

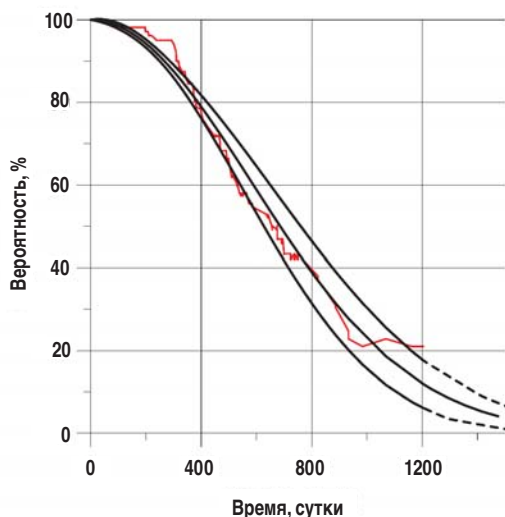


Рис. 7. Зависимость вероятности безотказной работы лакированных ПЭД от времени

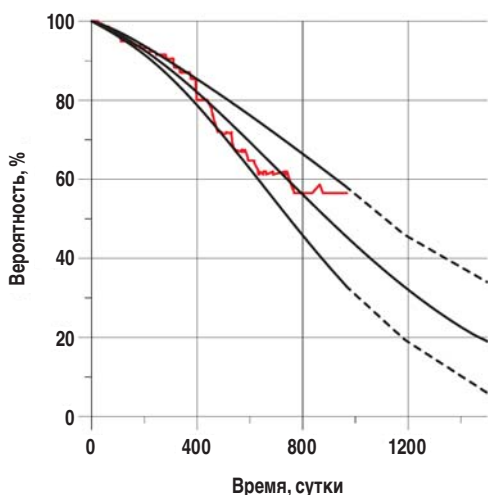


Рис. 8. Зависимость вероятности безотказной работы компаундированных ПЭД от времени

был предложен ряд критериев, характеризующих эти изменения: индекс поляризации  $PI = R_{\text{при } 10 \text{ мин.}} / R_{\text{при } 1 \text{ мин.}}$ , коэффициент диэлектрической абсорбции  $DAR = R_{\text{при } 1 \text{ мин.}} / R_{\text{при } 30 \text{ сек.}}$ , коэффициент диэлектрического разряда  $DD = I_{\text{при } 1 \text{ мин.}} / ES$  и др. Используются обозначения:  $R = E/I$  измеренное сопротивление,  $C$  – емкость изоляции. Обычно испытания проводят, подключая источник постоянной ЭДС ( $E = 5 \text{ кВ}$ ) между проводниками статора и корпусом ПЭД. Измеряют зависимость тока  $I$  в цепи от времени  $t$ .

На рис. 5 приведена зависимость измеренного сопротивления  $R$  от времени для лакированного и компаундированного ПД63-117.

Из рис. 5 видно, что для компаундированного ПЭД  $PI = 240/35 = 6,9$ , для лакированного  $PI = 55/10 = 5,5$ , т. е. диэлектрическая прочность компаундированного ПЭД выше.

Поскольку на малых временах зависимость  $I(t)$  характеризует диэлектрические свойства изоляции, на больших – ее сопротивление, то возникла потребность в структурно чувствительном критерии, который не был бы привязан к измерению тока в какой-то определенный момент времени. В [5] был введен обобщенный индекс поляризации (total polarization index)  $TPI = t \cdot I(t)_{\text{MAX}}$ .

На рис. 6 приведена зависимость  $TPI$  от времени для лакированного и компаундированного ПЭД 63-117. Откуда

видно, что для лакированного ПЭД максимальное значение  $TPI$  соответствует  $t = 9$  мин, компаундированного  $t \approx 10$  мин. В процессе эксплуатации значение  $TPI(t) = TPI_{\text{MAX}}$  будет уменьшаться [4] и при некотором критическом значении произойдет разрушение изоляции. Отличие текущего значения  $TPI_{\text{MAX}}$  от критического определяет остаточный ресурс изоляции ПЭД выходит за рамки данной статьи, посвященной, в основном, термостойкости и теплопроводности изоляции.

### ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

На рис. 7 и 8 приведена зависимость вероятности безотказной работы от времени для лакированных и компаундированных ПЭД.

Красным цветом показаны результаты обработки эксплуатационных данных. Верхняя и нижняя сплошные линии – границы доверительных интервалов. Пунктиром показан прогноз. Обработка данных велась по методике [6].

Для лакированных ПЭД зависимость была вычислена по результатам испытаний 122 двигателей. За время работы отказали 36 двигателей. Среднее время безотказной работы  $T_m = 700 \pm 70$  сут. при доверительной вероятности 90%.

Эксплуатационные испытания провели на 310 компаундированных двигателях. Отказали 35. Среднее время безотказной работы  $T_m = 980 \pm 200$  сут.

Доверительные интервалы для  $T_m$  не перекрывались, следовательно, эксплуатационная надежность компаундированных ПЭД была достоверно выше, чем лакированных.

### Выводы

1. Разработана и внедрена в серийное производство автоматизированная технология компаундирования ПЭД.
2. Стендовые испытания показали, что перегрев обмоток статора при этом снизился примерно на  $10^\circ\text{C}$  в сравнении с лакированными ПЭД.
3. Эксплуатационные испытания показали, что среднее время безотказной работы лакированных ПЭД составляло 700 сут., а компаундированных – 980 суток.

### Литература

1. Патент RU 2330372 C1, Н 02 К 15/12, 27.07.2008, бюл. №2.
2. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М: Энергия. 1977. 344 с.
3. Чернышев В.А., Сафроненков Ю.Ф., Гордиловский А.А., Чернов В.А. Современные подходы к оценке состояния изоляции электрических машин высокого напряжения // Электротехника, 2008. №4.
4. Чернышев В.А., Зенова Е.В., Чернов В.А., Рыбников Д.А., Хостанцев А.Ю. Обобщенный индекс поляризации как параметр контроля состояния изоляционных промежутков силовых трансформаторов // IV Международная конференция «Силовые трансформаторы и системы диагностики» 23 – 24 июня 2009 г.
5. Prevost T.A. Transformer Insulation Upgrading and Loading Guide Equations. Panel Session IEEE Transformer Committee Insulation Life Subcommittee. October 25, 2005.
6. Слепченко С.Д. Оценка надежности УЭЦН и их отдельных узлов по результатам промышленной эксплуатации. Автореферат дисс. канд. техн. наук. М.: Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина. 2011. 22 с.

**Ключевые слова:** термостойкий погружной электродвигатель, технология объемного компаундирования ПЭД