



# Прогнозирование энергоэффективности УЭЦН

## PREDICTION OF ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC-CENTRIFUGAL PUMPS RIG

I. ZOLOTARYOV, S. PESHCHERENKO, YE. POSHVIN, «Novomet-Perm» CSC

The authors present development experience of efficiency computing methods of elements of typical electric-centrifugal pumps' rigs and their energy efficiency as a whole.

Keywords: «Novomet-Perm» CSC, electric-centrifugal pumps rigs, energy efficiency of electric-centrifugal pumps rigs, efficiency of elements of electric-centrifugal pumps' rigs, power losses

Одним из критериев эффективности добычи нефти установками электроцентробежных насосов (УЭЦН) является величина удельного расхода энергии, например, на тонну добытой продукции. Поскольку добыча пластовой жидкости заключается в передаче ей энергии для транспортировки из пласта на поверхность, то энергоэффективностью добычи является отношение энергии, необходимой для подъема жидкости, к затраченной энергии, т. е. КПД УЭЦН.

В основном, энергия расходуется на работу насоса (ЭЦН) и погружного электродвигателя (ПЭД), хотя потери энергии в предвключенных устройствах, а также в кабеле, трансформаторе и др., также значимы, и их необходимо учитывать в общем балансе энергии. Кроме того, имеет место взаимное влияние элементов УЭЦН. Так, при увеличении потребления энергии, например, ЭЦН, – растут потребление ПЭД, потери в кабеле, трансформаторе и др.

Современная УЭЦН представляет собой линейную цепь последовательно соединенных элементов: станции управления, повышающего трансформатора, кабельной линии, ПЭД, предвключенных устройств (газосепаратора, диспергатора, мультифазного насоса, сепаратора мехпримесей и др.) и ЭЦН. Обозначим через  $N_0$  мощность, поступающую на вход первого элемента УЭЦН (станции управления), а через  $N_1$  мощность, передаваемую от первого элемента – второму. Через  $N_n$  обозначим мощность на выходе с последнего элемента (ЭЦН). Тогда выражение для КПД УЭЦН можно записать следующим образом:

$$\eta = \frac{N_n}{N_0} = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{N_2}{N_3} \cdot \dots \cdot \frac{N_{n-1}}{N_n} \cdot \frac{N_n}{N_0} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_{n-1} \cdot \eta_n, \quad (1)$$

где  $\eta_i$  – КПД  $i$ -го элемента УЭЦН. Из (1) следует, что по критерию энергоэффективности добычи лучшей будет УЭЦН, в

которой максимально произведение КПД отдельных ее элементов. Поскольку КПД элементов (см. выше) могут быть взаимосвязаны, нужна методика расчета, учитывающая как условия работы УЭЦН, так и взаимосвязь КПД элементов. Разработка такой методики и проведение ряда расчетов энергоэффективности типичных УЭЦН стали целью данной работы.

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА КПД ЭЛЕМЕНТОВ УЭЦН

#### КПД ЭЦН и предвключенных устройств

Мощность, передаваемая от насоса к жидкости  $N_{out} = \rho g H Q + \Delta P \cdot Q + \Delta N_{тр}$  где  $\Delta P$  – заданное избыточное давление, создаваемое на устье скважины (его величина порядка 20 атм),  $\Delta N_{тр}$  – потери на трение в НКТ. Поскольку обычно  $\rho g H Q \gg \Delta N_{тр}$ , то КПД ЭЦН вычисляется следующим образом:

$$\eta_{ESP} = \frac{\rho g H(Q) \cdot Q + \Delta P \cdot Q}{N_{in}(Q)}, \quad (2)$$

где  $N_{in}$  – мощность, потребляемая насосом,  $Q$  – подача,  $H$  – напор, создаваемый насосом,  $\rho$  – плотность жидкости,  $g$  – ускорение свободного падения.

Напор и мощность, потребляемые насосом, являются функциями  $Q$ ,  $\rho$  и свойств рабочей жидкости. Обычно в каталогах фирм, производителей ЭЦН, приводятся зависимости  $H$  и  $N_{in}$  от подачи  $Q$ , полученные в испытаниях на воде при  $n = 3000$  или  $3500$  об/мин, и от частоты вращения  $n$ , вычисленные из данных этих испытаний в предположении, что  $Q \sim n$ ,  $H \sim n^2$ ,  $N_{in} \sim n^3$ .

В [1] показано, что использование зависимости  $H \sim n^2$  приводит к относительной ошибке  $\pm 1-2\%$ , а зависимости  $N_{in} \sim n^3$  к ошибке  $\pm 5-7\%$ .

Влияние вязкости скважинной жидкости обычно учитывают по корреляци-

**И.В. ЗОЛОТАРЕВ**,  
начальник группы  
математического  
моделирования ДИР

**С.Н. ПЕЩЕРЕНКО**,  
д.ф.-м.н., начальник ИТЦ ДИР  
PSN@novomet.ru

**Е.В. ПОШВИН**,  
директор ДИР  
ЗАО «Новомет-Пермь»

*Авторы представляют  
опыт разработки  
методики проведения  
расчетов КПД элементов  
типичных УЭЦН и  
энергоэффективности  
УЭЦН в целом.*



онным зависимостям [2 – 6]. Согласно [7] это приводит к относительной ошибке ±10 – 25%.

Потери энергии в предвключенных устройствах обычно не превышают 1 – 2 кВт, что много меньше типичного значения мощности, потребляемой ЭЦН. Поэтому обычно эти потери можно не учитывать. Если же требуется высокая точность прогноза энергоэффективности УЭЦН, необходимо знать величину этих потерь, которые, в настоящее время, приводят далеко не все компании их изготавливающие.

#### КПД погружных электродвигателей

По определению, КПД равен отношению механической мощности на валу ПЭД к потребляемой из электрической сети:

$$\eta_M = \frac{N_{2M}}{N_{2M} + \Delta N_{LOST}(N_{2M})}, \quad (3)$$

где  $N_{2M}$  – мощность на валу двигателя,  $N_{LOST}$  – суммарные потери в двигателе. Обычно по данным, приводимым производителями ПЭД, можно установить зависимость  $N_{LOST}$  от мощности, потребляемой из сети, а значит, и от  $N_{2M}$ .

При расчете необходимо учитывать, что мощность на валу двигателя  $N_{2M}$  равна суммарной мощности, потребляемой всеми устройствами, приводимыми в движение: гидрозащитой, ЭЦН, предвключенными устройствами (газосепаратором, диспергатором, мультифазным насосом, сепаратором механических примесей и др.). А некоторые из устройств создают напор.

#### КПД станции управления

В настоящее время КПД станции управления определяется производителями как постоянная величина, указанная для номинального режима работы станции. Поскольку режим работы станции управления выбирается таким образом, чтобы не превышать максимальное значение тока при любых допустимых значениях загрузки двигателя, то потери энергии в станции управления будут ограничены и не превысят справочного значения.

#### КПД трансформатора

Потери в трансформаторе характеризует КПД трансформатора, равный отношению мощности, передаваемой из трансформатора в кабельную линию  $N_{1K}$ , к мощности, поступающей на его первичную обмотку  $N_{1K} + \Delta N_T$ :

$$\eta_T = \frac{N_{1K}}{N_{1K} + \Delta N_T}, \quad (4)$$

где  $\Delta N_T$  – мощность, теряемая в трансформаторе. Если выразить  $\Delta N_T$  через параметры трансформатора, см. Приложение 1, получим:

$$\eta_T = \frac{N_{1K}}{N_{1K} + N_{xx} \left( \frac{U_{HM} + \Delta U_K(N_{1M})}{U_{2H}} \right)^2 + N_{K3} \left( \frac{I_M(N_{1M}) U_{2H}}{I_{1H} U_{1H}} \right)^2}, \quad (5)$$

где  $N_{1K}$  – мощность, потребляемая на входе кабеля,  $N_{xx}$  – потери холостого хода трансформатора,  $N_{K3}$  – потери трансформатора в опыте короткого замыкания,  $U_{HM}$  – номинальное напряжение двигателя,  $\Delta U_K$  – падение напряжения на кабеле (зависит от потребляемой двигателем мощности, см. Приложение 2),  $U_{2H}$  – напряжение отпайки,  $I_M$  – ток, потребляемый двигателем (зависимость от потребляемой мощности обычно приводится производителем),  $I_{1HM}$ ,  $U_{1H}$  – номинальные ток и напряжение в первичной обмотке,  $U_{2H}$  – напряжение отпайки.

Поскольку в основе этой формулы лежит эмпирическая зависимость, то ошибка в расчетах будет определяться точностью измерительных приборов и точностью аппроксимации экспериментальной зависимости и будет составлять не более 1%.

#### Потери в кабеле

При определении КПД кабеля полезной является мощность, поступающая на вход ПЭД, т. е.  $N_{1M} = N_{2M} + \Delta N_{LOST}$  см. (3). Обозначив потери в кабеле через  $\Delta N_K$ , получим следующее выражение для КПД кабеля:

$$\eta_K = \frac{N_{1M}}{N_{1M} + \Delta N_K}. \quad (6)$$

Если выразить потери в кабеле  $\Delta N_K$  через его характеристики (см. Приложение 2), то

$$\eta_K = \frac{N_{1M}}{N_{1M} + n_c I_M^2 (N_{1M}) \cdot \frac{\rho \cdot L_K}{S_K} (1 + \alpha_T (T_K - T_0))}, \quad (7)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление меди при температуре  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ , составляет 0,0175 Ом·мм<sup>2</sup>/м,  $L_K$  – длина кабеля, м,  $S_K$  – площадь сечения жилы кабельной линии, мм<sup>2</sup>,  $\alpha_T$  – температурный коэффициент сопротивления меди, равный 0,004 1/°C,  $T_K$  – абсолютное значение температуры жилы, °C,  $n_c$  – число жил кабеля, обычно равняется трем,  $I_M$  – ток, потребляемый двигателем (зависимость от потребляемой мощности обычно приводится производителем).

Поскольку в основе этой формулы лежит температурная зависимость сопротивления меди, то в диапазоне температур от  $-50^\circ\text{C}$  до  $+200^\circ\text{C}$  эта зависимость почти линейная и погрешность метода не превышает 1% [8].

### ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ КПД УЭЦН РАЗЛИЧНОЙ КОМПЛЕКТАЦИИ

Будем считать заданными напор и подачу насоса. Зафиксируем частоту вращения вала ( $n = 2910$  об/мин), и будем считать, что рабочая жидкость – вода. Пусть кабель имеет длину 950 м и применяется трансформатор ТМГН-250 фирмы BIRZST, отпайка 2168 В, потери холостого хода 0,58 кВт, потери короткого замыкания 3,9 кВт.

Проведем расчет энергоэффективности, т. е. вычислим КПД для УЭЦН различной комплектации. Используются ЭЦН, имеющие одинаковую номинальную подачу и суммарный напор, но разный КПД: ВНН5А-100 (кол-во ступеней 125) и ВНН5А-100Э (кол-во ступеней 228), асинхронный ПЭДН63-117 и вентильный ПВЭДН63-117. Все компоненты производства ЗАО «Новомет-Пермь». Также будем использовать некоторое гипотетическое предвключенное устройство (ПУ), потребляющее 1 кВт, чтобы оценить влияние таких устройств на общий КПД УЭЦН. В расчете КПД

Табл. Результаты расчета КПД различной комплектации

	$\eta_{ESP}$	$\eta_M$	$\eta_K$	$\eta_T$	$\eta$
АД+ ВНН	0.595	0.713	0.967	0.976	0.39
ВД+ ВНН	0.595	0.905	0.990	0.982	0.51
АД+ ВННЭ	0.612	0.707	0.967	0.976	0.40
ВД+ ВННЭ	0.612	0.904	0.989	0.982	0.53
АД+ ВНН+ПУ	0.595	0.725	0.968	0.977	0.40
ВД+ ВНН+ПУ	0.595	0.908	0.988	0.983	0.51
АД+ ВННЭ+ПУ	0.612	0.719	0.968	0.977	0.41
ВД+ ВННЭ+ПУ	0.612	0.907	0.989	0.983	0.53



используется станция управления СУ-160, имеющая КПД, равный 0,98.

Из результатов расчетов, приведенных в табл., видно, что КПД установки с вентильным двигателем выше на 31%, чем УЭЦН с асинхронным ПЭД, если используется обычный насос. В случае применения энергоэффективного насоса КПД установки при использовании вентильного двигателя выше на величину 32% по сравнению с асинхронным. Использование вентильного двигателя в совокупности с энергоэффективным насосом дает улучшение энергоэффективности на 36% по сравнению с обычной комплектацией (асинхронный двигатель + обычный насос).

Кроме того, видно, что в некоторых случаях (например, АД+ВНН  $\eta = 0.39$  и АД+ВНН+ПУ $\eta = 0.4$ ) использование предвключенных устройств дает увеличение значения общего КПД. Это объясняется следующим: предвключенное устройство не забирает энергию из потока передаваемой жидкости, а увеличивает нагрузку на валу двигателя. А поскольку для выбранного оборудования рабочая точка двигателя была выбрана левее максимума соответствующей кривой, то дополнительная нагрузка сдвинула рабочую точку вправо, что привело к увеличению КПД двигателя и увеличению КПД УЭЦН. Этот пример показывает важность оценки КПД в комплексе, с учетом влияния отдельных компонентов друг на друга.

## Выводы

1. Поскольку добыча пластовой жидкости заключается в передаче ей энергии для транспортировки из пласта на поверхность, то энергоэффективностью добычи естественно считать отношение энергии, необходимой для подъема жидкости, к затраченной энергии, т. е. КПД УЭЦН.

2. Предложены формулы для расчета КПД отдельных элементов УЭЦН: насоса, предвключенных устройств, ПЭД, кабеля, трансформатора, станции управления. Оценена точность расчета, определяемая не столько приближениями, сделанными при выводе формул, сколько отсутствием данных о характеристиках элементов УЭЦН в технической документации предприятий – изготовителей этих элементов.

3. Приведены примеры расчета КПД УЭЦН различной комплектации, позволяющие увидеть вклад отдельных элементов УЭЦН в энергоэффективность установки в целом.

## Литература

1. Нефтяное хозяйство. 2013. №6
2. Hydraulic Institute, Standard for Effects of Liquid Viscosity on Rotodynamic (Centrifugal and Vertical) Pump Performance, 1983, USA.
3. Gulich J.F. Centrifugal pumps. Second Edition, Springer, 2010.
4. Li V.G. Experimental Research of Technical Characteristic centrifugal pumps // World Pumps. 2002. №26.
5. Gilmar Amaral, Valdir Estevam, Petroleo Brasileiro and Fernando A. Franco, Influence of Viscosity on ESP Performance, 2007 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim, California, 11 – 14 November.
6. Ляпков П.Д. О влиянии вязкости на характеристику погружных центробежных насосов. Труды ВНИИ, вып.41. М.: Недра, 1964.
7. Абахри С.Д., Перельман М.О., Пещеренко С.Н., Рабинович А.И. Влияние вязкости на рабочие характеристики центробежных насосов // Бурение и нефть. 2012. № 3. С. 22 – 26.
8. Методы и средства измерения тепловых параметров. [Электронный ресурс] URL: <http://xeon128.narod.ru/lection/6.htm> (дата обращения 1.08. 2013).
9. Теоретические основы электротехники. [Электронный ресурс] URL: <http://toe-kgeu.ru/toe1/259-toe1> (Дата обращения 2.08.2013).
10. Ю.В. Писаревский, Ж.А. Ген. Проблемы разработки высокоскоростных электрических двигателей для стоматологии // Электромеханические преобразователи. 2011. № 4. С. 46 – 51.
11. Е.И. Забудский. Электрические машины. Ч.1. Трансформаторы. Учебное пособие для вузов. М.: МГАУ, 2002. 167 с.
12. ТНК ВР. Методика оценки мероприятий, направленных на экономию электроэнергии и выбору УЭЦН по критерию энергоэффективности.
13. Сипайлов В.А. Оптимизация режимов работы установок электроцентробежных насосов механизированной добычи нефти: Дис. на соискание ученой степени канд. техн. Наук. – Томск: ТПУ, 2009. 196 с. ■

**Ключевые слова:** ЗАО «Новомет-Пермь», установки электроцентробежных насосов (УЭЦН), энергоэффективность УЭЦН, КПД элементов УЭЦН, потери мощности

## Приложение 1. Расчет потерь энергии в трансформаторе

Величина ЭДС, индуцируемой в первичной обмотке, определяется скоростью изменения магнитного потока. Результирующий магнитный поток запишем в виде  $\Phi_c(t) = \Phi_m \cos \omega t = \Phi_m \cos 2\pi f t$ ,  $\Phi_m$  – амплитуда этого потока,  $\omega$  – циклическая частота,  $f$  – частота. Тогда получим

$$e_1(t) = W_1 \frac{d\Phi_c(t)}{dt} = W_1 \frac{d}{dt} \Phi_m \cos 2\pi f t = 2\pi f W_1 \Phi_m \sin 2\pi f t = E_{1m} \sin \omega t \quad (П1)$$

Где  $W_1$  – число витков в первичной обмотке,  $E_{1m} = 2\pi f W_1 \Phi_m$  – амплитуда ЭДС, индуцируемая в первичной обмотке, тогда действующее значение ЭДС

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f W_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} \quad (П2)$$

Магнитный поток  $\Phi_m$  можно выразить через индукцию  $B_m$

$$\Phi_m = B_m S_c \quad (П3)$$

Где  $S_c$  – площадь поперечного сечения сердечника. Тогда величина ЭДС первичной обмотки

$$E_1 = \frac{2\pi f W_1}{\sqrt{2}} B_m S_c \quad (П4)$$

В трансформаторе передача мощности от одной обмотки к другой происходит электромагнитным путем, при этом часть мощности, поступающей к трансформатору из питающей электрической сети, теряется в трансформаторе.

Потери в трансформаторе складываются из двух составляющих это потери в стали и потери в меди, которые определяют в опытах холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ) соответственно.

В опыте холостого хода на первичную обмотку подают номинальное напряжение, а вторичную обмотку оставляют разомкнутой. Т.к. при номинальном напряжении на первичной обмотке магнитный поток практически постоянен, то независимо от того, нагружен трансформатор или нет, потери в стали для него являются постоянной величиной. Т.е. в режиме холостого хода энергия, потребляемая из сети, расходуется только на потери в стали, поэтому мощность этих потерь измеряют ваттметром, включенным в цепь первичной обмотки. Эти потери складываются из двух составляющих: потери на перемагничивание в стали (поскольку переменный ток изменяет свое направление, то направление магнитного



потока также меняется) и потери на вихревые токи (поскольку ток создается не только в обмотке, но и в самом сердечнике).

В опыте короткого замыкания вторичную обмотку замыкают накоротко, а на первичную подается пониженное напряжение, при котором токи в обмотках не превышают номинальных значений. В этом случае энергия, потребляемая из сети, расходуется в основном на тепловые потери в проводах обмоток трансформатора, поскольку магнитный поток очень мал (низкое напряжение на первичной обмотке) и, следовательно, потери в стали также малы.

Если пренебречь неравномерностью распределения магнитного потока в поперечном сечении листов, то мощность потерь от вихревых токов [9]

$$N_B = \sigma_B f^2 B_m^2 G, \quad (П5)$$

где  $\sigma_B$  – коэффициент, зависящий от сорта стали и толщины листов,  $G$  – масса рассматриваемой части магнитопровода.

Для определения потерь на гистерезис обычно используется эмпирическая формула Штейнмеца

$$N_G = \sigma_G f B_m^n G, \quad (П6)$$

где  $\sigma_G$  – коэффициент, зависящий от сорта стали,  $n = 1,6$  при  $0,1 < B_m < 1$ , Тл,  $n = 2$  при  $1 < B_m < 1,6$ , Тл

$$N_{CT} = N_B + N_G = \sigma_B f^2 B_m^2 G + \sigma_G f B_m^n G. \quad (П7)$$

Для трансформаторной стали  $B_m > 1$ Тл, следовательно, потери в стали будут определяться

$$N_{CT} = (\sigma_B f^2 + \sigma_G f) B_m^2 G. \quad (П8)$$

Обычно при расчетах потери на перемагничивание и вихревые токи не разделяют и свойства материала оценивают в соответствии с эмпирическим уравнением [10]:

$$N_{CT} = k P_{уд1,0/50} B_m^2 (f/50)^\xi G, \quad (П9)$$

где  $k$  – поправочный коэффициент,  $P_{уд1,0/50}$  – удельные потери в стали на единицу массы при индукции 1Тл и частоте 50 Гц,  $B$  – индукция в стали магнитопровода,  $f$  – частота перемагничивания стального сердечника,  $G$  – масса сердечника,  $\xi$  – показатель степени, определяемый маркой применяемой стали (для трансформаторной стали  $\xi = 1,5$ ).

Поскольку сама индукция зависит от частоты, то выразим ее из (П4) и подставим в (П9):

$$N_{CT} = k P_{уд1,0/50} \left( \frac{\sqrt{2} E_1}{2\pi f W_1 S_C} \right)^2 (f/50)^{1,5} G \quad (П11)$$

При опыте ХХ имеем  $f = f_H = 50$  Гц.

$$N_{XX} = k P_{уд1,0/50} \left( \frac{\sqrt{2} E_{1H}}{2\pi f_H W_1 S_C} \right)^2 (f_H/50)^{1,5} G. \quad (П12)$$

Разделив (П11) на (П12) получим

$$\frac{N_{CT}}{N_{XX}} = \left( \frac{E_1 f_H}{E_{1H} f} \right)^2 \left( \frac{f}{f_H} \right)^{1,5} = \left( \frac{E_1}{E_{1H}} \right)^2 \left( \frac{f_H}{f} \right)^{0,5}. \quad (П13)$$

Учитывая, что  $E_1/E_{1H} = U_2/U_{2H}$  и  $U_2 = U_{HM} + \Delta U_K$  получим

$$N_{CT} = N_{XX} \left( \frac{U_{HM} + \Delta U_K}{U_{2H}} \right)^2 \sqrt{\frac{f_H}{f}}, \quad (П14)$$

где  $U_2$  – текущее напряжение на вторичной обмотке,  $U_{HM}$  – номинальное напряжение двигателя,  $U_{2H}$  – напряжение отпайки,  $\Delta U_K$  – падение напряжения на кабеле.

Для определения потерь в меди можно использовать Т-образную схему замещения [11]. Поскольку напряжение КЗ во много раз меньше номинального поток в сердечнике, определяемый напряжением мал. Следовательно, в режиме КЗ можно пренебречь потерями в стали трансформатора и исключить ветвь ХХ из схемы замещения. Тогда общее сопротивление потерь

$$R_K = R_1 + R_2'. \quad (П15)$$

Потери в меди при номинальном токе первичной обмотки

$$N_{MH} = 3I_{1H}^2 R_K = N_{K3}. \quad (П16)$$

Потери в меди при токе, отличном от номинального,

$$N_M = 3I_1^2 R_K = \frac{I_1^2}{I_{1H}^2} 3I_{1H}^2 R_K = \beta^2 N_{K3}, \quad (П17)$$

где  $\beta = I_1/I_{1H} = I_2/I_{2H}$  – коэффициент загрузки по току, учитывая, что  $I_1 = K_{TP} I_2$  и  $K_{TP} = U_{2H}/U_{1HP}$ , где  $I_1, I_2$  – токи в первичной и вторичной обмотках при текущей нагрузке,  $I_{1HP}, U_{1H}$  – номинальные ток и напряжение в первичной обмотке,  $U_{2H}$  – напряжение отпайки. Тогда получим

$$N_M = N_{K3} \left( \frac{I_2 U_{2H}}{I_{1H} U_{1H}} \right)^2. \quad (П18)$$

Таким образом, КПД трансформатора на номинальной частоте можно определить по формуле

$$\eta_T = \frac{N_{1K}}{N_{1K} + N_{XX} \left( \frac{U_{HM} + \Delta U_K}{U_{2H}} \right)^2 + N_{K3} \left( \frac{I_2 U_{2H}}{I_{1H} U_{1H}} \right)^2}. \quad (П19)$$

## Приложение 2. Расчет потерь энергии в кабеле

Мощность, теряемая в кабеле, пропорциональна квадрату протекающего тока и сопротивлению кабеля для каждой жилы

$$\Delta N_K = n_c \cdot I_M^2 \cdot R_K, \quad (П20)$$

где  $I_M$  – ток, потребляемый двигателем (равен току, протекающему через кабель),  $R_K$  – активное сопротивление кабеля (одной жилы),  $n_c$  – число жил в кабеле.

Потребляемый двигателем ток зависит от потребляемой мощности  $N_{1M}$  (зависимости определяются производителем), и может вычисляется, например, с помощью полинома 2-ой степени:

$$I_M = D_0 + D_1 N_{1M} + D_2 N_{1M}^2, \quad (П21)$$

где  $D_0, D_1, D_2$  – коэффициенты полинома.

Активное сопротивление кабеля можно рассчитать по следующей формуле

$$R_K = \frac{\rho \cdot L_K}{S_K} (1 + \alpha_T (T_K - T_0)), \quad (П22)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление меди при температуре  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ , составляет 0,0175 Ом·мм<sup>2</sup>/м,  $L_K$  – длина кабеля,  $S_K$  – площадь сечения жилы кабельной линии, мм<sup>2</sup>,  $\alpha_T$  – температурный коэффициент сопротивления меди, равный 0,004 1/°C,  $T_K$  – абсолютное значение температуры жилы, °C.

Если известна температура окружающей среды в скважине, то температуры жилы кабеля можно вычислить по формуле [12] (справедливо для диапазона температур окружающей среды от 40°С до 90°С)

$$T_K = I_M \cdot k_T + T_{ж}, \quad (П23)$$

где  $k_T$  – коэффициент нагрева проводника от тока 0,79, °C/A,  $T_{ж}$  – температура окружающей среды.

При этом падение напряжения в кабеле можно вычислить следующим образом

$$\Delta U_K = I_M \cdot \sqrt{R_K^2 + X_K^2}, \quad (П24)$$

где  $R_K, X_K$  – активное и реактивное сопротивления кабеля.

Активную составляющую можно вычислить по формуле (14), реактивную

$$X_K = 2\pi f L_p L_K, \quad (П25)$$

$L_p$  – погонная индуктивность кабеля (для кабеля с сечением 16 мм<sup>2</sup> она составляет примерно 1,2·10<sup>-6</sup> Гн/м),  $f = p \cdot n / (60 \cdot (1-s/100))$  – частота первой гармоники,  $p$  – число пар полюсов,  $n$  – частота вращения, об/мин,  $s$  – скольжение ротора, %.

В случае произвольной кабельной линии погонную индуктивность, Гн/м можно вычислить по следующей формуле [13, с. 113]

$$L_p = \left( 0,05 + 0,461 g \frac{D_0}{r_0} \right) \cdot 10^{-6}, \quad (П26)$$

где  $r_0$  – радиус жилы кабеля,  $D_0$  – расстояние между центрами рядом лежащих проводов.

Таким образом, получим результирующую формулу для определения КПД кабеля

$$\eta_K = \frac{N_{1M}}{N_{1M} + n_c I_M^2 (N_{1M}) \cdot \frac{\rho \cdot L_K}{S_K} (1 + \alpha_T (T_K - T_0))}. \quad (П27)$$