

**В. А. Ведерников, В. С. Гапанович, В. В. Козлов**

## **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ НА НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ СРЕДНЕГО ПРИОБЬЯ**

*Представлен метод оптимизации режимов эксплуатации системы «УЭЦН—скважина» с целью продления работы на некотором предварительно установленном интервале времени при снижении показателей по объему добычи нефти. Для этого предполагается использование оперативных данных о качестве изоляции ПЭД и кабеля и уровне вибрационных колебаний механических узлов ЭЦН на принятом интервале эксплуатации с вычислением при необходимости момента статического сопротивления на валу ЭЦН.*

Эффективность применения частотно-регулируемых установок добычи нефти типа установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) на месторождениях Среднего Приобья не всегда удовлетворительна [2]. При изменении режима работы погружного электроцентробежного насоса (ЭЦН) в зависимости от продуктивности пластов, достигаемом путем изменения скорости вращения насоса и, следовательно, его производительности, может уменьшаться продолжительность работоспособного состояния погружного оборудования.

Это объясняется влиянием ряда факторов, характерных для месторождений данного региона, среди которых особо отмечаются: отложение минеральных солей на рабочих органах, их засорение, заиливание и абразивный износ из-за воздействия твердых частиц, перемещаемых с жидкостью, а также залипание рабочих органов на опорных поверхностях насоса. Причем погружные ЭЦН обычно достаточно долго работают в режиме с квазистатической нагрузкой при сравнительно кратковременном освоении скважины и многочисленных пусках, количество и частота которых от скважины к скважине варьируются.

Влияние указанных факторов на ресурсные возможности оборудования имеет случайный характер, осложняя тем самым возможность оперативной коррекции.

В статье предложен подход к использованию установок типа УЭЦН с преобразователем частоты с оценкой состояния их электрических и механических частей и принятием на этой основе решений в отношении заданий по частоте и величине напряжения питания, что позволяет оптимизировать режим работы системы «УЭЦН — скважина» на принятом интервале времени, равном, например, межремонтному периоду эксплуатации ЭЦН, и тем самым продлить его при некотором (предварительно установленном) снижении показателей по объемам добычи нефти.

Указанная цель предполагает использование оперативных данных по динамике характеристик качества изоляции ПЭД и кабеля и уровня вибрационных колебаний механических узлов ЭЦН на принятом интервале эксплуатации с вычислением по необходимости момента статического сопротивления на валу ЭЦН. Причем принятые решения в части режима использования ЭЦН должны находиться в области допустимых значений гидравлических характеристик скважины и пласта.

Рассмотрим первоначально процесс расходования ресурса изоляции ПЭД.

Интенсивность его расходования зависит от уровня нагрева изоляции, с одной стороны, и эффективности охлаждения — с другой.

Первая составляющая определяется режимом работы ПЭД, который зависит от уровня его загрузки на интервале эксплуатации системы «УЭЦН — скважина» и ряда дополнительных факторов, среди которых:

— отложение солей на рабочих органах насоса, вызывающее постепенное повышение степени загрузки ПЭД;

— замещение пластовой жидкости растворами глушения скважины на этапе ее освоения;

— повышение электрической нагрузки ПЭД в пусковых режимах, особенно при действии факторов подклинивания, заиливания и залипания.

Вторая составляющая процесса расходования ресурса изоляции ПЭД определяется условиями передачи тепла, выделяемого в ПЭД перекачиваемой жидкостью и частью ее через стенки скважины в горные породы. При этом жидкость характеризуется как многофазовая, с неодинаковым фазовым составом от скважины к скважине, температурой в продуктивном пласте на уровне 90–100 °С и скоростью перемещения вдоль поверхности ПЭД.

В единицу времени электродвигателем преобразуется в теплоту следующее количество электроэнергии:

$$Q = (1 - \eta) N, \quad (1)$$

которая расходуется в результате вынужденной конвекции на повышение внутренней энергии омывающей ПЭД жидкости

$$Q = c_p q_m T_d.$$

Здесь  $N$ ,  $\eta$  — соответственно номинальная мощность и КПД ПЭД;  $q_m$  — массовый расход жидкости;  $c_p$  — изобарная теплоемкость потока:

$$c_p = c_p^B \beta + c_p^H (1 - \beta);$$

$\beta$  — объемная доля воды в продукции скважины;  $c_p^B$ ,  $c_p^H$  — соответственно изобарные теплоемкости воды и нефти, которые могут быть связаны соотношением  $c_p^B \approx 2c_p^H$  для систем «УЭЦН — скважина» в районе Среднего Приобья. Тогда

$$c_p = c_p^H (1 + \beta). \quad (2)$$

Результирующим показателем, отражающим влияние указанных процессов нагревания и охлаждения изоляции ПЭД на интенсивность расходования изоляции, является температура ее нагрева. Причем наибольший интерес в этой части представляет собой верхняя часть корпуса ПЭД, где находится ввод кабеля питания.

Таким образом, рабочее значение температуры нагрева изоляции в указанном сечении равно  $T_0 + T_d$ , где  $T_0$  — температура набегающего на ПЭД потока жидкости, а  $T_d$  — температура ее дополнительного нагрева, вызванного работой ПЭД. Критерий безотказной работы ПЭД, основанный на сохранении электрической прочности изоляции в указанном сечении, может быть записан в виде условия

$$T_p \leq [T_c], \quad (3)$$

где  $T_p$ ,  $[T_c]$  — соответственно рабочее и предельно допустимое (пробойное) значения температуры нагрева изоляции ПЭД.

Следует отметить, что чем ближе значения  $T_p$  к  $[T_c]$  в выражении (3), тем выше интенсивность расходования изоляции ПЭД и, следовательно, короче интервал его безотказной работы.

Температура в районе спуска насоса может быть определена по известному выражению [3]

$$T_0 = T_{\text{пл}} - (L_{\text{пл}} - L_{\text{нас}}) \frac{0,0034 + 0,79 \cos \gamma \Gamma}{10^\theta}, \quad (4)$$

$$\theta = \frac{q}{20D_k^{2,67}},$$

где  $T_{\text{пл}}$  — температура пласта;  $L_{\text{нас}}$ ,  $L_{\text{пл}}$  — глубина соответственно спуска УЭЦН и залегания пласта, м;  $\Gamma$  — геотермический градиент, С/м;  $\gamma$  — угол кривизны скважины.

Дополнительное приращение температуры есть [4]

$$T_d = \frac{1 - \eta}{c_p (1 + \beta)} \frac{N}{q_M}, \quad (5)$$

где  $c_p$  найдено согласно (2).

Однако использование критерия (3) на практике крайне затруднительно из-за того, что  $q_M$  не связано с частотой и управляющим напряжением работающего ПЭД, а использование в (5) значения КПД  $\eta$  требует определения его текущего значения, что сложно выполнить в промышленных условиях.

Решение задачи оценки динамики расходования ресурса изоляции, прежде всего ПЭД, в условиях системы «УЭЦН — скважина» предполагает использование его тепловой модели, учитывающей эффекты выделения тепла в указанных режимах, температуру и состав пластовой жидкости, а также скорость ее перемещения вдоль поверхности ПЭД.

Для составления такой модели будем считать погружной электродвигатель и окружающее его пространство системой однородных осесимметричных цилиндров: масло в ПЭД, обмотка статора с изоляцией, внешняя стенка ПЭД, поток омывающей ПЭД жидкости, обсадная колонна, горные породы. Будем, кроме этого, считать, что температура масла равна температуре обмотки статора при функционировании ПЭД. Электродвигатель имеет конечную длину, вдоль обмотки статора двигателя принудительно циркулирует охлаждающее его масло. Поток масла движется вдоль стенки, имеющей более низкую температуру, передает ей тепло. С другой стороны стенки противотоком движется пластовая жидкость, которая, соприкасаясь с горячей стенкой, нагревается. При установившемся процессе средняя температура стенки, через которую происходит теплообмен, остается постоянной. Все тепло, получаемое от горячего потока, полностью передается холодному потоку (без учета потерь). Если же изменяется какой-либо показатель одного из потоков, то равновесие нарушается и температура стенки изменяется. При этом часть тепла поглощается стенкой либо отдается потоку пластовой жидкости. Через некоторое время в системе вновь установится равновесие, соответствующее новым условиям [1].

Сущность предлагаемой модели состоит в том, что вначале составляются основные дифференциальные уравнения, описывающие процесс теплопередачи, и уравнение переходного режима в общем виде. После этого, исходя из уравнений теплопередачи, производится исключение промежуточных переменных, входящих в уравнение переходного режима, так, чтобы в нем остались заданные постоянные числа, регулируемые параметры — температура горячего масла и температура омывающей жидкости на выходе и время.

Процесс теплопередачи от обмотки статора через корпус ПЭД к омывающему потоку и далее через стенку скважины в горные породы выражается после некоторых преобразований исходных уравнений системой

$$\Delta N = CM \frac{dT_{\Gamma}}{dt} + v_{\text{м}} C_{\text{м}} (T_{\Gamma} - S) + \alpha_{\text{мс}} F_{\text{с1}} [(T_{\Gamma} + Y)/2 - Z], \quad (6)$$

$$R \frac{dT_{\text{ж2}}}{dt} + K T_{\text{ж2}} = Q_1 T_{\Gamma} + Q_2 T_{\text{ж1}}, \quad (7)$$

где  $\Delta N$  — разность между потребляемой и полезной мощностью ПЭД;

$M$  — масса ПЭД, кг;

$C$  — средняя теплоемкость ПЭД, ккал/м<sup>3</sup>;

$T_{\Gamma}$  — температура нагретого масла на входе, С°;

$T_{\text{ж1}}$  — температура омывающей жидкости на входе, С°;

$T_{\text{ж2}}$  — температура омывающей жидкости на выходе, С°;

$v_{\text{м}}$  — объем потока масла, м<sup>3</sup>/час;

$C_{\text{м}}$  — теплоемкости масла, ккал/м<sup>3</sup>;

$F_{\text{с1}}$  — площадь поверхности стенки ПЭД, м<sup>2</sup>;

$\alpha_{\text{мс}}(q)$  — коэффициент теплоотдачи от масла к стенке, ккал / м<sup>2</sup>часС°;

$q$  — дебит жидкости, м<sup>3</sup>/час;

$R(q), K(q), Q_1(q), Q_2(q)$  — переменные коэффициенты, зависящие от дебита и других постоянных модели;

$S, Z, Y$  — нелинейные переменные, зависящие от  $T_{\Gamma}, T_{\text{ж2}}, T_{\text{ж1}}$ .

Предполагается, что температура масла равна температуре изоляции обмотки статора ПЭД, т. е.  $T_{\Gamma} \approx T_{\text{с}}$ , а в уравнениях (6) и (7)  $T_{\Gamma}, T_{\text{ж1}}, T_{\text{ж2}}$  — средние температуры соответствующих потоков жидкости.

Система уравнений (6), (7) дает изменение (решение) регулируемых параметров с течением времени в общем виде. В нем отражено влияние различных факторов на величины этих параметров в неустановившемся режиме: температуры нагревающей и нагреваемой жидкости на входе, объема жидкости и других факторов, т. е.

$$T_{\Gamma}(t), T_{\text{ж2}}(t), \quad (8)$$

где первая функция отражает работу самого ПЭД, а вторая — режим (скорость) охлаждения на выходе с поверхности ПЭД.

Зная текущее значение показателей в выражении (8), можно определить интенсивность снижения качества изоляции (расхода изоляции)  $\phi$ , динамика которой в первом приближении описывается следующим уравнением:

$$d\phi/dt = -k_1 \Delta N - k_2 \phi - k_3 T_{\text{с}}, \quad (9)$$

$$\Delta N = k_{ст} U^2 f^{1,3} + k_{мс} (\omega/f)^2 + k_{мп} (\omega/f)^2 (k_0 f - \omega),$$

где  $\Delta N$  — суммарные потери электродвигателя;  $k_i$  — коэффициенты пропорциональности,  $i = 1, 2, 3$ ;  $k_{ст}$  — номинальные потери в стали статора,  $k_{мс}$  — номинальные потери в меди статора,  $k_{мп}$  — номинальные потери в меди ротора,  $k_0 = \omega_n / f_n$ ;  $T_c = T_r$  — температура изоляции обмотки статора;  $U$  — величина напряжения асинхронного двигателя;  $f$  — частота напряжения питания являющихся управляющими воздействием системы;  $\omega$  — скорость асинхронного двигателя, а вместо ограничения (3) можно использовать ограничение

$$\varphi \geq [\varphi]. \quad (10)$$

Использование выражений (9), (10) в промышленных условиях требует измерения температуры изоляции ПЭД системы «УЭЦН — скважина», что представляет собой сложную задачу.

На практике в настоящее время ресурс изоляции оценивается через сопротивление изоляции  $R_{из}$ , что в свою очередь определяется через изменение тока утечки  $I_{ут}$ . Причем считается, что установка находится в работоспособном состоянии, когда

$$R_{из} \geq [R_{из}], \quad (11)$$

где  $[R_{из}]$  — предельно допустимое нижнее значение сопротивление изоляции. Однако измерение этого параметра на работающей установке представляет собой также определенную техническую сложность, что ограничивает область применения и требует разработки специальных методов и средств.

Состояние механической части УЭЦН на интервале эксплуатации определяется степенью изношенности узлов и элементов его конструкции, зависящей от ослабления усилий в крепежный узлах, образования зазоров и люфтов в подшипниках и опорных поверхностях ЭЦН в поперечном и продольном направлениях.

Решение задачи оценки динамики расходования механического ресурса ЭЦН в условиях «УЭЦН — скважина» предполагает разработку его модели, учитывающей указанные выше механические явления в статических и динамических режимах работы.

В качестве показателя оценки изношенности оборудования конструкции ЭЦН обычно используется величина вибрационных колебаний в его узлах в двух направлениях: радиальном и осевом.

Решение задачи данного типа предполагает наличие начальных значений указанных показателей и контроль динамики их изменения в процессе эксплуатации при учете режима загрузки ЭЦН, а также количества и алгоритмов выполнения на нем пусковых режимов.

При эксплуатации УЭЦН предусмотрен «вводный контроль» указанных показателей, который выполняется на специальных стендах. Также предусмотрена регистрация в системах управления УЭЦН текущих значений с использованием системы телеизмерений и специальных алгоритмов. Кроме того, известны критические значения указанных показателей в опасных точках конструкции ЭЦН.

В настоящее время не решены вопросы связи указанных значений оценки износа с режимом эксплуатации ЭЦН и прогнозирования на этой основе времени выхода установки на отказ.

Управление УЭЦН в условиях системы «УЭЦН — скважина» предполагает оптимизацию режима ее эксплуатации на принятом интервале, учитывающем капитальные и эксплуатационные затраты при ее применении, с одной стороны, и отклонение от плановых значений по объемам добычи указанной системы — с другой.

Реализация этой задачи в промышленных условиях предполагает создание информационной базы и алгоритм управленческих решений на принятом интервале, равном, например, межремонтному периоду эксплуатации УЭЦН (до года и более).

В этом случае могут быть использованы два варианта структуры системы управления: разомкнутая и замкнутая.

Первая из них применяется в квазистатическом режиме работы системы «УЭЦН — скважина». В ней используются из заданного набора алгоритмы управления скоростью вращения и моментом на валу ЭЦН с учетом задания показателей отбора нефти и состояния оборудования в данный момент времени.

Использование второй структуры осуществляются в переходных режимах системы «УЭЦН — скважина» с автоматической адаптацией ее характеристик при изменении тех же показателей по указанным выше условиям и состоянию системы.

Предлагаемый подход к управлению погружными установками типа УЭЦН в настоящее время реализуется на месторождениях Среднего Приобья. Его использование позволяет продлевать продолжительность безотказной работы установок и обеспечивает получение значительного экономического эффекта при добыче нефти.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Амелин А. Г. Нахождение динамических характеристик технологических процессов аналитическим методом // Автоматика и телемеханика. — 1953. — Т. 14, № 3. — С. 273–282.

2. Ведерников В. А., Гапанович В. С. К управлению системой «УЭЦН — скважина» при добыче нефти // Тр. IX Междунар. Четаевской конф. «Аналитическая механика, устойчивость и управление движением», посвященной 105-летию Н. Г. Четаева. Т. 4: Механика и управление в машинах и роботах. — Иркутск, 2007. — С. 38–46.

3. Мищенко И. Т. Расчеты в добыче нефти. — М.: Недра, 1989. — 245 с.

4. Шмидт С. А., Люстрицкий В. М. Тепловой режим ПЭД в процессе освоения скважины, оборудованной УЭЦН // Сб. трудов ин-та «Гипровостокнефть». — Самара, 2000.

V. A. Vedernikov, V. S. Gapanovich, V. V. Kozlov

### DETAILS OF USING SUBMERSIBLE ELECTRO-CENTRIFUGAL PUMPS AT OIL FIELDS OF THE MIDDLE OB BASIN

*The article presents an optimization method with respect to operating conditions of “electro-centrifugal pump — oil well” system, aiming at extension of operating time within a certain preset interval in case of decrease of oil recovery indices. To reach this, it is supposed to use on-line data on insulation conditions of a submerged motor and cable, as well as those on oscillation level of electro-centrifugal pump assemblies within an assumed operation period, calculating, if needed, moment of static resistance on the shaft of the electro-centrifugal pump.*