

# Обзор вопросов эксплуатации установок ЭЦН

## Overview of Operating ESP Systems

Авторы: Дж. Ф. Ли (компания PLTech LLO),  
Дэвид Л. Дивайн (компания P.E. Wood Group ESP)  
и Линн Роулан (компания Echometer Co.)

By: J F Lea, PLTech LLC,  
David L. Divine, P.E. Wood Group ESP,  
& Lynn Rowlan, Echometer Co.

### Введение:

Разработкой установок погружных электроцентробежных насосов (ЭЦН) уже многие годы занимаются инженеры и ученые, работающие в области металловедения, гидравлики, электроники, теплопередачи, изучения свойств пластических масс, различных аспектов проектирования механического оборудования и в других дисциплинах. В короткой вводной части было бы нецелесообразно описывать все многочисленные аспекты, связанные с такими установками, вместо этого мы приводим перечень основных компонентов установки.

### Краткое описание:

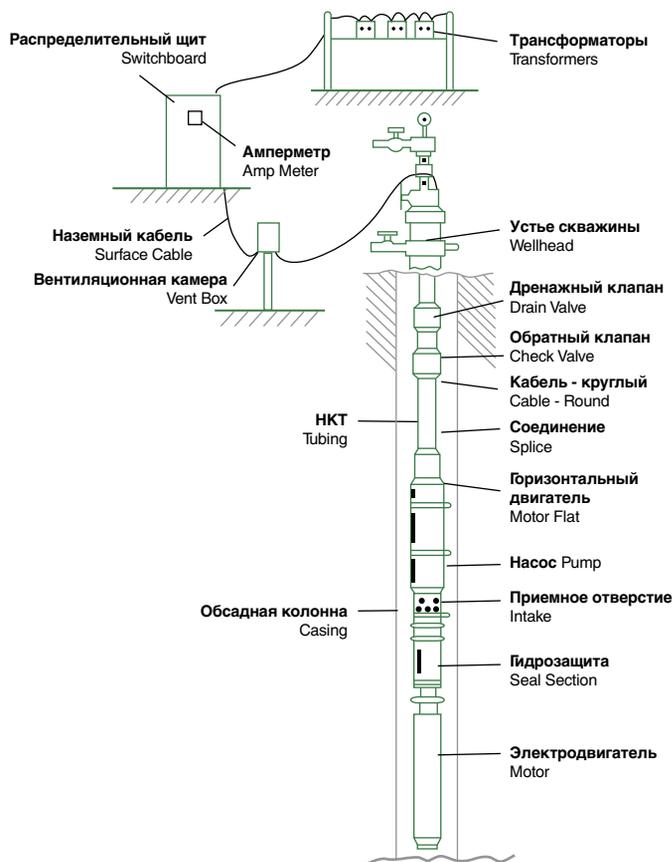
Насосный агрегат подвешивается на колонне насосно-компрессорных труб (НКТ), при этом электрический кабель от поверхности к насосу крепится к наружной поверхности НКТ крепежными поясами. Компонентка оборудования сверху вниз включает насос, ниже которого находится газосепаратор, затем – гидрозащита, после которой располагается электродвигатель. При использовании скважинного датчика давления он устанавливается в нижней части электродвигателя. Для погружных электроцентробежных насосов характерна высокая подача, приблизительно от 20 000 баррелей в сутки на глубине 4000 футов до 5000 баррелей в сутки на глубине 10 000 футов, причем этот показатель зависит от множества факторов, однако, существуют и ступени с низкой подачей (приблизительно 100 баррелей в сутки).

### Электродвигатель:

Погружной электродвигатель — двухполюсный, трехфазный, асинхронный с короткозамкнутым ротором. Электродвигатель работает с номинальной частотой вращения 3500 об/мин. при частоте 60 Гц и 2900 об/мин. при частоте 50 Гц. Двигатель наполнен очищенным минеральным маслом для обеспечения диэлектрической прочности, смазки подшипников и теплопроводности. Упорный

### Introduction:

The electrical submersible pump system has been developed over the years by Engineers and scientists involved in metallurgy, hydraulics, electronics, heat transfer, plastics, many aspects of mechanical engineering, and other disciplines. It is not practical to outline all of the many aspects of the system in the short introduction section. Instead, the major components are introduced in the following pages.



### Overview:

The pump assembly is hung on the tubing with the electric cable banded to the outside of the tubing from

подшипник электродвигателя принимает нагрузку от роторов. Не обладающее электрической проводимостью минеральное масло служит для смазки подшипников двигателя и передачи тепла в двигателе на его корпус. От корпуса двигателя тепло, в свою очередь, отводится с помощью скважинного флюида, контактирующего с наружной поверхностью корпуса при движении мимо электродвигателя. По этой причине электродвигатель не следует устанавливать ниже точки входа флюида, если не предусмотрены какие-либо средства для направления потока флюида с помощью двигателя. Типичные номинальные диаметры двигателя для различных диаметров обсадных колонн: (а) 3,75 дюйма, (б) 4,56 дюйма, (в) 5,40 дюйма, 5,44 дюйма, 5,62 дюйма и (г) 7,38 дюйма. Некоторые производители предлагают электродвигатели с несколько другими диаметрами, у некоторых в предлагаемом ассортименте могут отсутствовать двигатели с какими-либо из указанных выше диаметров. Электродвигатель может иметь одиночный корпус или несколько сдвоенных корпусов, скрепленных болтовыми соединениями, для достижения желаемой мощности. Мощность электродвигателей варьируется от 5 до 1000 и более лошадиных сил.

### Насос:

Используется многоступенчатый погружной электроцентробежный насос. Тип используемой ступени определяет приблизительную расчетную подачу, т.е. объем добываемого флюида в единицу времени, при этом, по мере сжатия флюида, на каждую следующую ступень приходится все меньший объем. Количество ступеней определяет общий расчетный напор и требуемую мощность электродвигателя.

При изготовлении рабочего колеса обычно используется чугун типа «нирезист», возможны варианты для работы с флюидом с высоким содержанием песка. Направляющие аппараты, как правило, изготавливаются из чугуна типа «нирезист». Стандартным материалом для вала является сплав «К-монель». Как вариант, для вала могут использоваться такие высокопрочные материалы, как сплавы «Инконель» и «Хастеллой». Крышки и донные части с болтовым креплением обеспечивают возможность изменения производительности и общего напора насоса путем использования нескольких секций. Однако, в насосах с высокой производительностью крышки и донные части, как правило, выполняются зацело с корпусом. Номинальный наружный диаметр насоса варьируется от 3,38 дюйма до 11,25 дюйма, однако для нефтяных скважин используются насосы диаметром не более 7,62-8,38 дюйма.

surface to pump. The equipment is arranged from top to bottom with the pump first, with the gas separator below, then the seal section, followed by the motor. If a downhole pressure sensor is used, it is hung at the bottom of the motor. ESP's are thought of as high volume lift perhaps producing ~20,000 bpd at 4000' down to ~5000 bpd at 10,000' depending on many factors, but low volume (~100 bpd) stages exist.

### Motor:

The electric submersible motor is a two-pole, three-phase, squirrel cage induction type. The motor runs at a nominal speed of 3500 rpm on 60 Hz frequency and 2900 rpm on 50 Hz. The motor is filled with a refined mineral oil to provide dielectric strength, lubrication of bearings and thermal conductivity. The thrust bearing of the motor carries the load of the rotors. The electrically nonconductive mineral oil lubricates the motor bearings and transfers heat in the motor to the motor housing. Heat from the motor housing is in turn carried away by the well fluids moving past the exterior surface of the motor. For this reason, the motor should not be set below the point of fluid entry unless some means of directing the fluid by the motor is utilized.

Typical nominal motor diameters of equipment may be: (a) 3.75", (b) 4.56", (c) 5.40", 5.44", 5.62", and (d) 7.38" for various casing sizes. Some motors are offered with somewhat different diameters and some manufacturers do not carry some of the diameters indicated. Some Motor construction may be a single housing or several "tandems" bolted together to reach a desired horsepower rating. Motors range in horsepower from 5 to 1000 hp and larger.

### Pump:

The electric submersible pump is a multistage centrifugal type. The type of stage used determines the approximate design volume rate of fluid produced but as the fluid compresses, each stage will have progressively less volume to handle. The number of stages determines the total head designed for and the motor horsepower required.

The usual materials used in manufacturing an impeller are Ni-Resist with some options for sand handling. Diffusers are typically manufactured of Ni-Resist. The standard shaft material is K-monel. Optional, high-strength shaft materials are Inconel and Hastalloy. Bolt-on heads and bases make it possible to vary the capacity and total head of a pump by using more than one pump section. However, large capacity pumps typically will have integral heads and bases. The nominal outside diameter of a pump will range from 3.38" to 11.25" but 7.62" to 8.38" could be largest oil well applications.

### Гидрозащита. Протектор, компенсатор:

Основным назначением протектора двигателя является изоляция электродвигателя от скважинного флюида. В целом, существует два основных типа промышленных протекторов или гидрозащит, хотя их различные марки имеют отдельные отличия друг от друга. В одном типе используются эластичные уплотнительные диафрагмы, а в другом – лабиринтные уплотнения. В гидрозащите первого типа эластичная диафрагма компенсирует объемное расширение масла, которое находится внутри двигателя, под действием тепла, обеспечивая при этом его изоляцию от скважинного флюида. В лабиринтном уплотнении используется разница в плотности флюидов для предотвращения попадания скважинного флюида внутрь насоса. Для этого предусмотрены извилистые каналы, в которых моторное масло, расширяясь, вытесняет некоторый объем скважинного флюида в блоке сопряжения у верхней части протектора. Один протектор обычно включает несколько лабиринтных камер, с возможностью увеличения их количества путем последовательного расположения протекторов. При устройстве гидрозащиты эластичные уплотнительные диафрагмы, как правило, дополняются лабиринтными камерами, чтобы снизить критичность потенциального разрушения диафрагмы. Протектор (гидрозащита) выполняет четыре основных функции: (1) соединяет насос с двигателем с помощью соединения корпуса и приводного вала; (2) размещает в себе упорный подшипник, принимающий осевую нагрузку от вала насоса (при наличии); (3) изолирует двигатель от скважинного флюида, с сохранением возможности выравнивания давления в скважине и давления в маслonaполненном двигателе; и (4) обеспечивает возможность теплового расширения моторного масла под действием тепла, производимого двигателем при работе, и его теплового сжатия после отключения/пуска насоса.

### Газосепаратор:

Газосепаратор устанавливается между протектором или гидрозащитой и насосом. Он предназначен для отделения значительной части свободного газа, который содержится в добываемом флюиде, и для обеспечения приема флюида насосом.

Существует два основных типа конструкции газосепараторов – неподвижные и вращающиеся. В неподвижном газосепараторе направление потока флюида меняется на обратное, в настоящее время этот тип сепараторов используется не так часто. В точке низкого давления происходит отделение газа. Оставшийся в жидкости газ отделяется с помощью лопастного колеса, которое вызывает завихрение потока. В вихревом потоке происходит разделение жидкости и газа. Отделенный газ

### Seal Section. Protector, Equalizer:

The motor protector's primary purpose is to isolate the motor from the well fluid. There are, in general, two types of industry protector or seal section designs although there are specific differences from one brand to another. One type uses a positive bag seal and the other type uses a labyrinth or tortuous path. The "positive seal" design incorporates a fluid barrier bag to allow for thermal expansion of the motor fluid yet still provided isolation of motor fluids from wellbore fluids. The "labyrinth path" utilizes differential fluid specific gravity to prevent well fluid from entering the motor. This is accomplished by paths where the motor fluid is allowed to expand to displace more or less of the wellbore fluid as it expands through a tortuous path at an interface near the top of the protector. There are usually several "labyrinth paths" in one protector and more could be added by placing protectors in series. Normally the bag type positive seal protector is backed up with "labyrinth paths" so that bag failure is not necessarily catastrophic.

The protector or seal section performs four basic functions. These are: (1) It connects the pump to the motor by connecting the housing and drive shaft; (2) Houses a thrust bearing to absorb pump shaft thrust (if present); (3) Isolates the well fluid from the motor while still allowing pressure equalization between the wellbore and the oil-filled motor; and (4) provides for thermal expansion of the motor oil due to heat generated by the motor during operation and thermal contraction of the motor oil following pump shutdown/startup.

### Gas Separator:

The gas separator is installed between the protector or seal section and the pump. Its purpose is to separate a significant portion of any free gas in the produced fluid and provide a fluid intake section for the pump.

There are two major types of gas separator designs - the static type and the rotary type. The static type reverses the fluid flow direction within the housing but the use is not as frequent now. At this point of low pressure there is gas separation. Any gas remaining in the fluid is separated by the pickup impeller which causes a vortex. The vortex allows the gas and fluid to separate. The separated gas is vented to the annulus and the higher density fluid flows into the first stage of the pump.

The rotary type design utilizes a rotary inducer/centrifuge to centrifugally separate the gas and produced liquids. The gas/fluid mixture initially enters the intake ports and moves into the inducer. This increases the pressure of the fluid and moves it through the transition section into the centrifuge. In the centrifuge the fluid is forced to the outside and gas rises through the centrifuge and flow divider into the crossover section. Here, the gas vented into the annulus and fluid is directed into the first

отводится в затрубное пространство, а более плотная жидкость поступает в первую ступень насоса.

Во вращающемся газосепараторе используется вращающаяся камера, действующая как центрифуга, в которой за счет центробежной силы разделяются газ и жидкость. Газожидкостная смесь поступает через впускные отверстия во вращающуюся камеру. При этом давление флюида увеличивается, и он попадает в центрифугу через переходную секцию. В центрифуге жидкость вытесняется в наружную часть камеры, а газ поднимается по центрифуге, проходит через разделитель потока и попадает в перепускную секцию. Здесь газ отводится в затрубное пространство, а жидкость направляется в первую ступень насоса. В настоящее время такой тип газосепараторов производится тремя (в ближайшем будущем их станет четыре) фирмами-производителями. «Вихревой» сепаратор может иметь лопастное колесо меньшего размера в нижней части камеры, где может происходить завихрение потока газа и жидкости, выходящего из сепаратора.

Некоторые фирмы-производители предлагают специальные ступени, когда отсутствует проход

pump stage. At present three (four in the near future) manufacturers are producing this type of separator. A "Vortex" separator may have a smaller paddle wheel at the bottom of a chamber where gas and fluids can swirl before exiting the separator.

Special stages are offered by some manufacturers when there is no path for separated gas. The special stages mix the gas and fluids and some are more proficient in producing head in the presence of high gas content.

#### Pressure Sensing Instrument:

The instrument has two major components - a surface readout unit and a downhole pressure and temperature sensing instrument. The downhole sensor is bolted to the base of the motor and sends a "ghost" signal to the surface unit through the motor windings and power cable as opposed to older designs requiring an extra "I" wire. One readout instrument alternates pressure and temperature readings on a 20-second interval. Other downhole instruments including intake and motor winding temperature. Other types of instrumentation are available.

There are many factors involved in operating ESP systems to lift a field. Below is an outline covering many of the aspects to be aware of when operating ESP's.

## WHEN WILL YOUR ESP FAIL?

...TODAY? ...NEXT WEEK? ...NEXT MONTH?

## ARE YOU READY?



ESP Shuttle enables you to reduce the impact of an ESP failure, for better planning and well management across the life of your well. ESP Shuttle provides a proactive approach to maintaining artificial lift that keeps productivity up and disruption down. ESP failure no longer has a major impact on production.

To find out how you can achieve greater production continuity, visit [www.zeitecs.com](http://www.zeitecs.com)

для отделенного газа. В специальных ступенях происходит смешивание газа и жидкости, а некоторые из них обладают повышенной эффективностью для создания напора при высоком содержании газа в скважинном флюиде.

#### Датчик давления:

Прибор состоит из двух основных компонентов – наземного блока регистрации показаний скважинных приборов и датчика давления и температуры в скважине. Скважинный датчик прикреплен болтами к нижней части электродвигателя, он посылает сигналы на наземный блок регистрации показаний через обмотку электродвигателя и силовой кабель и не требует дополнительного кабеля КИП, который был необходим в более ранних схемах системы. Применяется один блок регистрации, который поочередно считывает показания давления и температуры с 20-секундным интервалом. Другие скважинные приборы включают датчики температуры на приеме насоса и температуры обмотки электродвигателя. Возможно также использование и других типов контрольно-измерительных приборов.

Эффективность эксплуатации установок ЭЦН при разработке месторождения зависит от множества факторов. Ниже перечислены основные аспекты, которые необходимо принимать во внимание при эксплуатации ЭЦН.

#### Факторы, от которых зависит эффективность эксплуатации ЭЦН:

- 1) Скважинные данные, необходимые для проектирования и эксплуатации:
  - i) Испытания скважин
  - ii) Данные по взаимосвязи между забойным давлением в скважине и её общим дебитом
  - iii) Температура и свойства флюида
  - iv) Наличие осложняющих условий
    - (a) Песок
    - (b) Твердые отложения
    - (c) H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>
    - (d) Вязкость, высокая способность к образованию эмульсии
    - (e) Высокая температура
    - (f) Большой объем газа, добываемого вместе с жидкостью
    - (g) Отклонение
    - (h) Прочие осложняющие условия
  - v) Профиль скважины
  - vi) Система труб скважины
  - vii) Устьевое давление
  - viii) Частота (Гц) источника питания
  - ix) Входит ли в состав установки привод с регулируемой частотой вращения?

#### Outline of Factors for Good ESP Operations:

##### 1) Well Data for Design and Operation:

- i) Well tests
- ii) IPR data
- iii) Temperature and fluid properties
- iv) Harsh conditions present?
  - (a) Sand
  - (b) Scale
  - (c) H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>
  - (d) Viscosity, emulsion
  - (e) High Temperature
  - (f) High gas production with the liquids
  - (g) Deviation
- v) Well Profile
- vi) Tubulars
- vii) WHP
- viii) HZ of power supply available
- ix) VSD part of installation?

##### 2) Select Target Production:

- i) AOF of well
- ii) Bubble point
- iii) Produce above or below bubble point
- iv) Target production

##### 3) Equipment Design:

- i) Determine TDH
- ii) Select type of pump and calculate number of stages
- iii) Intake: Standard or gas separator
- iv) Protector/Seal/Equalizer
  - (a) Bag/s
  - (b) Labyrinth sections
  - (c) Tandem protectors?
- v) Motor, type, HP
- vi) Downhole instrumentation
- vii) Cable: round / flat, size
  - Bands or cross coupling protectors
- viii) Well head feed through type
- ix) Control panel: Standard or VSD
- x) See API RP 11S4 Recommended Practice for Sizing & Selection of ESP Installations

Example Simple Conceptual Design is on the following page:

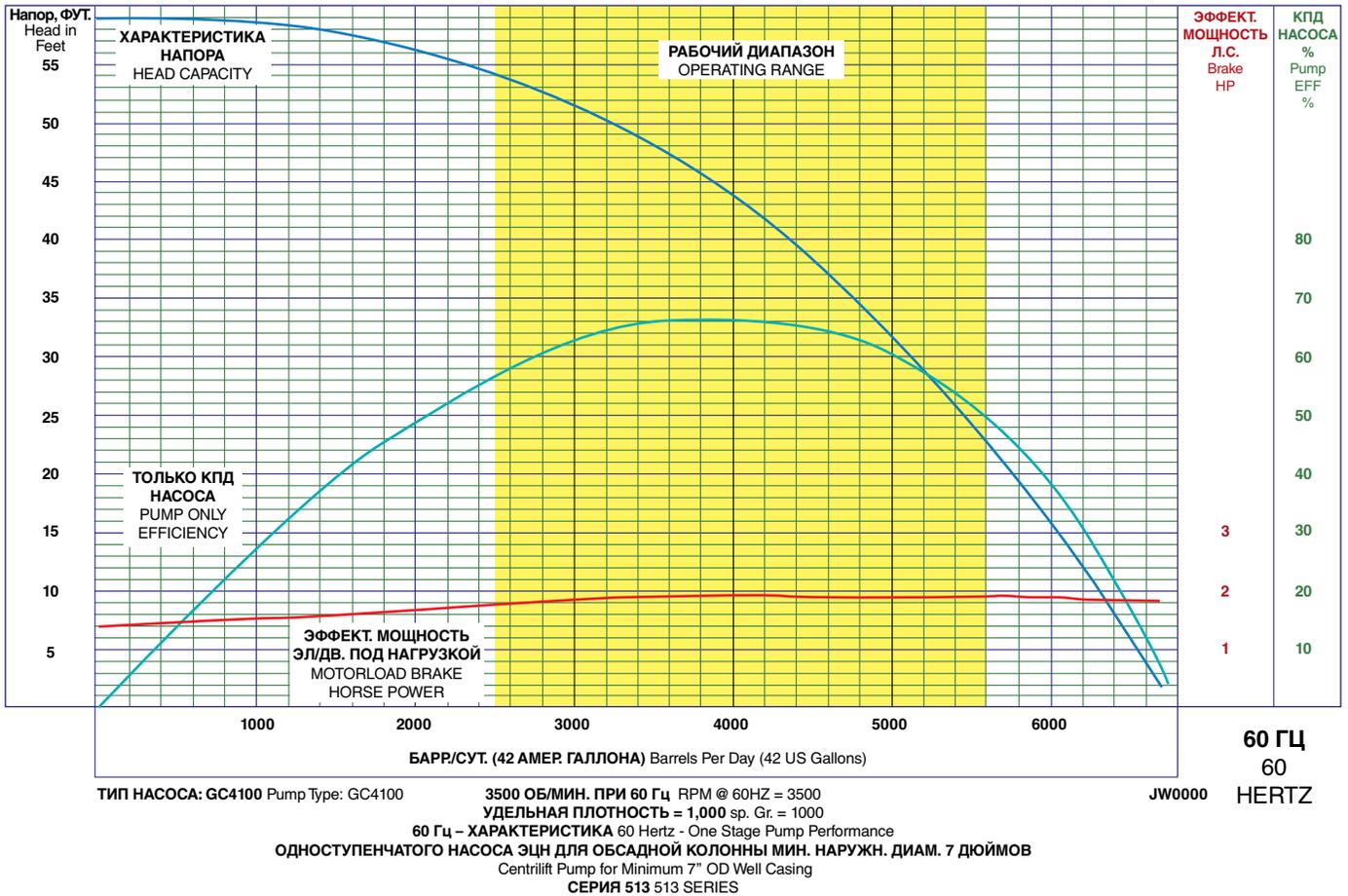
Consider the following data for design purposes. More detailed data would be required for actual application design however:

#### IPR:

SIBHP: 2900 psi  
 Test Rate: 4000 bpd  
 Test Pressure on Perforations: 400 psi

#### Little gas

Perforations Depth: 6500 ft



Пример упрощенного расчета для концептуального проектирования (Рис.)

Example of Simple Conceptual Design, see graph above

- 2) Выбор плановых параметров добычи:**
- i) Максимально возможный дебит скважины
  - ii) Температура и давление насыщения
  - iii) Добыча при давлении выше или ниже давления насыщения
  - iv) Плановые параметры добычи

- 3) Конструкция оборудования:**
- i) Определение полного динамического напора
  - ii) Выбор типа насоса и расчет количества ступеней
  - iii) Прием: стандартный или с газосепаратором
  - iv) Гидрозащита/ Протектор/ Компенсатор
    - (a) С одной эластичной диафрагмой (или несколькими)
    - (b) Лабиринтные камеры (количество)
    - (c) Сдвоенные протекторы?
  - v) Электродвигатель, тип, мощность
  - vi) Скважинная контрольно-измерительная аппаратура
  - vii) Кабель: с круглым сечением / плоский, диаметр Крепежные пояса или муфтовые протекторы
  - viii) Тип проводки через устьевое оборудование
  - ix) Панель управления: стандартная или с

Pump Depth 6000 ft  
 Casing: 5.5 inch  
 Tubing (to be determined but for 4000 bpd should be 3 1/2, 4 or 4 1/2 inch approximately)  
 WHP: 100 psi

Consider combination of water and oil such that the combined SpGr is 0.9.

Approximate using volume of liquids do not change with down hole pressure and temperature. This is not true of course but approximately true if high water cut and little gas are present. This assumption allows a simple design example. For more and more gas and oil with water, this would be less and less true.

Power supply is 60 HZ. Use the above pump performance curve for this example.

Target rate: 4000 bpd

The pressure at the perforations is 400 psi. Consider the casing flow to the pump intake has little friction. The pump intake pressure, PIP, is 400 psi – 500 ft (.9\*.433 psi/ft) = 205.15 psi.

- устройством регулирования частоты вращения
- х) См. стандарт API RP 11S4 «Рекомендуемая методика определения размеров и выбора типа установок ЭЦН»

Для проектирования необходимо проанализировать следующие данные. При реальном проектировании для конкретного применения потребуются более подробные данные:

#### Данные по взаимосвязи между забойным давлением в скважине и её общим дебитом:

Статическое забойное давление: 2900 фунтов на квадратный дюйм

Дебит при испытаниях: 4000 баррелей в сутки

Давление в перфорированном интервале при испытаниях: 400 фунтов на квадратный дюйм

#### Небольшое количество газа

Глубина перфорированного интервала: 6500 футов

Глубина погружения насоса: 6000 футов

Диаметр обсадной колонны: 5,5 дюйма

НКТ (подлежит определению, но для дебита 4000 баррелей в сутки диаметр должен быть приблизительно 3 1/2, 4 или 4 1/2 дюйма)

Устьевое давление: 100 фунтов на квадратный дюйм

Рассмотреть вариант со смесью воды и нефти с суммарной удельной плотностью 0,9.

Приблизительные расчеты выполняются с допущением о том, что объем жидкостей не меняется в зависимости от давления и температуры в скважине. Это, конечно, не так, но при высокой обводненности и низком содержании газа приблизительно соответствует истине. Такое допущение позволяет упростить пример выполнения расчетов для проектирования. С увеличением количества газа и нефти с водой это допущение всё больше отклоняется от истины.

Электропитание 60 Гц. Для данного примера используется приведенная выше кривая характеристик насоса.

Запланированный дебит: 4000 баррелей в сутки

Давление в интервале перфорации составляет 400 фунтов на квадратный дюйм. Принимается допущение о низкой силе трения для потока в обсадной колонне к приему насоса.

Давление на входе в насос, ДВН, составляет 400 фунт/кв. дюйм – 500 футов (0,9\*0,433 фунт/кв. дюйм / футов) = 205,15 фунтов на квадратный дюйм.

Для расчета давления на выходе с помощью данных по параметрам потока в НКТ принимаем такой вариант выбора НКТ, при котором потери давления на трение составляют 2-5% от величины падения давления в НКТ. Такой подход типичен для проектирования установки ЭЦН. Для

For tubing flow to calculate the discharge pressure, consider tubing is selected such that friction pressure is 2-5% of the tubing pressure drop. This is typical for the design of an ESP. For this design use 3% for friction pressure drop.

$$\begin{aligned} \text{Discharge pressure} &= \text{WHP} + .433(.9)(\text{Depth})(1. + \% \text{ Friction}) = \\ &= 100 + .433(.9)(6000)(1. + .03) = 2508.3 \text{ psi} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Then the TDH or total dynamic head is : } \text{TDH} &= (\text{Pd} - \text{PIP}) / (.433(.9)) \\ &= (2508.3 - 205.15) / (.433(.9)) = 5901 \text{ ft} \end{aligned}$$

From the above performance curve read about 43.5 ft / stage.

Then the number of stages required is:

$$\# \text{ Stages} = \text{TDH} / (\text{head/stage}) = 5901 / 43.5 = 136 \text{ stages}$$

The HP required from the motor would be:

$$\begin{aligned} (\# \text{ Stages}) (\text{HP/Stage}) (\text{SpGr}) &= 136(1.95)(.9) = 238.7 \text{ HP} \\ \text{A larger somewhat de-rated motor would normally be} & \text{ selected for this application} \end{aligned}$$

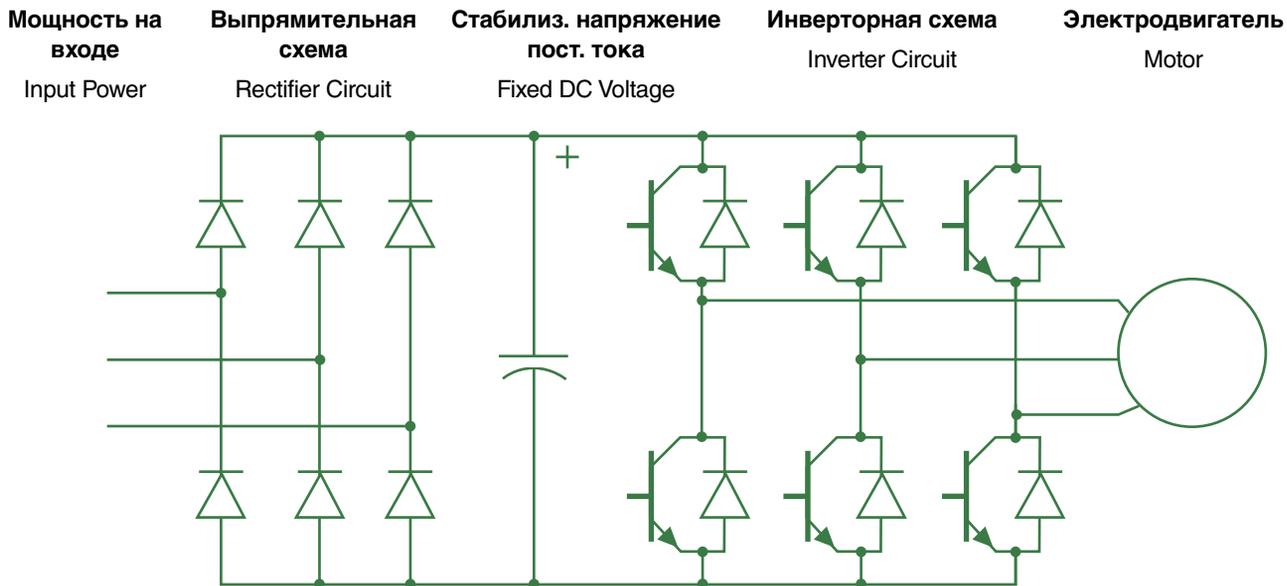
To complete the design, a cable would be selected (normally with no more than 30 V/1000 ft voltage drop), a switch board or VSD would be selected, and use of tubing for this design should be such that the pressure drop due to friction would be about 3% of the total tubing pressure drop. Other hardware would be ordered.

For heavy oil viscosity correction factors would come into play. For free gas at the pump intake, the gas would become part of the volume digested by the pump and the gas would also reduce the effective SpGr of the mixture. For more than 10-15% at the pump intake, we would become more concerned with the need for gas separation.

#### VFD or Variable Drives:

For critical installations, many times the data is such that the design may not fit the well conditions as the operator would prefer. Also changing well conditions may require changes in the ESP operation before the unit is pulled. If sufficient motor capacity is available, then a VSD can help achieve optimum operating conditions before the unit is pulled.

Variable frequency drive (VFD) controllers are solid state electronic power conversion devices. AC input power is first converted to DC intermediate power using a diode rectifier and/or thyristor (SCR) bridge. The DC intermediate power is then converted to quasi-sinusoidal AC power using an inverter switching circuit. Figure 1 is a basic block diagram of a VFD connected to a motor.

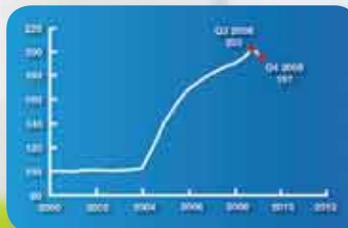


Частотный преобразователь – Рис. 1.  
VFD Figure 1

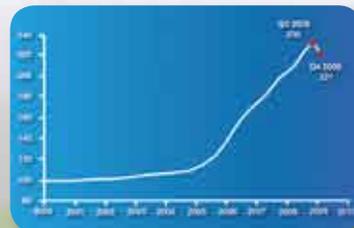
рассматриваемого примера используем значение 3% для потерь давления на трение.

$$\begin{aligned} \text{Давление на выходе} &= \text{Устьевое давление} + \\ &0,433(0,9)(\text{глубина})(1 + \% \text{ трение}) = \\ &= 100 + 0,433(0,9)(6000)(1 + 0,03) = 2508,3 \text{ фунтов на} \\ &\text{квадратный дюйм} \end{aligned}$$

For the electrical submersible pump (ESP) application there is a step up transformer and a length of cable between the output of the VFD and the motor. VFD's for ESP oil well applications are divided into two major categories. They are either variable voltage inverters (VVI) or constant voltage inverters (CVI). AC motor characteristics require the applied voltage



IHS CERA Индекс капитальных затрат по разведке и добыче нефти



IHS CERA Индекс эксплуатационных затрат по разведке и добыче нефти

## Управляете неустойчивыми в мире капиталными и эксплуатационными расходами?

Используйте решения IHS по анализу, моделированию и учету управленческих решений для ориентации в рамках сегодняшнего сложного рынка энергоресурсов.

Проведите анализ месторождения, с помощью программного продукта интерпретации | **PETRA®**

Оптимизируйте производственные процессы, используя компьютерные средства моделирования | **PERFORM®, SubPUMP®, Pipesoft-2®**

Смоделируйте факторы, определяющие величину затрат, с помощью программы для оперативного управления эксплуатационными затратами | **OPE\$T™**

Оптимизируйте обслуживание, ремонт и оперативный учет используя наш программный продукт и услуги | **Intermat®**

Временные лицензии продуктов. Свяжитесь с нашими техническими специалистами. Получите дополнительную подробную информацию. [www.ihs.com/solutions-ru](http://www.ihs.com/solutions-ru) или адрес электронной почты [sales.psg@ihs.com](mailto:sales.psg@ihs.com)

Посетите наш стенд на выставке MIOGE | Павильон 1, Стенд 1409



The Source for Critical Information and Insight™

Тогда полный динамический напор (ПДН) равен:  $PdH = (Pd - ДВН) / ((0,433)(0,9))$   
 $= (2508,3 - 205,15) / ((0,433)(0,9)) = 5901$  фут

Исходя из приведенной выше кривой характеристик насоса, на одну ступень приходится примерно 43,5 фута.

Тогда требуемое количество ступеней составляет:  
 Количество ступеней =  $PdH / (\text{напор/ступень}) = 5901 / 43,5 = 136$  ступеней

Требуемая мощность электродвигателя в лошадиных силах (л.с.) составляет:

(количество ступеней) ( л.с./ступень) (удельная плотность) =  $136(1,95)(0,9) = 238,7$  л.с.

Как правило, на практике выбирается более мощный электродвигатель с эксплуатацией при мощности несколько ниже номинальной.

Для завершения проектирования выбирается кабель (как правило, с перепадом напряжения не более 30 В/ 1000 футов), щит управления или устройство регулирования частоты вращения, при этом НКТ для данной схемы должны быть такими, чтобы падение давления из-за трения было около 3% от общего падения давления в НКТ. Заказываются прочее оборудование.

Для тяжелой вязкой нефти используются поправочные коэффициенты. При наличии свободного газа на приеме насоса этот газ составляет часть объема флюида, проходящего через насос, он также понижает удельную плотность флюида. При содержании газа на приеме насоса более ~10-15% встает вопрос о необходимости применения газосепаратора.

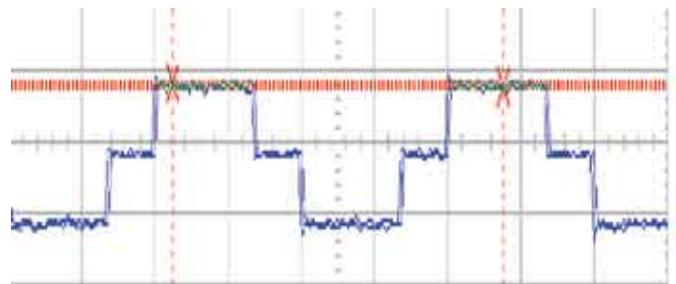
### Частотно-регулируемый электропривод:

Для критически важных установок зачастую данные, на которых базируется проект, таковы, что схема установки ЭЦН не соответствует тем скважинным условиям, которые устроили бы оператора. Кроме того, изменение условий в скважине может потребовать изменения параметров работы ЭЦН до его извлечения из скважины. При достаточном ресурсе двигателя достичь оптимальных рабочих условий до извлечения насоса из скважины можно с помощью частотного преобразователя.

Регуляторы частоты вращения электродвигателя представляют собой полупроводниковые устройства – силовые электронные преобразователи. Сначала переменный ток питания преобразуется в постоянный ток в промежуточном звене устройства с помощью диодного выпрямителя и (или) преобразовательного моста на тиристорах (кремниевый управляемый вентиль). Затем

to be proportionally adjusted whenever the frequency is changed in order to deliver the rated torque. For example, if a motor is designed to operate at 460 volts at 60 Hz, the applied voltage must be reduced to 230 volts when the frequency is reduced to 30 Hz. Thus the ratio of volts per hertz must be regulated to a constant value ( $460/60 = 7.67$  V/Hz in this case). For optimum performance, some further voltage adjustment may be necessary, but nominally constant volts per hertz is the general rule. This ratio can be changed in order to change the torque delivered by the motor.

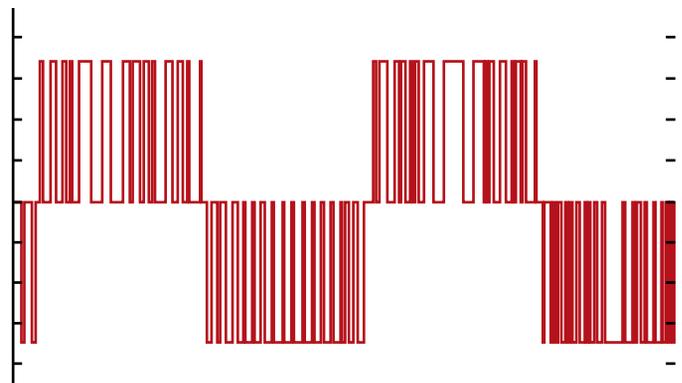
The VVI VFD controls the output voltage by controlling the DC voltage level with SCRs. The output of this type of drive is a quasi-sinusoidal wave called a 6 step shown in Figure 2.



Частотный преобразователь – Рис. 2.  
VFD Figure 2

The vertical distance from the top of the top step to the bottom of the bottom step equals the DC bus voltage. As the frequency increases the SCRs on the input will cause the bus voltage increase and conversely when the frequency decreases the SCRs will reduce the bus voltage.

VVI VFDs with 6 step outputs have been applied to ESP oil well applications for over 30 years. There is some additional motor heating associated with the use of 6 step because on the harmonic content of the quasi-sinusoidal wave shape. This additional heating has been compensated for by using motors that have been re-rated for the application of 6-step VFDs.



Частотный преобразователь – Рис. 3.  
VFD Figure 3

постоянный ток преобразуется в переменный ток с квазисинусоидальной формой кривой напряжения с помощью инверторной переключающей схемы. [1] На рис. 1 представлена базовая схема частотного преобразователя, соединенного с электродвигателем.

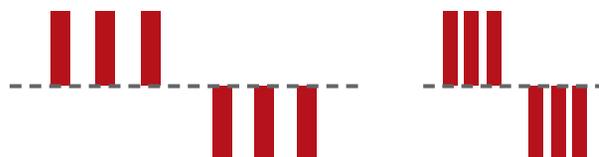
Для погружных электроцентробежных насосов в схеме присутствует еще повышающий трансформатор и отрезок кабеля между выходом частотного преобразователя и электродвигателем. Частотные преобразователи для ЭЦН, используемых в нефтяных скважинах, делятся на две основные категории в зависимости от типа инвертора – инвертор с регулируемым напряжением или инвертор с постоянным напряжением.

Для создания номинального крутящего момента характеристики электродвигателя переменного тока требуют пропорционального регулирования приложенного напряжения в соответствии с изменением частоты. Например, если электродвигатель рассчитан на работу при 460 В при частоте 60 Гц, то при снижении частоты до 30 Гц приложенное напряжение должно быть снижено до 230 В. Таким образом, соотношение «напряжение-частота» должно иметь постоянную величину (для данного случая  $460/60 = 7,67$  В/Гц). Для достижения оптимальных эксплуатационных параметров

The CVI VFD controls the output voltage and frequency with a pulse width modulated (PWM) output shown in Figure 3.

The peak between the top of the positive pulses and the bottom of the negative pulses always stays the same (or constant voltage). The width (or duty cycle) of each individual pulse increases with increasing frequency

**Широтно-импульсная модуляция**  
**Частотный регулятор**  
**Выходной сигнал (межфазный)**  
 Pulse Width Modulated  
 Variable Frequency Controller  
 Output Waveform (Line to Line)



**Низкие частота и напряжение**  
 Low Frequency and Voltage

**Высокие частота и напряжение**  
 High Frequency and Voltage

Частотный преобразователь – Рис. 4.  
 VFD Figure 4.



## АРМАТУРА С УПЛОТНЕНИЯМИ БЕСКОНТАКТНОГО ТИПА

Компания **Control Seal BV** входит в число ведущих мировых производителей, выпускающих:

Шаровые краны с уплотнениями бесконтактного типа и выдвижным шпинделем

Сдвоенные запорные и выпускные конические клапаны с уплотнениями бесконтактного типа

**DBBV**  
 Ду от 2 до 36 дюймов  
 Класс по давлению  
 150-900 фунтов

[WWW.CONTROLSEAL.NL](http://WWW.CONTROLSEAL.NL)

**RSBV**  
 Ду от 1 до 24 дюймов  
 Класс по давлению  
 150-2500 фунтов

**ПРОИЗВОДСТВО С ВЕКОВОЙ ТРАДИЦИЕЙ**

Отдел продаж  
 Waardsedijk Oost 10-4  
 3417XJ, Montfoort  
 The Netherlands  
 Тел.: +31 (0) 348 474315  
 Факс: +31 (0) 348 474238



Производство  
 Farmsumerweg 43  
 9900AH, Appingedam  
 The Netherlands

может потребоваться некоторое дополнительное регулирование напряжения, но общим правилом условно считается постоянное соотношение «напряжение-частота». Это соотношение можно менять для изменения крутящего момента, обеспечиваемого двигателем.

В частотном преобразователе с инвертором с регулируемым напряжением выходное напряжение контролируется регулированием уровня напряжения постоянного тока с помощью тиристоров. На выходе такого типа преобразователя образуется квазисинусоидальная 6-ступенчатая форма кривой напряжения (см. рис. 2 ниже).

Расстояние по вертикали от верха верхней ступени до низа нижней ступени равняется напряжению на шине постоянного тока. По мере увеличения частоты тиристоры на входе обеспечивают повышение напряжения на шине, и наоборот – при уменьшении частоты тиристоры обеспечивают понижение напряжения на шине.

Частотные преобразователи с инвертором с регулируемым напряжением с 6-ступенчатой формой выходного напряжения применяются с ЭЦН, используемыми в нефтяных скважинах, уже более 30 лет. Применение таких устройств приводит к некоторому дополнительному нагреву электродвигателя ввиду содержания гармоник в квазисинусоидальной форме волны. Этот дополнительный нагрев компенсируется с помощью использования электродвигателей с перерасчетом номинальных характеристик специально для применения с частотными преобразователями с 6-ступенчатой формой выходного напряжения.

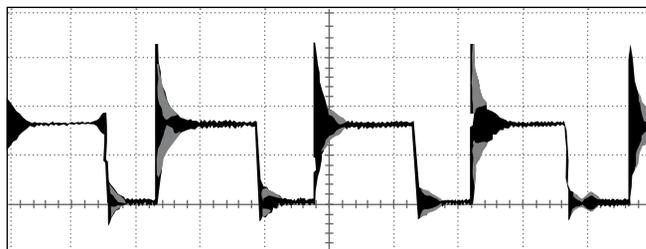
В частотном преобразователе с инвертором с постоянным напряжением выходное напряжение и частота регулируются с помощью широтно-импульсной модуляции (см. рис. 3 ниже).

Амплитуда между верхней точкой положительных импульсов и нижней точкой отрицательных импульсов всегда остается постоянной (постоянное напряжение). Ширина (или «коэффициент заполнения») каждого отдельного импульса увеличивается с повышением частоты, повышая, таким образом, среднее приложенное напряжение. Такое регулирование напряжения и частоты проиллюстрировано на рис. 4 ниже. Среднее напряжение, приходящееся на период низкой частоты, ниже, чем среднее напряжение, приходящееся на период более высокой частоты.

При использовании частотных преобразователей с инвертором с постоянным напряжением применительно к ЭЦН, эксплуатируемым в нефтяных

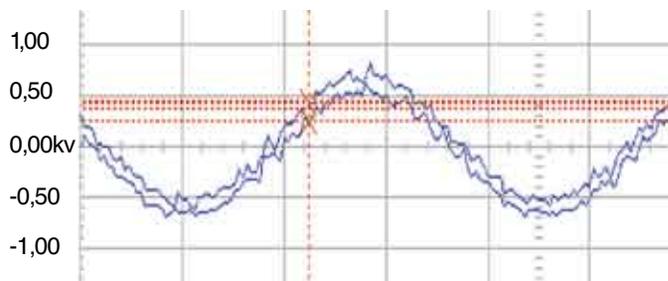
therefore increasing the average applied voltage. This voltage and frequency control is shown in Figure 4 below. The average voltage over the low frequency period will be lower than the average voltage over the higher frequency period.

When the CVI VFDs are applied to the ESP oil well application, the rapid switching of the PWM output causes reflections to occur over the long lengths of power cable. This can cause voltage spikes up twice the peak system voltage to appear at the output of the step up transformer and the ESP motor terminals. Figure 5 shows the ringing that occurs at the end of the voltage transitions during the PWM switching.



Частотный преобразователь – Рис. 5.  
VFD Figure 5

To reduce the risk of insulation failure and to reduce motor heating due to harmonics the manufactures of these drives have included low pass filters on the output of their CVI VFDs. This is filtered PWM (FPWM3) or variable sine wave generation PWM (VSG PWM4). A typical voltage output waveform of a filtered CVI VSD is shown in Figure 6.



Частотный преобразователь – Рис. 6.  
VFD Figure 6

Variable frequency drives for ESP oil well applications range in size from 25 KVA to 2000 KVA at 480 volts to 2400/4160 volts. They can be designed for stand alone applications in the field in NEMA 3 or 4 enclosures or they can be in NEMA 1 enclosures for motor control room applications. When purchased from an ESP vendor they will come with the necessary controls for motor and VFD protection and control.

1. Campbell, Sylvester J. (1987). Solid-State AC Motor Controls. New York: Marcel Dekker, Inc. pp. 79
2. Bose, Bimal K. (1980). Adjustable Speed AC Drive

скважинах, быстрое переключение выходного тока с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) приводит к появлению отражений на длинных участках силового кабеля. Это может вызвать броски напряжения до значения, вдвое превышающего максимальное напряжение системы на выходе повышающего трансформатора и клеммах электродвигателя ЭЦН. На рис. 5 показан эффект отражения – кратное увеличение волны, возникающее на конечном участке преобразования напряжения при переключении с помощью широтно-импульсной модуляции.

Для снижения риска пробоя изоляции и для уменьшения нагрева электродвигателя из-за содержания гармоник изготовители таких преобразователей ввели в их схему фильтр нижних частот на выходе. В результате появилась схема ШИМ с фильтром (FPWM3), или ШИМ с образованием регулируемых синусоидальных волн (VSG PWM4). Типичная форма кривой выходного напряжения для схемы частотного преобразователя с инвертором с постоянным напряжением с добавлением фильтра показана на рис. 6 ниже.

Характеристики частотных преобразователей для ЭЦН, используемых в нефтедобывающей промышленности, варьируются от 25 киловольт-

Systems. New York: IEEE Press

3. Registered trademark of Baker-Hughes Centrilift
4. Registered trademark of Wood Group – ESP, Inc.

#### 4) Installation:

There are many factors to be considered to prepare for installation, install the cable and unit components and start up and monitor the unit. See API RP 11 S3, Recommended Practice for ESP Installations. See API RP11S5 Recommended Practice for Application of ESP Cable. See API RP 11S6 Recommended Practice for Testing ESP Cable Systems.

#### ESP Deployment Options

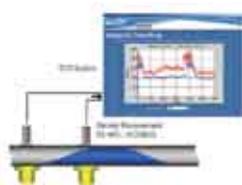
As previously discussed, the ESP assembly is normally hung on tubing with the electric cable banded to the outside of the tubing. A heavy rig/hoist intervention is therefore required to replace failed and sub-optimal systems and the unpredictability of ESP failures can result in significant disruption, cost and production deferment. To reduce the impact of ESP failures a number of alternative deployment options have been developed by the ESP vendors, such as Centrilift, Reda and Wood Group.

Cable deployed systems, coiled tubing deployed systems and through tubing deployed pumps were all

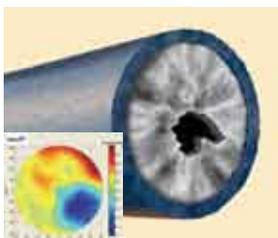
## Do you want to see through walls?

**TRACERCO Diagnostics™ Pipeline Assurance services enable our customers to use on-line non-invasive techniques to determine the condition and characteristics of pipeline contents.**

Flow Assurance - deposit surveys to determine the location and amount of pipeline deposits.



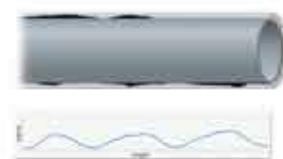
Slugging study - accurate real time process measurements that determine the size, duration and velocity of liquid and gas slugs.



Pipe-in-pipe Annulus Integrity measurements to determine whether the annulus is dry or flooded. Reliable, robust and low risk method of pig location and detection.



**Tracerco**  
Providing Insight Onsite



Moisture Under Insulation Detection - identifying the location of wet insulation that is a precursor to corrosion.

For more information please contact us via the e-mail address shown, or by telephoning +44 (0) 1642 375500

ампер до 2000 киловольт-ампер при напряжении от 480 В до 2400/4160 В. Они могут быть рассчитаны на отдельную установку на месте в корпусах класса NEMA 3 или 4 (по стандарту NEMA – Национальной ассоциации производителей электрооборудования), или на установку в аппаратных управления электродвигателями в корпусах класса NEMA 1. При закупке у поставщика ЭЦН эти устройства поставляются в комплекте с необходимыми средствами защиты и управления электродвигателями и частотными преобразователями.

1. Источник: Campbell, Sylvester J. (1987). Solid-State AC Motor Controls. New York: Marcel Dekker, Inc. pp. 79
2. Источник: Bose, Bimal K. (1980). Adjustable Speed AC Drive Systems. New York: IEEE Press
3. Зарегистрированная торговая марка компании Baker-Hughes Centrilift
4. Зарегистрированная торговая марка компании Wood Group – ESP, Inc.

#### 4) Монтаж:

- a) При подготовке к монтажу, монтаже кабеля и компонентов установки, а также запуске и мониторинге работы установки необходимо учитывать множество факторов. См. стандарт API RP 11 S3, «Рекомендуемая методика монтажа установок ЭЦН». См. стандарт API RP11S5, «Рекомендуемая методика для установки кабеля ЭЦН». См. стандарт API RP 11S6, «Рекомендуемая методика для испытаний кабелей ЭЦН».

#### Варианты размещения УЭЦН

Как обсуждалось ранее, УЭЦН в сборе обычно навешивается на подъемной трубе с использованием электрического кабеля, бандажируемого к наружной стороне трубы. Таким образом, для замены вышедших из строя и недостаточных систем требуется вмешательство с использованием тяжелых приспособлений/подъемных устройств, а непредсказуемость отказов УЭЦН может иметь своим результатом значительные повреждения, затраты и задержки в производстве работ. Для того, чтобы уменьшить последствия отказов УЭЦН, поставщиками УЭЦН, такими, как «Centrilift», «Reda» и «Wood Group», был разработан целый ряд альтернативных вариантов размещения.

Системы с канатным размещением, системы с колтюбинговым размещением и насосы с размещением через трубу были разработаны в целях снижения последствий отказов УЭЦН, но, в силу целого ряда технических и коммерческих причин, они не были с готовностью приняты отраслью. Позднее, благодаря усилиям компании «ZEITECS»

designed to reduce the impact of ESP failures but, for a variety of technical and commercial reasons, have not been readily adopted by the industry. More recently ESP Shuttle Systems have become available through ZEITECS where the entire ESP system (pump, seal and motor) may be run and retrieved on wireline. The ESP cable and the female electrical connectors are run with tubing as the 'permanent' completion and then the ESP Shuttle system with the male electrical connectors is run through the tubing on wireline to the docking station at bottom. The wireline is detached and retrieved before production.

The best ESP deployment method for a particular application can be determined only by a thorough evaluation of well lifecycle economics.

#### 5) Operation / Monitoring:

- i) Monitor: Amps, surface voltage, downhole temperature and pressure starts/stops, power supply frequency
- ii) Advanced
  - (a) Motor winding and well temperature
  - (b) Motor fluid dielectric strength
  - (c) Vibration
  - (d) Discharge pressure
  - (e) See API RP 11S Operation, Maintenance & Troubleshooting of ESP Installations

#### 6) Removal from Well/ Inspection;

- i) Remove with care
- ii) Inspect as removed: Sample fluids, solids etc
- iii) Collect fluid and solids samples
- iv) Observe color indicating exposure to excessive heat
- v) Note Vibration marks if any
- vi) Any evidence of cable or pothead burns
- vii) Mechanical damage if evident
- viii) Package including pothead and instrumentation (without removal) to shop for teardown

#### 7) Shop Teardown:

- i) Have available historical run data and documentation
- ii) Sample internal materials and fluids
- iii) Search for primary cause of failure and other conditions:
  - (a) Wear
  - (b) Foreign materials
  - (c) Electrical transients or electrical burns
  - (d) Water in motor?
  - (e) Seal function or failure of:
    1. Shaft seals
    2. Bag preventer
    3. Contamination of labyrinth sections
    4. Wear or failure of thrust bearing
  - (f) Motor: Burned or contaminated
  - (g) See API RP 11S Recommended Practice for ESP Teardown Report

стали доступными челночные системы УЭЦН, в которых вся система УЭЦН (насос, уплотнение и двигатель) могут спускаться и извлекаться на кабель-тросе. Кабель УЭЦН и гнезда электрических соединителей опускаются вместе с трубой в качестве «постоянного» комплекта, и затем челночная система УЭЦН вместе со штепсельными частями электрических соединителей опускается через трубу на кабель-тросе в док-станцию в нижней части. Кабель-трос отсоединяется и извлекается перед началом добычи.

Наилучший способ размещения УЭЦН для конкретного применения может быть определен только посредством тщательной оценки экономических аспектов жизненного цикла скважины.

### 5) Эксплуатация / Контроль параметров работы:

- i) Контролю подлежат следующие параметры: сила тока, напряжение на поверхности, температура и давление в скважине в начале работы и при остановке, частота источника питания.
- ii) Дополнительные параметры
  - (a) Температура обмотки двигателя и температура в скважине;
  - (b) Диэлектрическая прочность жидкости в двигателе;
  - (c) Вибрация;
  - (d) Давление на выходе;
  - (e) См. стандарт API RP 11S, «Эксплуатация, техническое обслуживание и устранение неисправностей установок ЭЦН».

### 6) Извлечение из скважины / осмотр:

- i) Извлекать с осторожностью;
- ii) После извлечения осмотреть насос: взять пробы жидкостей, твердых веществ и т.д.;
- iii) Собрать пробы жидкостей и твердых веществ;
- iv) Проверить цвет на предмет изменения вследствие воздействия повышенных температур;
- v) Отметить признаки подверженности вибрации при их наличии;
- vi) Проверить наличие признаков прожогов на кабелях или концевых кабельных муфтах;
- vii) Проверить наличие механических повреждений;
- viii) Упаковать оборудование, включая концевые муфты и КИП (без извлечения), для доставки в мастерскую для демонтажа.

### 7) Демонтаж в мастерской:

- i) Необходимо наличие данных по эксплуатации установки за определенный прошедший период и ведение соответствующей документации;
- ii) Взятие проб материалов и жидкостей, находящихся внутри насоса;
- iii) Исследование основных причин неисправностей

- iv) Determine possible reuse of pump and motor if reconditioned and tested. See API RP 11S2 Recommended Practice for ESP Testing. See API RP 11S8 Recommended Practice on ESP Vibrations. See API RP 11S7 RP on Application and Testing of ESP Seal Chamber Sections

### 8) Determination of failure:

- i) Examine removal and teardown data and assess cause(s) of failure

### 9) Continuous Improvement:

- i) Indicate equipment that could extend run life such as sand resistance
- ii) Stages/ impellers or high temperature trim or need for better checks at installation etc. Note that these recommendations may not be implemented on the new equipment going in but possibly on the following run/pull/installation.

### 10) Maintenance of Failure Data Base:

In order to show improvements with time in run life, it is necessary to have a good record of past failures and the cause of each. Only then can attention be focused on the most critical areas and only then can improvements in run life be achieved.

For additional information on a failure tracking project details see: Industry Reliability and Failure Tracking Joint Industry Projects seek to increase ESP and PCP Run-Life By Jesus Chacin, Paul Skoczylas and Darren Worth, ROGTEC, Issue 7.

и других условий:

- (a) Износ;
- (b) Наличие инородных материалов;
- (c) Наличие мгновенно возникающих неустановившихся токов и электрических ожогов;
- (d) Наличие воды в двигателе?
- (e) Состояние уплотнений, признаки повреждений:

1. Уплотнений валов;
2. Эластичной диафрагмы;
3. Загрязнение лабиринтных камер;
4. Износ или поломка упорных подшипников.
  - (f) Двигатель: признаки сжигания или загрязнения;
  - (g) См. стандарт API RP 11S, «Рекомендуемая методика составления отчетов по демонтажу установок ЭЦН».
- iv) Определение возможности повторного использования насоса и двигателя после ремонта и испытаний. См. стандарт API RP 11S2, «Рекомендуемая методика испытаний установок

ЭЦН». См. стандарт API R P11S8, «Рекомендуемая методика контроля вибрации установок ЭЦН». См. стандарт API RP 11S7, «Рекомендуемая методика выбора и испытаний уплотнительных камер установок ЭЦН».

### 8) Определение неисправностей:

i) Изучение данных по извлечению и демонтажу насоса и оценка причин(ы) отказа.

### 9) Постоянное совершенствование в использовании насосов:

- i) Определение элементов, которые могли бы продлить межремонтный период насоса, например, стойкие к воздействию песка компоненты:
- (1) Ступени/ рабочие колеса, или высокотемпературные внутренние элементы, или необходимость более тщательных проверок при монтаже и т.д. Следует отметить, что эти рекомендации могут быть невыполнимы для нового оборудования, спускаемого в скважину,

они, возможно, более подходят для следующих циклов спуска/ извлечения/ монтажа.

### 10) Ведение базы данных по неисправностям:

Для того чтобы со временем обеспечить увеличение межремонтного периода, необходимо тщательно вести базу данных по имевшим место отказам и их причинам. Только в этом случае можно сосредоточиться на наиболее важных аспектах и добиться повышения межремонтного ресурса.

Дополнительную информацию по ведению баз данных по отказам ЭЦН см. в следующем документе: Reliability and Failure Tracking Joint Industry Projects seek to increase ESP and PCP Run-Life By Jesus Chacin, Paul Skoczylas and Darren Worth, Rogtec, Issue 7. («Совместный отраслевой проект по созданию базы данных отказов и надежности ЭЦН и винтовых насосов способствует увеличению их срока службы», авторы: Иисус Чацин, Пол Шкозылас и Дэррен Уорт, журнал ROGTEC, выпуск 7).

## Типичные отказы ЭЦН Examples of ESP Failures

