



НОВОМЕТ

# ПОГРУЖНЫЕ ВЕНТИЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

## ИСТОРИЯ, КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ, ВОЗМОЖНОСТИ



**АНАТОЛИЙ САНТАЛОВ**, Зав. отделом погружного электропривода ОКБ БН КОННАС

**ОЛЕГ ПЕРЕЛЬМАН**, Генеральный директор ГК Новомет

**АЛЕКСАНДР РАБИНОВИЧ**, Советник генерального директора по новой технике ГК Новомет

**ЕВГЕНИЙ ПОШВИН**, Директор департамента инновационных разработок Новомет-Пермь

**СЕРГЕЙ КОШЕЛЕВ**, Зам. главного конструктора по ПЭД Новомет-Пермь

**ИВАН ХОЦЯНОВ**, Инженер-исследователь ОКБ БН КОННАС

Статья посвящена анализу состояния инновационных разработок в области погружных вентильных двигателей, особенностям их конструкций, влиянию программного обеспечения станций управления на КПД двигателей и вопросам расчета и измерения энергоэффективности УЭЦН, оснащенных такими двигателями, в стендовых и эксплуатационных условиях.

**И**стория создания погружных вентильных электродвигателей (ПВЭД) с постоянными магнитами для УЭЦН в России насчитывает уже более 15 лет.

Так, в октябре 1996 года участникам VI Всероссийской технической конференции «Производство и эксплуатация УЭЦН», проходившей в г.Альметьевске, в заводской испытательной скважине ОАО «АЛНАС» была впервые продемонстрирована установка с ПВЭД мощностью 45 кВт с номинальной частотой вращения 6000 об/мин разработки ОАО «АЛНАС» и ЗАО «АВАНТО». [1]

При длине (двигатель + гидрозащита + насос) 5,6 метра УЭЦН

обеспечивала расход 140 м<sup>3</sup>/сут и напор 1200 метров. Была изготовлена опытная партия (105 шт.) установок с трехпроводной и однопроводной линией питания для промысловых испытаний. Несмотря на положительные в целом результаты испытаний, программа производства ПВЭД была свернута в связи с недостаточной надежностью существовавших в то время ступеней, насосов, а также слабой маркетинговой деятельностью и неготовностью рынка.

В конце 1996 года по заказу ЛУКОЙЛа был изготовлен макетный образец ПВЭД разработки ОАО «Аэроэлектрик», и в 1998 году начаты эксплуатационные ис-

пытания опытных образцов УЭЦН с вентильным электродвигателем номинальной частотой вращения 3000 об/мин.

К 2011 году электродвигатели производства РИТЭК ИТЦ с номинальной частотой вращения 3000 об/мин для УЭЦН и низкоскоростные ПВЭД для винтовых насосов произведены общим числом более 2000 шт. [2]

В 1997 году была изготовлена, а в 1998 году спущена в скважину УЭЦН с вентильным электродвигателем мощностью 35 кВт разработки «КБ Нефтемаш». В настоящее время производятся мелкие партии УЭЦН «ЦУНАР» и «АКМ», работающие в диапазоне частот вращения 7–10 тыс.

## НОВОМЕТ: ТИПОРАЗМЕРЫ ВД

### В настоящее время компания производит следующие типоразмеры вентильных двигателей:

- габарита 81 мм с номинальной частотой вращения 6000 об/мин, мощностью до 90 кВт в одной секции;
- габарита 117 мм с номинальной частотой вращения 3000 и 6000 об/мин, мощностью до 220 и 400 кВт в одной секции соответственно;
- габарита 130 мм с номинальной частотой вращения 3000 и 6000 об/мин, мощностью до 300 и 465 кВт в одной секции соответственно;
- ведется подготовка производства двигателей 103 и 185 мм на частоту вращения 3000 и 6000 об/мин и низкоскоростного (100–1500 об/мин) ПВЭД габарита 117 мм с номинальным моментом около 800 Нм.

об/мин. Всего было произведено около 180 таких установок нескольких модификаций. [3]

В 2004 году к разработке и производству ПВЭД приступил «Борец». Изготовлено порядка 2000 таких изделий. [4]

НОВОМЕТ начал разработку и внедрение ПВЭД в 2005 году. Заказчикам на 01.06.11 поставлено 837 вентильных двигателей.

Таким образом, общее число поступивших в эксплуатацию вентильных двигателей приближается к 5000 шт. ПВЭД выпускаются с частотами вращения от 100 до 10000 об/мин и мощностью в одной секции от 6 до 400 кВт. Количество опубликованных работ на эту тему составляет несколько десятков, защищены три кандидатские диссертации. Начаты поставки первых промышленных партий и в страны дальнего зарубежья.

Определенная информация о подобных машинах в странах дальнего зарубежья у нас имеется. Однако нам не удалось найти в открытой печати данные об изготовлении такого оборудования за пределами России, и тем более — о его эксплуатации.

### НОВОМЕТ: от спроса

НОВОМЕТ поставил задачу разработки всего диапазона габаритов от 81мм до 185 мм, частот вращения от 100 до 6000 об/мин и мощностей до 1,2 МВт. Очередность внедрения в производство определялась, естественно, спросом со стороны нефтяных компаний (см. «НОВОМЕТ: типоразмеры ВД»).

#### Основное предназначение ПВЭД:

- на скоростях вращения до 1500 об/мин — работа с винтовыми и другими объемными насосами;
- до 4000 об/мин — снижение энергопотребления на серийных УЭЦН;
- на 6000 об/мин — работа в энергоэффективных установках, сложных поликомпонентных насосных системах («Y-tool», ОРЭ, «тандем») и в боковых стволах 114 и 102 габарита.

Сейчас перспективность применения таких двигателей у рос-

сийских нефтяников сомнений не вызывает. В области частот вращения 1500–4000 об/мин они имеют повышенный на 6–10% КПД по сравнению с приводом на основе асинхронного электродвигателя с регулированием от частотного преобразователя. При том же напряжении питания потребляемый ими ток примерно на 20% меньше.

Им нет альтернативы как в области частот вращения от 100 до 1500 об/мин, так и выше 4000 об/мин, а также в приводе установок третьего и меньших габаритов для всех частот вращения.

Конструкция вентильных электродвигателей отличается от асинхронных в основном тем, что на роторе вместо короткозамкнутой «беличьей клетки» размещены постоянные магниты. Этим обусловлены как их преимущества — более высокий, чем у асинхронных двигателей, КПД, меньшие габариты, — так и особенности, которые могут уменьшить срок службы и надежность, если правильно не учесть их при разработке конструкции.

Во-первых, постоянные магниты, особенно магниты «неодим-железо-бор», подвержены коррозии, в связи с чем необходимо обеспечить их надежную герметизацию.

Во-вторых, в вентильных электродвигателях присутствует магнитное притяжение пакетов ротора к статору. Серийные асинхронные электродвигатели имеют, как правило, одну пару полюсов, поэтому у них, несмотря на малый электромагнитный зазор, практически отсутствуют силы магнит-

ного притяжения между ротором и статором.

Все известные ПВЭД имеют число пар полюсов больше единицы, что приводит к появлению сил одностороннего магнитного притяжения, которые дополнительно нагружают подшипники, смещая пакеты ротора относительно оси вращения. Это приводит к увеличению дебаланса и, следовательно, вибрации, особенно на повышенных частотах вращения. Указанные силы тем больше, чем меньше электромагнитный зазор между статором и ротором и чем выше магнитная проницаемость элементов ротора, обращенных к статору.

Если эти особенности учтены правильно, то срок службы и надежность вентильных электродвигателей будут не меньше срока службы и надежности асинхронных.

### Особенности конструкции

В вентильных двигателях производства НОВОМЕТА герметизация магнитов осуществляется специальными элементами конструкции, которые исключают контакт постоянных магнитов с жидкостью внутри двигателя и, следовательно, коррозию и «вспучивание» магнитов.

По сравнению с вентильными машинами других производителей двигатели НОВОМЕТА имеют увеличенный электромагнитный зазор и не содержат магнитомягких полюсов. Следовательно, их подшипники подвергаются меньшим нагрузкам от сил односто-

**Рис.1** ПВЭДН 400-117-3800-6.0. Холостой ход. Температура корпуса 95°С. Опытный образец



**Рис.2** ПВЭДН 400-117-3800-6.0. Холостой ход. Температура корпуса 95°С. Серийный образец



роннего магнитного притяжения и обладают потенциально большим сроком службы. Статор изделий компаундирован, внутри обмотки

размещен датчик температуры. На все габариты двигателей имеются системы ТМС, средняя наработка которых уже составляет более 500 суток.

Ротор электродвигателя на частоту вращения до 3000 об/мин имеет традиционную конструкцию со сплошным валом и подшипниками в расточке статора. В конструкции электродвигателей на частоты вращения выше 4000 об/мин применены инновационные решения, благодаря которым (а также предварительной балансировке пакетов) удается получать низкий уровень вибрации как при первоначальной сборке электродвигателя, так и при замене части пакетов ротора.

На рис.1 представлена зависимость виброскорости от частоты вращения для вентильного двигателя мощностью 400 кВт габарита 117 мм, конструкция которого аналогична двигателям на 3000 об/мин. Для сравнения на рис.2 представлены те же характеристики для того же двигателя, но для случая, когда в конструкцию введены элементы, служащие для снижения вибрации. В обоих случаях пакеты ротора были предварительно отбалансированы. Видно, что уровень виброскорости при частотах вращения, соответствующих резонансным, снижается в 2,5 раза.

Анализ работы 251 УЭЦН с вентильными двигателями (рис.3) показывает, что Конструкционная Надежность ПВЭД, которая рас-

считывается по непосредственным отказам исследуемого оборудования, кратно превосходит общую надежность УЭЦН.

Так, прогноз средней наработки при определении общей надежности согласно расчетам по программе «Novomet Stat Pro» составляет 594 сут., в то время как прогноз средней наработки при расчете конструкционной надежности вентильных двигателей превышает 2500 сут. Расхождение прогноза и реальной величины надежности при таких объемах выборки не превышает 10%. [5]

Отметим, что общая надежность рассчитывается по всем демонтажам УЭЦН независимо от причины и является производением конструкционной и эксплуатационной надежности. Эксплуатационная надежность рассчитывается по отказам, вызванным нарушением условий эксплуатации, а конструкционная определяет потенциал наработок погружного оборудования при условии его штатного использования.

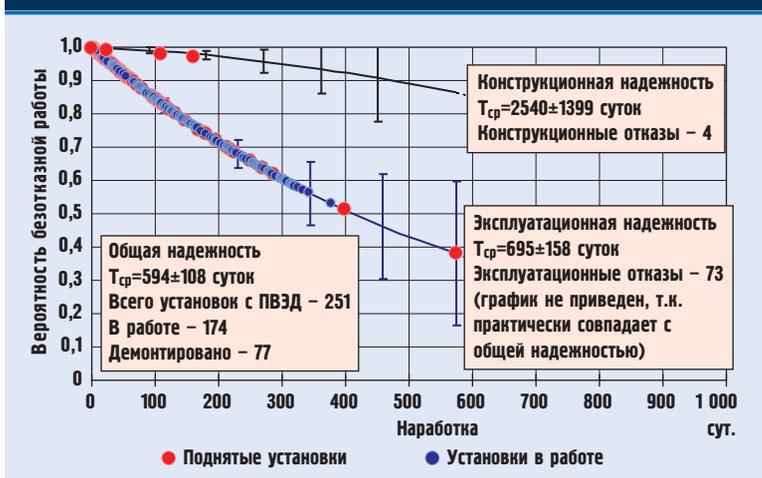
## Тестирование и ремонт

Разработчики вентильных машин совместно с сервисными службами компании провели технологическую проработку особенностей приемо-сдаточных испытаний и ремонта этих изделий, модернизировали оснастку и испытательные стенды. Это позволило с начала 2009 года успешно проводить тестирование, текущий и капитальный ремонт вентильных ПЭД всех типоразмеров не только на заводе, но и на сервисных базах.

Здесь необходимо отметить, что основой успешного внедрения новых разработок является строгое выполнение требуемых регламентов по запуску и обслуживанию установок. Тщательное их выполнение позволяет в полной мере раскрыть потенциал нового оборудования, в то время как несоответствующее исполнение может «закрыть» любую инновационную идею.

Если говорить о вентильных двигателях, то в качестве примера можно привести результаты внедрения серийно изготавливаем-

**Рис.3.** Общая и эксплуатационная надежность УЭЦН и конструкционная — вентильных двигателей



мых установок третьего габарита. По ряду проектов — в частности, при прокате в ТНК-ВР, «Саратовнефтегаз» — эти установки имеют среднюю наработку до отказа 368 сут. Если говорить об аналогичных установках, запущенных в рамках других проектов, то здесь средняя наработка составляет всего 91 сут. Конструкционная надежность установок одинаковая, а качество выполнения работ у разных сервисных организаций, видимо, разное.

## Характеристики

Рабочие характеристики вентиляльных электродвигателей с номинальной частотой вращения 3000 и 6000 об/мин в относительных единицах представлены на рис. 4. За базовые взяты номинальные мощности, токи, напряжения и частоты вращения. КПД, как параметр безразмерный, представлен в своем «абсолютном» значении. Характеристики даны для наиболее типичного для эксплуатации случая, когда частота вращения стабилизирована станцией управления «НОВОМЕТ-03».

Оба двигателя имеют одинаковую геометрию железа статора и активной части ротора, то есть, с точки зрения электромеханического преобразования энергии они отличаются только обмоточными данными.

Сравнение характеристик показывает, что максимум КПД двигателя с номинальной частотой вращения 3000 об/мин, в отличие от КПД двигателя на 6000 об/мин, смещен влево, в область меньших нагрузок. Это позволяет в режиме близком к максимуму КПД двигателя на 3000 об/мин работать в более широком диапазоне нагрузок, чем двигателю на 6000 об/мин.

В настоящее время во всех отечественных СУ питание электродвигателя осуществляется по так называемой шестиимпульсной схеме, в которой шесть раз за период происходит коммутация тока. При коммутации возникают пиковые перенапряжения, амплитуда которых превышает удвоенное напряжение питания двигателя, а частота шестикратно выше частоты питания.

Из-за перенапряжений снижается срок службы трансформатора и кабеля, а из-за несинусоидальной формы тока в двигателе возникают дополнительные потери.

В компании при выпуске последних серий ПВЭДН были приняты меры по повышению их КПД. Использованы электротехнические стали других марок, увеличен коэффициент заполнения пазов медью, а главное, в августе 2010 года запущена в серию станция управления «НОВОМЕТ-03».

Реализованный в ней режим векторного управления позволил осуществлять питание вентиляльного двигателя синусоидальным напряжением. За счет этого удалось не только избавиться от перенапряжений, но и снизить дополнительные потери в двигателе. Кроме того, СУ стала универсальной, способной управлять как вентиляльными, так и асинхронными двигателями.

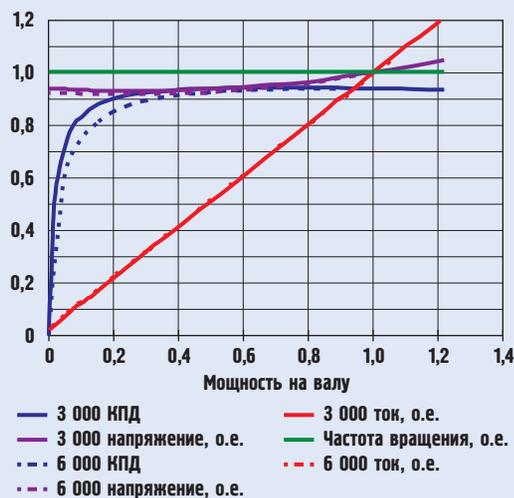
Замеры показали, что для двигателей с номинальной частотой вращения 3000 об/мин КПД повышается до 93%, а для двигателей на 6000 об/мин — до 94%. Таким образом, переход на векторный способ управления позволил увеличить КПД примерно на 2%.

Считается [3], что с повышением частоты вращения за счет гидродинамических потерь в зазоре «ротор–статор» должно существенно возрасти выделение тепла, что требует применения дополнительных теплообменников. Благодаря выбору оптимальной геометрии активной части в двигателях производства НОВОМЕТ с номинальной частотой вращения 6000 об/мин перегрев обмотки якоря не превышает ее перегрева в асинхронных электродвигателях.

Приведем данные по КПД и перегреву вентиляльной машины (мощность 400 кВт в одной секции, 117 габарит, длина 8,5 м, номинальная частота вращения 6000 об/мин).

Поскольку в настоящее время не существует испытательного стенда на такие мощности при частоте вращения 6000 об/мин, а его создание потребовало бы чрезвычайно высоких затрат, электродвигатель был испытан на стенде-

Рис. 4 Характеристики ВД 117 габарита с номинальной частотой вращения 3000 и 6000 об/мин в относительных единицах



скважине ОКБ БН в составе УЭЦН. В процессе испытаний электродвигатель был нагружен до 450 кВт.

В номинальном режиме (расход 1450 м<sup>3</sup>/сут, напор 1500 м, КПД насоса 61,5%) максимальный перегрев обмотки якоря при скорости охлаждающей жидкости 0,4 м/сек составил 44°C, средний — 38°C.

Испытания проводились при питании от шестиимпульсной СУ. КПД электродвигателя определялся расчетно-экспериментальным способом. При работе двигателя на воздухе без гидрозащиты были определены потери холостого хода  $P_{xx}$ . При работе в составе УЭЦН измерялись подводимая мощность  $P_1$ , ток I и температура внутри двигателя.

КПД определяли по известному выражению:

$$\eta = (P_1 - P_{xx} - P_m - P_d) / P_1, \quad (1)$$

где  $P_m = 3 \cdot I^2 \cdot R_\phi$  — потери в меди обмотки якоря;

$R_\phi$  — активное сопротивление фазы при данной температуре;

$P_d$  — дополнительные потери от реакции якоря в статоре и роторе. Только эта, относительно небольшая (меньше 20%), часть общих потерь определялась расчетным путем. Температура внутри двигателя определялась по данным телеметрии, погружная часть которой содержала специ-

альный датчик температуры обмотки и проверялась методом сопротивления.

Параметры двигателя и измеренные величины при температуре внутри двигателя 115°C приведены в табл.1.

$P_{1,}$	$P_{ex}$	$P_d$	$I$	$R_{ф}$
кВт	кВт	кВт	А	Ом
434,2	12,86	6,20	82,3	0,746

Табл. 1

Определенный таким способом КПД составил 92,1%.

### Энергоэффективность

В ряде работ описаны попытки как теоретически, так и экспериментально оценить экономию электроэнергии, получаемую при замене в УЭЦН асинхронного двигателя на вентильный. Зафиксированные в них результаты достаточно противоречивы. И выводы, сделанные на их основании, получились не менее противоречивыми: от экономии в размере от 3% [3] до энергоэффективности в 30% и даже выше [2,6].

Такой разброс получался потому, что в промысловых условиях практически невозможно соблюсти одинаковые скважинные параметры для двух экспериментов, а теоретические оценки без необходимой экспериментальной базы зачастую имеют низкую точность.

Гораздо проще и корректнее можно провести сравнение энергоэффективности УЭЦН с асинхронными и вентильными двигателями в цеховых или лабораторных условиях, в которых скважинные параметры строго контролируются.

Известно, что относительная величина экономии на погружном агрегате (двигатель + насос) УЭЦН при одинаковой мощности на валу двигателей в зависимости от КПД асинхронного ( $\eta_a$ ) и КПД вентильного двигателя ( $\eta_b$ ) определяется выражением:

$$\mathfrak{E}_{дв} = (1 - \eta_a / \eta_b) * 100\% \quad (2)$$

На рис.5 показано, какая может быть максимально возмож-

ная экономия энергии в зависимости от величины КПД вентильного двигателя при разных значениях КПД асинхронного.

Согласно рис.5 зависимость экономии энергии от значений КПД двигателей в рассматриваемом диапазоне практически линейна. Из этого следует, что среднее значение экономии, несмотря на технологические колебания КПД двигателей, будет близким к расчетному. А вот для конкретных предельных случаев колебания могут быть достаточно большими.

Например, при номинальном КПД асинхронного двигателя 85%, а вентильного 93% экономия будет колебаться от 6,5% в неблагоприятном случае до 10,6% в лучшем (заштрихованная область на рис.5). Эти оценки сделаны исходя из предположения, что технологические колебания КПД больших серий ПЭД лежат в пределах порядка  $\pm 1$  пункта этого показателя.

При оценке эксплуатационной эффективности замены двигателей это обстоятельство необходимо учитывать. Поэтому корректное подтверждение эффективности новой техники в данном случае можно получить только при массовой замене одних типов двигателей на другие.

На конференции «Механизированная добыча '2011» было предложено оценивать энергетическую эффективность систем с вентильными двигателями коэффициентом снижения относительных потерь, как это, по словам докладчика, определено в ГОСТ 51677-2000 [7].

Считаем это предложение неприемлемым. Для рассматриваемых полнокомплектных систем правильнее пользоваться величиной относительных потерь по выражению (3) (см. стр.64).

Во-первых, по ГОСТ 51677-2000 основной показатель по энергоэффективности ПЭД это КПД. И никакого определения коэффициента снижения относительных потерь в сложных системах там не приводится;

Во-вторых, если уже определены потери в каждом элементе, то вообще лучше пользоваться их абсолютными значениями;

В-третьих, зная величину относительных потерь, легко рассчитать и экономическую составляющую новой разработки;

И последнее, значительно проще замерить на входе в системы потребляемую энергию или мощности и найти их отношения по выражению (3) (см. стр. 64), а не вычислять потери в каждом элементе системы.

Попытки заменить величину относительных потерь другими показателями приводят к выводам, вводящим потребителя в заблуждение. Так, в статье Н.В.Шенгура и А.А.Иванова [3] утверждается, что при разнице в КПД асинхронного и вентильного электродвигателей в 10–12% «общее теоретическое повышение КПД УЭЦН составит около 5–6%». Видимо, авторы имели в виду **разность** в КПД УЭЦН с асинхронным и вентильным двигателями.

По нашему мнению, этот показатель (**разность** КПД) только «затемняет» существо дела, поскольку ни в коей мере не характеризует «вклад» вентильного двигателя ни в энергетическую, ни в экономическую эффективность УЭЦН.

КПД УЭЦН есть произведение всех составляющих этой системы: насоса, двигателя, кабеля (если определять его «КПД» как отношение мощностей на выходе и входе), трансформатора и станции управления. Поэтому отношение (1) КПД УЭЦН с разными двигателями будет в точности равно соотношению КПД двигателей, разумеется, при равных КПД остальных составляющих УЭЦН.

В реальности же КПД УЭЦН с вентильным двигателем дополнительно увеличивается благодаря уменьшению потерь в кабеле, трансформаторе и станции управления, причем «вклад» вентильного двигателя тем больше, чем меньше КПД этих элементов.

Утверждается также, что «повышение КПД УЭЦН за счет замены ПЭД на ВЭД на практике составит 3–4 %», поскольку с повышением частоты напряжения питания растут потери в трансформаторе и уменьшается его КПД.

Следует отметить, что и здесь используется тот же показатель (разность КПД УЭЦН).

В действительности при постоянной величине и синусоидальной форме напряжения повышенные частоты питания, например, в два раза приводит к тому, что его КПД повышается, поскольку потери в меди трансформатора остаются постоянными, а потери в стали уменьшаются примерно на 30% [8]. Выводы об уменьшении КПД УЭЦН не соответствуют действительности.

С чем можно согласиться, так это с тем, что массу и габариты трансформатора при повышении частоты можно уменьшить.

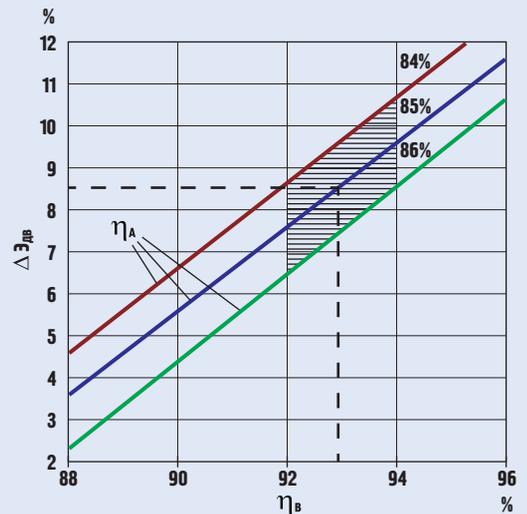
В конце 2010 года на стендах скважинах ОКБ БН КОННАС в соответствии с пожеланиями нефтяников был проведен ряд демонстраций на тему «Сравнение энергетических показателей УЭЦН с асинхронным и вентильным двигателями». На демонстра-

циях присутствовали технические специалисты нефтяных компаний России и СНГ, включая изготовителей ПВЭД («Роснефть», ЛУКОЙЛ, «Газпром нефть», ТНК-ВР, «РуссНефть», РИТЭК ИТЦ, «Тургай Петролеум», «Беларуснефть»).

Для экономии времени первоначально планировалось проводить испытания параллельно на двух УЭЦН, каждая из которых была бы смонтирована в своей скважине. Однако из-за разности температуры воды в скважинах и слишком большого, хотя и допускаемого по API и ТУ ( $\pm 5\%$ ) разброса в энергетических характеристиках насосов, полученные результаты были признаны некорректными. Пришлось перейти на испытания с одним ЭЦН.

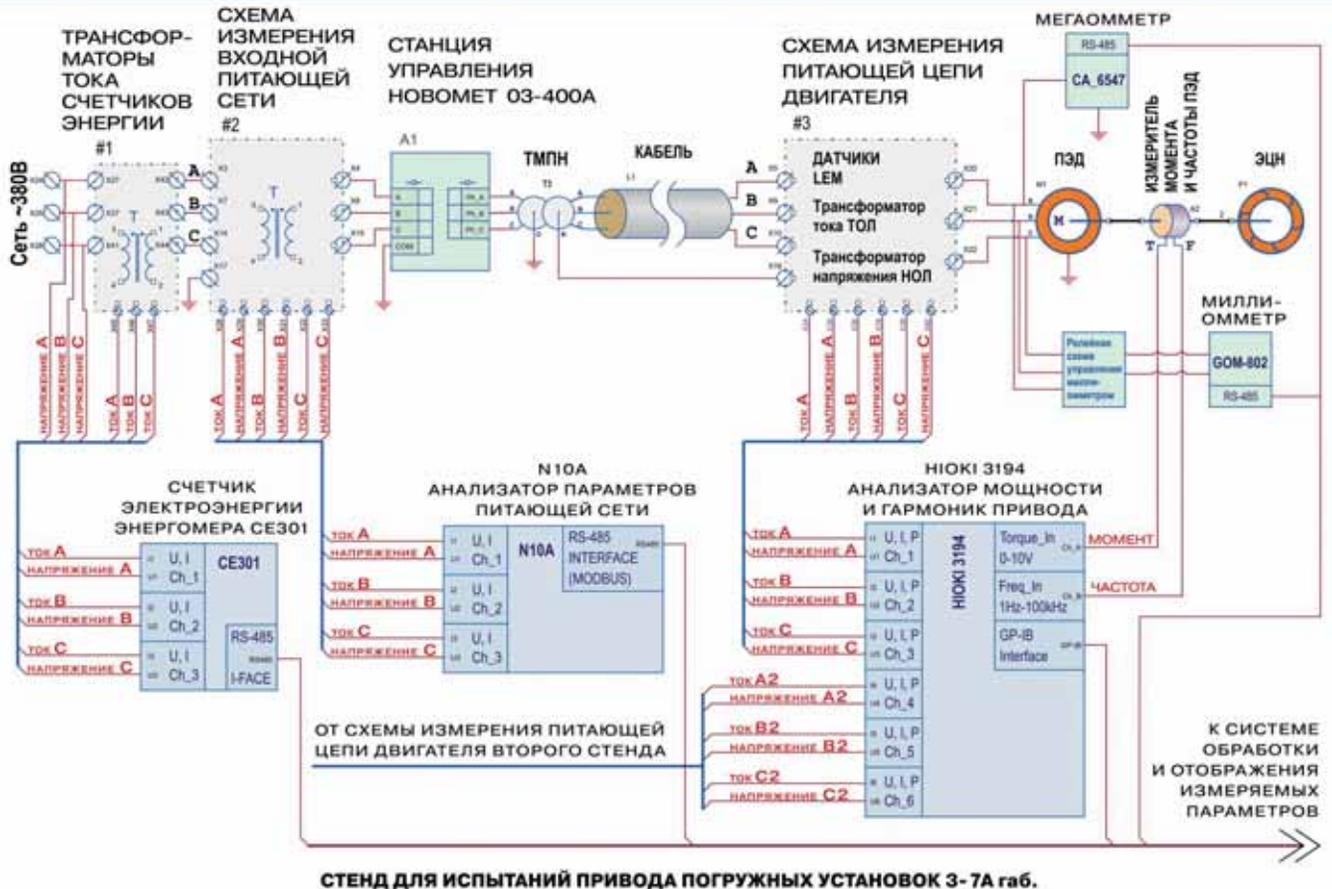
УЭЦН размещалась в испытательной скважине на глубине 50 метров. При работе УЭЦН вода с выхода насоса через НКТ поступала через систему измерения

**Рис.5 Величина экономии ( $\Delta \epsilon_{дв}$ ) в зависимости от значений КПД асинхронных ( $\eta_A$ ) и вентильных ( $\eta_B$ ) двигателей**



расхода и давления снова в бак. Электрическая схема стенда

**Рис.6 Принципиальная электрическая схема стенда**



Тип УЭЦН	Стенд			Двигатель (прибор НИОКИ МОТОР)			Сеть (прибор N10A)			Счетчик энергии		Расчет экономии		
	Q	H	Tж	U	I	N	U	I	N	t	W	ΔЭ <sub>дв</sub>	ΔЭ <sub>с</sub> по энер- гии	ΔЭ <sub>с</sub> по мощ- ности
	м³/сут	м	°C	В	А	кВт	В	А	кВт	час	кВт*час	%	%	%
с АД	502	271	44	1330	20,1	34,7	410	69,4	39,5	1	39,9			
с ВД	502	271	42	1204	16,2	32,3	410	62,5	35,3	1	35,5	6,9	11,0	10,6

Табл. 2

представлена на рис.6.

Погружная часть установок со-держала центробежный насос с номинальным расходом 500 м³/сут, напором 270 метров и электродвигатели с номинальной мощностью 45 кВт. Наземную часть составляла универсальная станция управления «НОВОМЕТ-03-400», повышающий трансформатор и кабель длиной 1150 метров, сечением 16 мм². Эксперименты проводились при частоте вращения 2910 об/мин.

Измерение мощности осуществлялось на входе в станцию управления (анализатором сети «LUMEL N10A», кл. точности 0,2) и на входе в двигатель (анализатором электроэнергии «HiOKI 3194 MOTOR» кл. точности 0,1). Дополнительно на входе в станцию управления измерялась электрическая энергия счетчиком «Энергомера СЕ301R33043», кл. точности 0,5.

Такая схема измерений была выполнена в соответствии с пожеланиями представителей нефтяных компаний, в которых принято оценивать энергоэффективность по показаниям счетчиков энергии.

Стенд-скважина была оборудована расходомером MAG6000, кл. точности 0,25, и датчиком давления YUMO dTRANS h02, кл. точности 0,1.

После проведения испытания производился подъем установки и замена одного типа электродвигателя на другой, затем испытания повторялись в течение того же промежутка времени. При этом расход и давление на выходе насоса задавались строго равными соответствующим величинам при первом испытании. Температура воды поддерживалась авной 46 ± 3°С. Результаты измерений приведены в табл.2.

Величину относительной экономии энергии за счет собственно вентильного электродвигателя определяли по выражению:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{дв}} = (N_a - N_b) * 100\% / N_a$$

где  $N_a$ ,  $N_b$  — мощность, измеренная на входе в электродвигатель соответствующего типа.

Экономия составила 6,9 %.

Общая относительная экономия системы определяется по формуле:

$$\Delta \mathcal{E}_c = (W_{c,a} - W_{c,b}) * 100\% / W_{c,a} \quad (3)$$

где  $W_{c,a}$ ,  $W_{c,b}$  — энергия, потребляемая из сети УЭЦН с асинхронным и вентильным электродвигателями соответственно.

Равным образом экономия может быть определена по измененным в той же точке мощностям. Величины экономии, определенные по энергии и по мощности, практически совпали и составили 11% и 10,6% соответственно. На рис.7 показаны напорно-энергетические характеристики только погружных частей УЭЦН, а на рис.8 — всей системы.

Из рисунков видно, что при одинаковой полезной работе мощность, потребляемая как вентильным двигателем, так и всей системой, в которую он вмонтирован, меньше, чем в установке с асинхронным двигателем во всем диапазоне подач. Анализ потребляемых мощностей по рис.7 и 8 позволяет оценить «вклад» в экономию погружной и наземной части установок.

Для практической оценки создана программа расчета энергоэффективности УЭЦН, учитывающая потери в составных частях установки, включая кабель,

трансформатор и станцию управления.

Результаты расчета по программе хорошо совпадают с результатами испытаний.

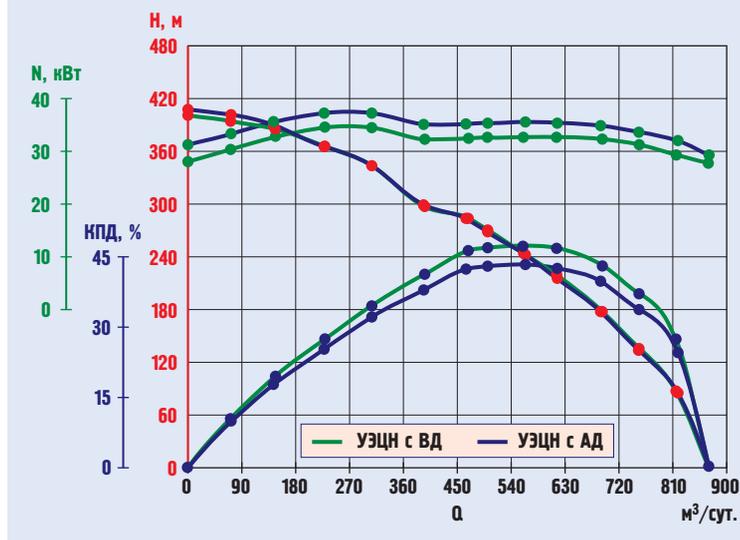
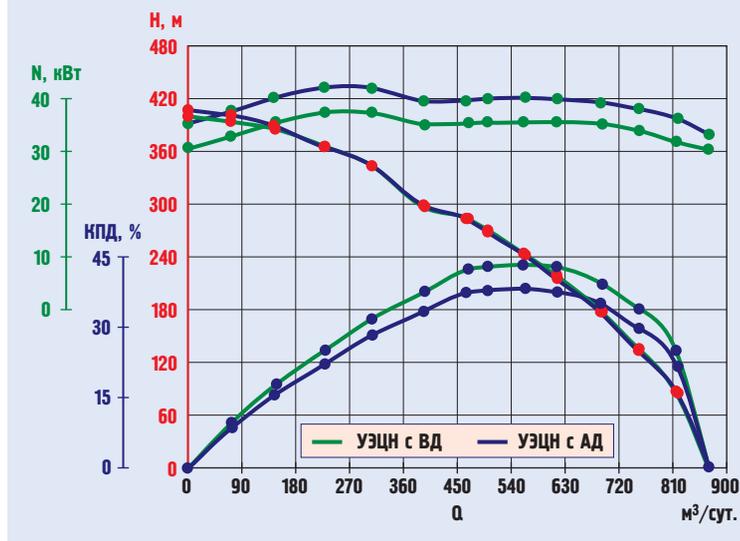
С помощью этой программы можно учесть два обстоятельства, которые несколько уменьшили разницу показателей не в пользу вентильного электродвигателя. В номенклатуре предприятия не нашлось вентильного и асинхронного двигателей на одинаковое напряжение. При испытаниях напряжение на вентильном двигателе составило 1202 В, на асинхронном — 1330 В, что увеличило ток вентильного двигателя на 10%.

Кроме того, в вентильный электродвигатель было залито синтетическое масло, а в асинхронный — масло МДГП, что при температуре воды 46°С привело к увеличению потерь в вентильном двигателе, по расчетам, на 620 Вт. Учет этих потерь и разницы в напряжениях привел бы к тому, что экономия на двигателе составила 8,7%, а общая — 12,6%. Если длина кабеля была бы 2000 м (вместо 1150 м на испытаниях), то общая экономия увеличилась бы до 13,8%.

Способность вентильных электродвигателей работать с высоким КПД при повышенных частотах вращения использована при создании ряда энергоэффективных УЭЦН на основе наиболее удачных ступеней насосов. На стендах-скважинах заказчикам были продемонстрированы: установка с асинхронным двигателем и насосом 5А-500 с КПД 57% и установка с вентильным двигателем и насосом 5А-500 с КПД 69%. При одинаковой полезной работе последняя была экономичней на 26%.

**Выводы:**

- Отечественные машиностроители заняли лидирующее положение в области инновационных разработок погружных вентильных двигателей на частоту вращения от 100 до 10000 об/мин и мощностью в одной секции от 6 до 400 кВт. Общее число поступивших в эксплуатацию ПВЭД приближается к 5000 шт;
- Компания НОВОМЕТ имеет наиболее широкую линейку таких двигателей как по габаритам, так и по номинальным мощностям;
- Впервые в отрасли начата эксплуатация частотных преобразователей универсального типа с векторным способом управления и подачей на вентильный двигатель напряжения синусоидальной формы. Это позволило увеличить КПД вентильных двигателей до 93%, а СУ стала способной управлять как вентильными, так и асинхронными двигателями;
- КПД вентильных двигателей в диапазоне частот вращения 2000–3500 об/мин на 6–10% выше, чем асинхронных. На других частотах вращения энергоэффективность вентильных машин еще более существенна;
- Проводить замеры энергопотребления установок с двигателями различного типа рекомендуется на стандах-скважинах. В эксплуатационных условиях воспроизвести параметры среды с необходимой точностью для двух сравнительных экспериментов практически невозможно;
- Разработана программа расчета электрических потерь во всех элементах УЭЦН. Показана ее хорошая сходимости с экспериментальными данными;
- За счет замены асинхронного двигателя на вентильный энергопотребление может быть сокращено на 10–13%. При использовании в УЭЦН вентильных двигателей и насосов с высоким КПД общая экономия может достигать 26%. •

**Рис.7 Напорно-энергетические характеристики только погружной части установок****Рис.8 Напорно-энергетические характеристики системы систем УЭЦН с ВД и УЭЦН с АД****Литература:**

- [1] Санталов А.М. Вентильные электродвигатели для погружных электронасосов. Сборник докладов VI Всероссийской технической конференции «Производство и эксплуатация УЭЦН». Альметьевск, 1996.
- [2] Павленко В.И., Гинзбург М.Я. Тенденция замены ПЭД на ВД: мир последовал за инновацией ЛУКОЙЛа. «Нефтегазовая Вертикаль» 2010, №20.
- [3] Шенгур Н.В., Иванов А.А. Мифы и реальности внедрения вентильного электродвигателя в УЭЦН. «Инженерная практика» 2011, №3.
- [4] Сагаловский А.В. Вентильная реальность в механизированной добыче. Москва, 20–22 апреля 2011, Выставка-конференция «Механизированная добыча 2011».
- [5] Слепченко С.Д. Математика прогноза «Нефтегазовая Вертикаль», 2006, №12
- [6] Игнатьев М. Энергосбережение и энергоэффективность. «Нефтегазовая Вертикаль», 2010, №12.
- [7] ГОСТ 51677—2000 «Машины электрические асинхронные мощностью от 1 до 400 кВт включительно. Двигатели. Показатели энергоэффективности».
- [8] Петров Г.Н. Электрические машины. Часть I. «Энергия», Москва, 1974, с. 34, с. 57.