

# АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ СКВАЖИН, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ МЕХАНИЗИРОВАННЫМИ СПОСОБАМИ (ШТАНГОВЫЕ ГЛУБИННЫЕ НАСОСЫ И ЦЕПНОЙ ПРИВОД)

Хакимьянов М.И., Ковшов В.Д., Светлакова С.В.

НПП «Грант», г. Уфа

## ВВЕДЕНИЕ

Такие факторы современной экономической ситуации как истощение ресурсов нефтяных пластов, высокая стоимость электроэнергии, ограниченный объем средств на ремонт скважин обуславливают необходимость автоматизации процессов нефтедобычи.

Автоматизация скважин, эксплуатируемых штанговыми глубинными насосами (ШГН) заключается, прежде всего, в контроле таких технологических параметров, как динамограмма, динамический уровень жидкости, ваттметрограмма, потребляемый ток, частота качаний, влияние газового фактора, давление на устье скважины, суточная производительность скважины. Функции управления должны обеспечивать дистанционное включение и отключение приводного электродвигателя, аварийное отключение установки, периодический режим эксплуатации, плавное регулирование скорости вращения электродвигателя при помощи преобразователя частоты.

Созданием средств автоматизации ШГН занимаются многие зарубежные и отечественные предприятия: Lufkin Automation (США), НПП «Грант» (Уфа), НПФ «Интек» (Уфа), ООО «Микон» (Н. Челны), ТНПВО «Сиам» (Томск) и другие. Тем не менее, абсолютными успехами в этом направлении не может похвастаться ни одна фирма и объясняется это, прежде всего бурным развитием измерительной, преобразовательной и микропроцессорной техники, предоставляющей разработчикам возможности решения все более и более сложных задач.

## 1. ПЕРЕНОСНЫЕ И СТАЦИОНАРНЫЕ СИСТЕМЫ

Если до недавнего времени контроль работы скважин осуществлялся в основном посредством *переносных диагностических комплексов*, состоящих, как правило, из накладного динамографа и эхолота, то в последнее время наметилась тенденция к массовому оснащению скважин стационарными системами телеуправления.

Современные требования к автоматизации объектов нефтедобычи обуславливают целесообразность установки *стационарных систем телединамометрирования*. Стационарная система автоматизации включает

в себя датчики технологических параметров, станцию управления с контроллером и радиомодемом для двухсторонней передачи информации. Такие системы могут работать автономно, все управление электроприводом насоса (включение, отключение, изменение скорости качаний) производится автоматически контроллером либо дистанционно с диспетчерского пункта, обеспечивая выполнение таких обязательных функций как:

- контроль технологических параметров скважины и насоса;
- автоматизация управления электроприводом ШГН;
- оптимизация режимов эксплуатации скважины;
- оперативное выявление аварийных и ненормальных режимов работы оборудования;
- передача оперативной информации о состоянии объекта на диспетчерский пункт по телеметрическим каналам связи.

По измеренной динамограмме контроллер анализирует режим работы и состояние насосного оборудования и рассчитывает производительность скважины.

По данным ваттметрирования контролируются токи и напряжения по каждой фазе, ведется технический учет потребляемой электроэнергии, оценивается сбалансированность привода ШГН, осуществляется защита от перенапряжения и перекоса фаз и других факторов.

## 2. ДАТЧИКИ УСИЛИЯ

Основным элементом системы автоматизации установки ШГН является датчик динамометрирования, так как именно он позволяет получить информацию, необходимую для анализа состояния объекта и режима его работы.

*Датчики усилия могут устанавливаться в следующих местах:*

- 1) непосредственно на штоке (накладные датчики);
- 2) на штоке между траверсами;
- 3) на штоке между верхней траверсой и замками;
- 4) на балансире СКН.

Все четыре способа установки датчиков усилия условно показаны на рисунке 1.

Выбор места расположения датчика усилия обуславливается, как правило, желанием получить наибольшую чувствительность для конкретного типа датчика, требованиями к простоте его конструкции и удобством монтажа.

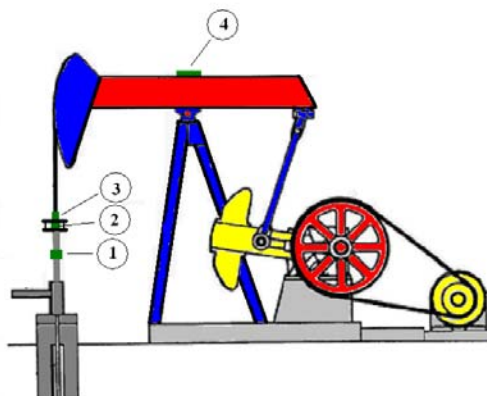


Рисунок 1 – Места установки датчиков усилия на СКН:  
 1 – непосредственно на штоке; 2 – между траверсами;  
 3 – между верхней траверсой и замками; 4 – на балансирае

**Устанавливаемые на балансирае датчики усилия** измеряют деформацию балансира, что позволяет косвенным образом судить о действующем на полированный шток усилиии.

Однако датчики усилия, устанавливаемые на балансирае, не обеспечивают необходимую точность измерения усилия в штоке по целому ряду причин: принцип действия таких датчиков основан на измерении деформации изгиба балансира, который изготавливается с большим запасом прочности (что уменьшает чувствительность датчика), величина деформации балансира СКН зависит не только от приложенной к нему нагрузки, но и от температуры окружающей среды, конструкции СКН, материала самого балансира, а также, для приведения результатов измерения к абсолютным единицам усилия требуется проведение калибровки датчика непосредственно на СКН.

**Накладные датчики** на полированный шток измеряют продольную либо поперечную деформацию штока и также не могут дать информацию об абсолютных значениях нагрузки и поэтому не используются в стационарных системах.

**Датчики, размещаемые над верхней траверсой**, воспринимают нагрузку на шток непосредственно, и, следовательно, обеспечивают максимальную чувствительность определения усилия. На рисунке 2 показан чувствительный элемент датчика усилия типа «Loadtrol» фирмы «Lufkin» (США).

Достоинством датчика с чувствительным элементом в виде пустотелого цилиндра является, прежде всего, простота конструкции. Однако монтаж подобных датчиков предусматривает практически полную разборку траверсы, что является очень трудоемкой операцией.

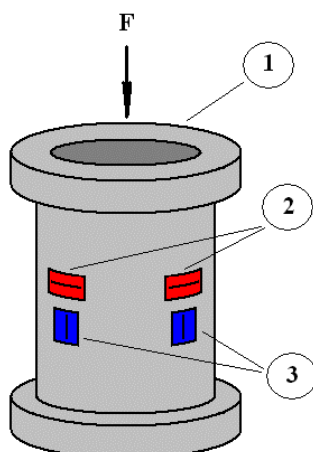


Рисунок 2 – Чувствительный элемент датчика усилия типа «Loadtrol»:  
 1 – упругий элемент, 2 – поперечные тензорезисторы,  
 3 – продольные тензорезисторы

*Датчики усилия, размещаемые между траверсами СКН.* Такая конструкция датчиков имеет преимущества аналогичные предыдущей: вес штанг действует непосредственно на чувствительный элемент, обеспечивая чувствительность, а также возможность их градуировки в абсолютных единицах в процессе изготовления. Благодаря этому им присущи такие важные эксплуатационные свойства, как взаимозаменяемость и простота поверки. К недостаткам размещения датчиков между траверсами иногда относят необходимость разгрузки траверсы при монтаже и демонтаже, а также наличие подвижного кабеля между траверсой и основанием станка-качалки. Однако, эти недостатки весьма условны, поскольку не сказываются на технических характеристиках датчика.

Большинство этих датчиков являются разновидностями «вилки», один из вариантов которой представлен на рисунке 3. Однако такая конструкция не обладает достаточной жесткостью.

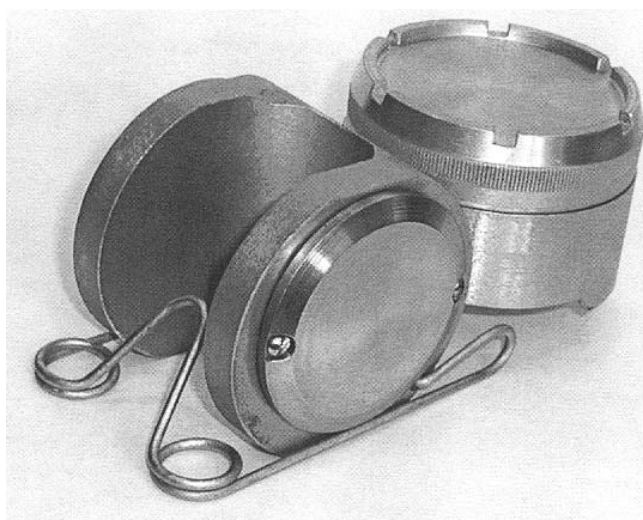


Рисунок 3 – Стационарный датчик усилия «Микон»

*Проведенный анализ показывает*, что оптимальными местами расположения стационарных датчиков усилия являются установка на шток между нижней и верхней траверсами, а также между верхней траверсой и ограничителем. Именно в этих местах нагрузка будет восприниматься непосредственно к чувствительному элементу, обеспечивая максимальную чувствительность. Однако, как уже отмечалось выше, для установки датчика над верхней траверсой требуется полная разборка подвески штока, что является довольно трудоемкой операцией. В связи с этим, наиболее целесообразным, на наш взгляд, следует считать размещение датчика усилия на штоке между нижней и верхней траверсами СКН.

*Тензорезистивный датчик усилия системы ДДС-04* (рисунок 4) имеет форму подковы и устанавливается на полированном штоке между траверсами. Трехточечная схема расположения чувствительных элементов обеспечивает самоустановку датчика усилия между плоскостями траверс при не параллельности и шероховатости их плоскостей. Конструкция датчика усилия защищена патентом на изобретение РФ № 2221227.

Можно выделить три основных преимущества датчика ДДС-04:

- подковообразная форма облегчает установку датчика;
- цифровой интерфейс RS-485 датчика ДДС-04 не подвержен помехам и не критичен к длине кабеля;
- наличие встроенного в датчик ДДС-04 микропроцессора позволяет существенно расширить функциональные и эксплуатационные возможности системы в целом, сняв часть «работы» с контроллера станции управления и повысив надежность ее работы.

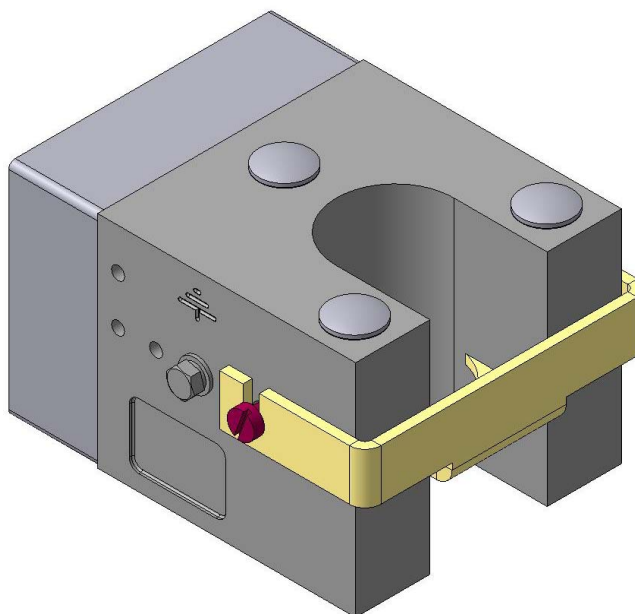


Рисунок 4 – Датчик усилия ДДС-04

### 3. ДАТЧИКИ ПОЛОЖЕНИЯ

Для выполнения задач динамометрирования и ваттметрирования, необходимо измерять параметры движения точки подвеса насосных штанг, а именно: длину хода, частоту и период качаний, моменты прохождения штоком нижней и верхней мертвых точек.

Для измерения параметров движения штока используются различные средства: датчики угла наклона, маятники с потенциометрами, концевые выключатели, бесконтактные датчики положения, устанавливаемые на выходном валу редуктора и линейные акселерометры.

При использовании датчиков угла наклона балансира приходится измерять малые изменения углов в условиях воздействия вибраций. Поэтому датчики параметров движения штока на основе датчиков угла наклона являются относительно сложным изделием, предназначенным для работы с конкретным типом станка-качалки и, как следствие, используются крайне редко.

Во многих современных системах динамометрирования перемещение штока определяют путем измерения ускорения акселерометром с последующим двойным интегрированием его выходного сигнала, что является очень удобным решением: малогабаритный интегральный акселерометр может быть совмещен в одном корпусе с датчиком усилия.

Однако на сегодняшний день практически все динамографы с датчиками перемещения на основе акселерометров по паспорту имеют погрешность не менее 5%. На полезный сигнал ускорения накладываются большие шумовые составляющие, вызванные вибрациями элементов конструкции. На рисунке 5 приводится график ускорения точки подвеса штанг, измеренный на цепной установке. Как видно из графика, величина шумов соизмерима с уровнем полезного сигнала, и даже превышает его.

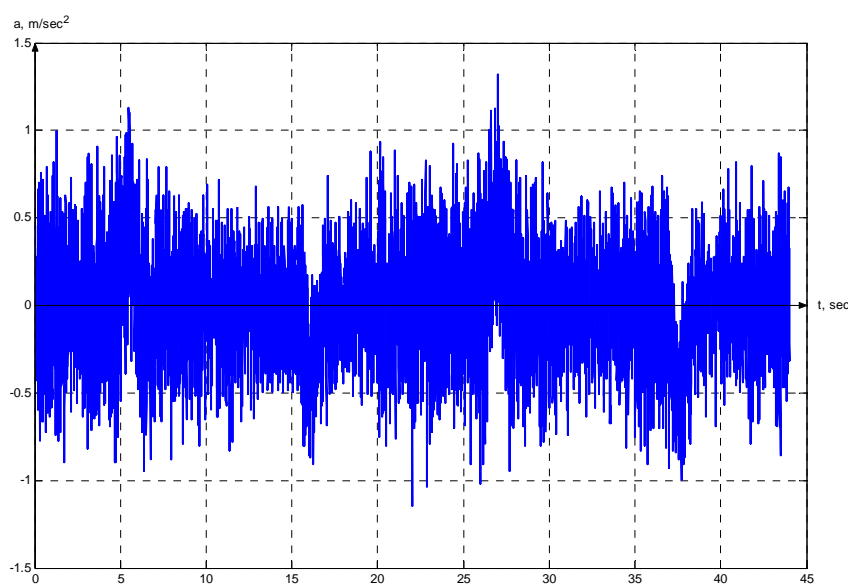


Рисунок 5 – График ускорения цепной установки без фильтрации и обработки

Очевидно, что характерная для таких датчиков погрешность не позволяет обеспечить достоверность получаемых динамограмм и, соответственно, адекватное принятие решений по результатам их анализа.

***В системе динамометрирования ДДС-04 используется датчик положения***, устанавливаемый на редукторе СКН, работающий на эффекте Холла (рисунок 6). Датчик положения крепится при помощи кронштейна на редуктор установки ШГН и срабатывает при прохождении мимо него двух магнитов. Монтируется датчик положения таким образом, чтобы магниты проходили мимо датчика Холла в моменты, когда шток установки ШГН находится в крайних нижнем и (или) верхнем положениях.

#### 4. КОНТРОЛЛЕРЫ И СТАНЦИИ УПРАВЛЕНИЯ

К настоящему времени известен целый ряд контроллеров различных производителей, использующихся в станциях управления установок ШГН: SAM (Lufkin, США), «Мега» (НПФ «Интек», Уфа), «Орион» («Аякс», Ульяновск), «Телебит» («Линт», Казань), станция управления АСУС-02 («Экос», Уфа) и другие.



Рисунок 6 – Датчик положения системы ДДС-04

Использование контроллеров обеспечивает решение таких задач, как автоматизация работы станка-качалки, оптимизация режимов работы оборудования, оперативное выявление аварийных ситуаций и несоответствия режимов эксплуатации оборудования, передача оперативной информации о состоянии объекта на пульт оператора по сети телемеханики.

Типичная станция управления включает в себя контроллер, элементы силовых устройств включения и отключения электродвигателя, радиомодем и набор датчиков технологических параметров. Отдельные станции управления имеют в своем составе преобразователи частоты для регулирования скорости вращения электродвигателя.

**Контроллер SAM Well Manager** фирмы **Lufkin** (рисунок 7) предусматривает подключение аналоговых датчиков усилия и положения, а также дискретных датчиков положения, расположенных на валу электродвигателя и выходном валу редуктора. Данные с этих датчиков используются для контроля и управления работой насосной установки и для визуального отображения данных на дисплее контроллера или на экране портативного компьютера.



Рисунок 7 - Контроллер SAM Well Manager фирмы Lufkin

Контроллер SAM Well Manager по формируемой динамограмме определяет степень заполнения ствола скважины жидкостью. Если анализ покажет, что скважина находится в состоянии опустошения, то двигатель отключится и скважина переводится в режим ожидания. По окончании периода ожидания блок управления включает двигатель и переводит установку в режим откачки.

Программное обеспечение контроллера SAM Well Manager обеспечивает обнаружение отдельных неисправностей в насосной установке по динамограмме.

Контроллер SAM Well Manager предусматривает возможность работы с двумя конфигурациями датчиков динамометрирования:

- 1) датчик усилия располагается на штоке над верхней траверсой (датчик типа Loadrol), датчик положения, работающий на эффекте Холла, устанавливается на выходном валу редуктора;
- 2) датчик деформации балансира совмещен с датчиком угла наклона балансира.

Контроллер обеспечивает 3 режима работы:

- 1) все включения и отключения электродвигателя производятся по командам с диспетчерского пункта;
- 2) включения и отключения электродвигателя производятся по заданным временным уставкам (периодическая эксплуатация);
- 3) управление осуществляется автоматически по результатам анализа динамограмм.



Контроллер имеет аналоговый выход для подключения частотного преобразователя для плавной регулировки скорости вращения электродвигателя.

Недостатком данной системы является высокая стоимость. Так, например, стоимость только контроллера фирмы «Lufkin» (США) в комплекте с датчиками динамометрирования соизмерима с ценой целой станции управления в полной комплектации отечественного производства.

**Станция управления «Интел-СУС» (ЗАО «Линт», Казань)** в комплекте с контроллером «Телебит» и датчиками динамометрирования ДДС-04 имеет практически аналогичные функциональные возможности и представляет собой законченное изделие. Система комплектуется программным обеспечением на всех уровнях.

Помимо датчиков динамометрирования к контроллеру подключаются датчики ваттметрирования для контроля энергетических параметров: токов и напряжений по каждой фазе, активной и реактивной мощности, коэффициента мощности, проведения технического учета электроэнергии и построения ваттметрограмм.

Широкое применение на промыслах Татарии получили контроллеры **«Мега» (НПФ «Интек», Уфа)**. Настоящие контроллеры работают как с датчиками динамометрирования собственной разработки, так и с ДДС-04.

Функционально контроллер аналогичен описанным выше, система комплектуется собственным программным обеспечением. Часть скважин не оборудована датчиками положения, определение начала хода штока производится путем математического анализа графика изменения усилия.

Определенных успехов достигли и разработчики **контроллера «Орион» («Аякс», Ульяновск)**. Указанные контроллеры на сегодняшний день наиболее приспособлены для совместной работы с элементами системы ДДС-04 в плане сбора и представления информации. Формирование массива динамограммы происходит непосредственно в самом датчике ДДС-04, контроллеру достаточно периодически считывать массив из памяти датчика по цифровому протоколу «Modbus-RTU». В датчике реализована функция сравнения динамограмм, и если форма динамограммы не изменилась, передача массива не требуется, что освобождает каналы связи.

Программное обеспечение системы телемеханики позволяет отправлять измеренные динамограммы и рассчитанные данные по дебиту в корпоративную систему **«АРМИТС»**, охватывающую все нефтегазодобывающие предприятия ОАО «Татнефть».

Примером законченной отечественной системы автоматизации установки ШГН является **станция управления АСУС-02 НПФ «Экос»** (рисунок 8). Автоматизированная станция АСУС-02 имеет силовую часть, специализированный контроллер и радиостанцию, обеспечивающую связь с диспетчерским пунктом.



Рисунок 8 – Станция управления ACUC-02 производства НПФ «ЭКОС»

Отличительной особенностью станции управления ACUC-02 является то, что в ней реализовано ваттметрирование с отлаженным алгоритмом определения таких характеристик как: перегрузка по току, отклонение напряжения от нормы, перекос фаз, отклонение частоты питающего напряжения, коэффициента гармоник, коэффициента мощности обрыв, проскальзывание ремней, биение в редукторе, разбаланс противовесов, и других. Станция укомплектовывается также элементами систем динамометрирования ДДС-04.

Возможность станции управления ACUC-02 совмещать функций ваттметрирования и динамометрирования является важным достоинством, поскольку повышает достоверность диагностики режима работы установки и выявления неисправностей.

Система автоматизации, базирующаяся на применении станции управления ACUC-02 и элементах системы ДДС-04, обладает следующими возможностями:

- точная автоматизированная балансировка станка-качалки;
- подсчёт потребленной электроэнергии;
- определение производительности скважинной установки по динамограмме;
- оценка динамики изменения дебита скважины;
- часовой (за последние 24 часа) и суточный (за последние 30 суток) архивы дебита;
- автоматическое управление откачкой в периодическом режиме;
- программируемая задержка автоматического включения при пропадании напряжения в сети;
- автоматическое выключение при аварийных ситуациях;
- построение динамограмм расчетным и экспериментальным способами;
- графики изменения во времени параметров (тренды);
- отчеты текущего состояния и последнего аварийного отключения;
- интеграция в SCADA-системы.

Сравнивая возможности станции управления АСУС-02 в комплекте с ДДС-04 и станции, базирующейся на контроллере Lufkin, можно сделать следующие выводы:

В АСУС-02 помимо динамометрирования производится еще контроль электрических параметров – ваттметрирование, тогда как в контроллере Lufkin электрическую мощность получают косвенным методом - измеряется скорость вращения электродвигателя, исходя из чего вычисляют момент на валу и мощность.

В контроллере Lufkin есть средства отображения информации непосредственно на объекте – большой графический дисплей и возможность подключения портативных компьютеров. Однако наличие такого дисплея оказывается не вполне целесообразно при построении дистанционной телеметрии. Кроме того, в составе системы АСУС-02 также может поставляться модуль сбора информации МСИ-07, позволяющий просматривать результаты динамометрирования и другие данные непосредственно на месте.

В контроллере Lufkin предусмотрена функция управления частотным регулятором - есть соответствующий выходной сигнал и заложены необходимые алгоритмы управления. Однако в настоящее время стоимость частотных регуляторов еще слишком высока для массового оснащения ими всего фонда скважин.

Стоимость импортных систем в несколько раз выше отечественных разработок. Кроме того, при использовании отечественных станций управления все проблемы с ремонтом и модернизацией оборудования будут решаться значительно быстрее.

В настоящее время все более широко используются цепные приводы установок ШГН. По сравнению с традиционными балансирными СКН цепные приводы обеспечивают большую длину хода штока (до 6-9 м) при меньшем энергопотреблении. Кроме того, движения штока происходит с постоянной линейной скоростью, что положительно влияет на режим работы насосного оборудования. Фирмой «Грант» разработаны специальные модификации датчиков усилия и положения для применения на цепных приводах. Применены специальные конструктивные решения для исключения случаев зацепов длинных кабелей за элементы арматуры. В настоящее время проводится согласование способов установки датчиков на цепные приводы с заводами-изготовителями.

## 5. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ «DINAMOGRAPH»

В состав системы динамометрирования стационарной ДДС-04 входит базовое программное обеспечение (ПО) «DinamoGraph», предназначенное для считывания, обработки и хранения данных по изменению усилия на штоке станка-качалки во времени (динамограмм), полученных как в виде отдельных файлов, формируемых системой телемеханики, так и переписанных из памяти переносного модуля сбора информации (МСИ).

По графику динамограммы можно судить о работе насосного оборудования, а также оценивать дебит скважинной установки.

### Основные функции, выполняемые ПО «DinamoGraph»:

- формирование архива данных по исследованиям скважин;
- построение устьевого, теоретической и плунжерной динамограмм (рисунок 9);
- анализ динамограмм в целях диагностики состояния насосного оборудования (рисунок 10);
- оценка производительности насосной установки по нескольким методикам (рисунок 10);
- расчет допустимых напряжений в штангах;
- формирование отчетов по исследованиям скважин в табличной и графической формах;
- экспорт данных в файл нужного формата.
- в программе предусмотрена возможность наложения всех замеров по одной скважине, благодаря этому можно отслеживать эволюцию состояния скважинного оборудования, что способствует оперативному выявлению изменений в работе оборудования и, вследствие этого, своевременному обслуживанию насосной установки.

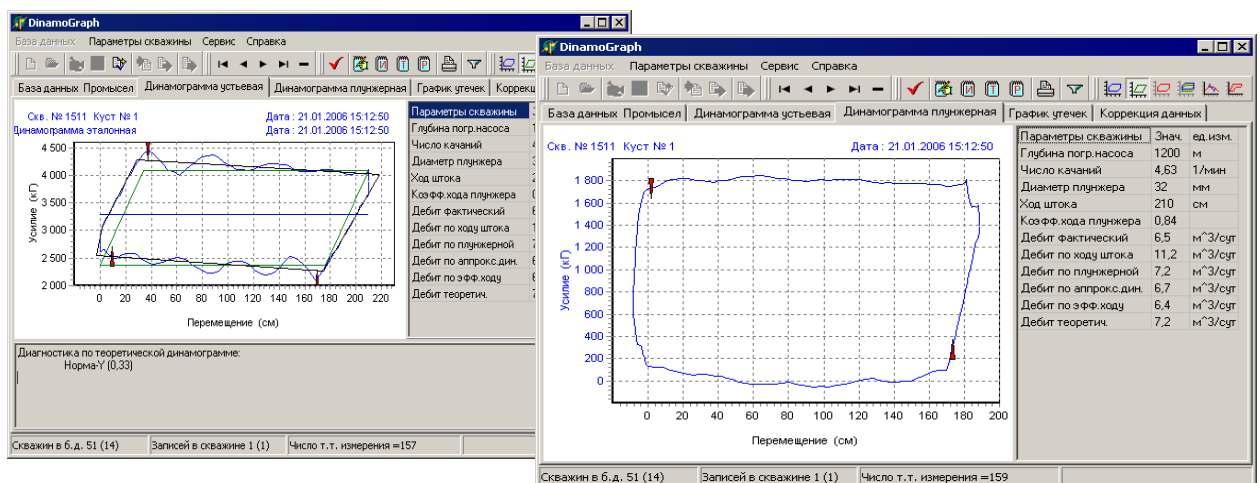


Рисунок 9 – Устьевая, теоретическая и плунжерная динамограммы

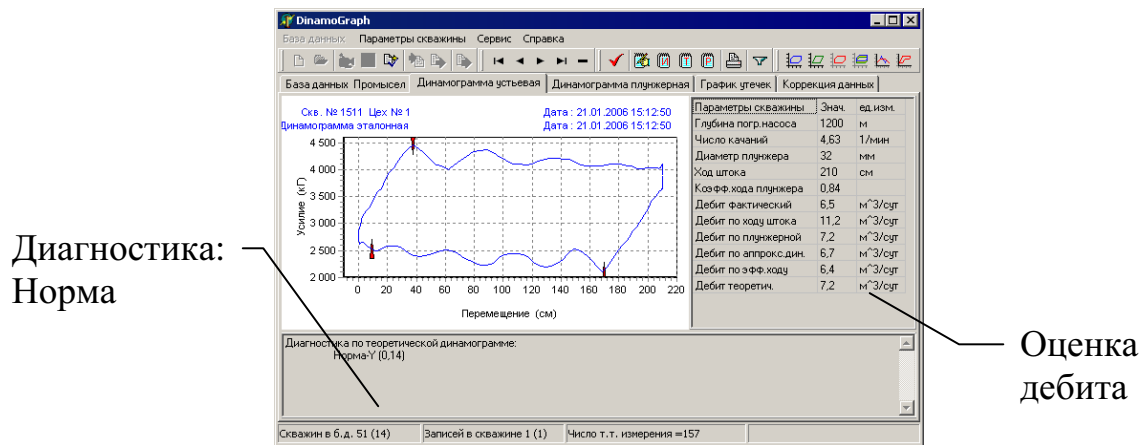


Рисунок 10 – Диагностика глубиннонасосного оборудования и оценка производительности скважины в ПО «DinamoGraph»

## 6. ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМЫ ДДС-04

### 1. Результаты исследований в НГДУ «Белкамнефть».

В ходе исследований ставились следующие задачи:

- 1) продемонстрировать возможность автономной записи динамограмм в память контроллера с последующим считыванием их в компьютер;
- 2) продемонстрировать возможности программного обеспечения по диагностике состояния оборудования и оценке дебита скважин по динамограмме.

В ходе автономной работы контроллера за 20 часов было получено около 240 динамограмм. Как показал данный эксперимент, из этих десяти динамограмм существенно отличаются те, которые сняты в ночное время – с 23-х часов вечера до 3-х часов ночи. При этом диагностика состояния глубиннонасосного оборудования в программе выдает сообщение о неработающем насосе из-за загрязнения. В остальных случаях отмечается наличие утечек из приемного клапана.

Рассчитанный в программе «DinamoGraph» по одной из методик дебит скважины составил в разное время суток от 5,7 до 9 м<sup>3</sup>/сут. Данные по ГЗУ для этой скважины 10,6 м<sup>3</sup>/сут. При этом нужно учитывать тот факт, что данные по ГЗУ отражают только текущее значение дебита на момент подключения скважины на замер и никак не среднесуточный дебит, как раз представляющий наибольшую важность для нефтяников.

**Выводы по результатам исследований:** система ДДС обеспечивает автономную запись динамограмм. Внутренняя память контроллера позволяет хранить около 1000 замеров динамограмм. Параметры работы и чтение данных из контроллера производятся при помощи ноутбука.

Все снятые динамограммы (за исключением и снятых в ночное время) показали наличие утечек в приемном клапане, что было подтверждено геологами НГДУ «Белкамнефть».

Программное обеспечение системы ДДС-04 показало однозначное наличие утечек в приемном клапане насоса. Применение системы ДДС-04 для контроля дебита позволяет в совокупности с ГЗУ получить не только значение дебита во время подключения скважины на замер, но вычислить среднесуточное значение.

## 2. Исследования в НГДУ «Елховнефть».

Был произведен анализ замеряемости скважинной продукции посредством ДДС-04, УМИ, СКЖ и тарированной емкости.

Результаты анализа показали совпадение замеров по ДДС-04 в пределах  $1 \text{ м}^3$  с показаниями СКЖ в 60% случаев, с УМИ – в 70% случаев, с ГЗУ и бочкой – в 100% случаев.

При следующем эксперименте на одной из скважин НГДУ «Елховнефть» в течение месяца отбивались динамограммы, по которым замерялся дебит посредством СКЖ и ДДС. Результаты эксперимента показаны на рисунке 11. По рисунку 11 отчетливо просматривается зависимость значений дебита, рассчитанных по данным ДДС от данных по СКЖ.

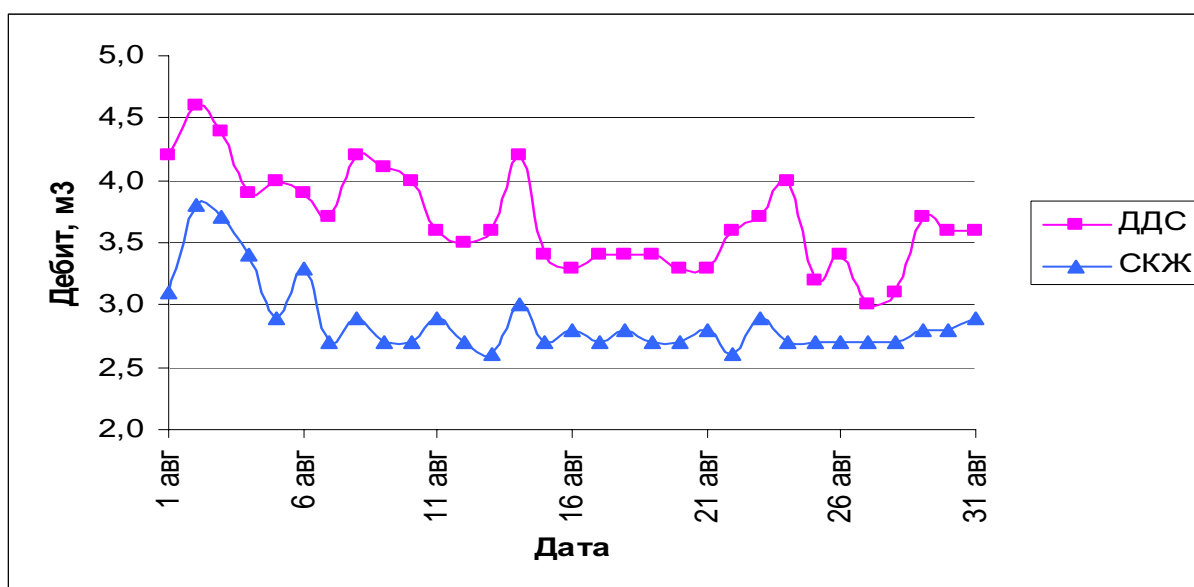


Рисунок 11 – Одновременные замеры дебита посредством ДДС и СКЖ

**Вывод:** если принять последнее за эталонное средство замера, то для получения достоверных данных по дебиту, измеренному по динамограмме, достаточно ввести поправочный коэффициент.