

*На правах рукописи*



**САБАНОВ СЕРГЕЙ ЛЕОНИДОВИЧ**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНОВЕШИВАНИЯ ПРИВОДА  
ШТАНГОВОЙ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ  
НА ТИХОХОДНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ**

Специальность

05.02.13 Машины, агрегаты и процессы (нефтегазовая отрасль)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Альметьевск – 2019

Работа выполнена на кафедре «Нефтегазовое оборудование и технология машиностроения» в государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Альметьевский государственный нефтяной институт».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Галеев Ахметсалим Сабирович**

Официальные оппоненты: **Тагирова Клара Фоатовна**  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
авиационный технический университет» / кафедра  
«Техническая кибернетика», профессор  
**Долов Темир Русланович**  
кандидат технических наук  
ФГАОУ ВО «Российский государственный  
университет нефти и газа (национальный  
исследовательский университет) имени И.М.  
Губкина» / кафедра «Машины и оборудование  
нефтяной и газовой промышленности», доцент

Ведущая организация: ООО «РН-БашНИПИнефть» (г. Уфа)

Защита состоится «13» марта 2020 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета Д 212.289.05 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте [www.rusoil.net](http://www.rusoil.net).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Латыпов Олег Ренатович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Диссертация выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» по Соглашению о предоставлении субсидии № 14.610.21.0019 от 23.10.17 по теме «Создание комплекса технологических решений для увеличения нефтеотдачи пластов, содержащих высоковязкую нефть», уникальный идентификатор работ RFMEFI61017X0019.

На сегодняшний день в связи со снижением темпов добычи, вовлечением в разработку трудноизвлекаемых запасов, увеличивается доля скважин, эксплуатируемых установками скважинных штанговых насосов (УСШН). Широкое распространение данного способа механизированной добычи обусловлено такими его достоинствами, как: высокий КПД в области низкого дебита скважин, эффективное применение при осложненных условиях добычи. Значительная часть добычи высоковязкой нефти осуществляется штанговыми установками. Высокая вязкость продукции в сочетании с направленным профилем ствола скважин, характеризующихся наличием участков повышенного кривизны и наклона, ограничивают скорость откачки штанговых установок, в связи с возникновением значительных сил сопротивления движению штанговой колонны, что может привести к рассогласованию движения головки балансира и колонны штанг. Кроме того, ограничение скорости откачки требуется для реализации непрерывного режима откачки малодебитных скважин, эксплуатируемых в периодическом режиме, который является низкоэффективным. Рассмотренные категории скважин эксплуатируются в тихоходном режиме, т.е. с небольшой скоростью откачки и малым числом качаний.

Существенное влияние на величину потребляемой УСШН электроэнергии и нагрузок на привод оказывает уравновешенность станка-качалки. Системы

уравновешивания, используемые в балансирных приводах штанговых установок, можно разделить на три группы: гидравлические; пневматические и являющиеся наиболее распространёнными - механические, в которых компенсация нагрузок на привод, действующих в точке подвеса колонны штанг, достигается за счет использования уравновешивающих грузов - противовесов.

Наиболее распространенными способами контроля уравновешенности балансирных приводов штанговых установок являются ваттметрирование и токометрирование. Метод токометрирования основан на анализе величины мгновенного тока на входе приводного электродвигателя, метод ваттметрирования - величины потребляемой электродвигателем мощности, определяемой посредством замеров мгновенных значений токов и напряжений. Наиболее распространенными критериями уравновешенности привода являются: равенство амплитудных значений тока или мощности при подъеме и спуске штанговой колонны; равенство площадей под кривой ваттметрограммы при ходе штанг вверх к площади под ваттметрограммой при ходе штанг вниз, т.е. равенство работ, совершенных электродвигателем при ходе штанг вверх и вниз. Эти методы требуют специальных измерений, сложных вычислений с использованием математических моделей, разработанных с многочисленными допущениями, которые обуславливают низкую точность уравновешивания.

Для мониторинга технического состояния внутрискважинного оборудования и режима работы скважины регулярно проводят динамометрирование. Динамограмма графически отображает фактическую нагрузку в точке подвеса штанг в зависимости от ее перемещения. Уравновешенность привода можно оценить по моменту на выходном валу редуктора, рассчитанному в зависимости от нагрузки в точке подвеса штанг. Широкая автоматизация объектов добычи предприятий, позволяет удаленно получить доступ к данным динамометрирования, с использованием которых можно аналитически рассчитать оптимальное положение противовесов в зависимости от задаваемого критерия уравновешенности: минимизации максимального крутящего момента на ведомом валу, минимизации потребляемой

электроэнергии и др. Таким образом, разработка уточненного метода уравнивания тихоходного привода штанговой установки исследованием математической модели, базирующегося на результатах динамометрирования является актуальной задачей.

### **Степень разработанности выбранной темы**

Вопросами уравнивания установок скважинных штанговых насосов посвящены работы следующих авторов: Адонин А.Н., Аливердизаде К.С., Асланов З.Ю., Астафьев Г.Н., Ахтямов М.М., Багиров М.М., Байрамов С.Б., Валеев М.Д., Вирновский А.С., Гольдштейн Е.И., Драготэску Н.Д., Зубаиров С.Г., Зюзев А.М., Ивановский В.Н., Ишмурзин А.А., Мищенко И.Т., Рабинович А.М., Уразаков К.Р., Чичеров Л.Г., Хакимьянов М.И., Шишлянников Д.И., Шищенко Р.И. и др.

Несмотря на существенный вклад вышеназванных исследователей и большое количество существующих методов уравнивания, ряд вопросов, возникающих при эксплуатации штанговых насосных установок, не решен. На сегодняшний день вопрос взаимозависимости между уравниваемостью станка-качалки, нагрузкой на выходном валу редуктора и энергопотреблением штанговой насосной установки недостаточно исследован. Известные методы уравнивания УСШН по энергетическим параметрам не учитывают непосредственно нагруженности редуктора, надежность которого в значительной степени предопределяет эффективность наземного привода штанговой установки.

В связи с вышесказанным, исследование влияния уравниваемости на параметры УСШН позволит углубить теоретические основы методов уравнивания балансирных приводов.

### **Соответствие паспорту заявленной специальности**

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (нефтегазовая отрасль), а именно, областям исследования: п.1 «Теоретические и экспериментальные исследования параметров машин и агрегатов и их взаимосвязей при комплексной механизации основных и вспомогательных процессов и операций».

**Цель работы** – теоретические и экспериментальные исследования критериев уравновешенности привода штанговой насосной установки, разработка метода уравнивания привода по крутящему моменту на выходном валу редуктора на базе данных динамометрирования.

Реализация цели диссертационной работы определила постановку и решение следующих **основных задач**:

- 1 анализ существующих критериев оценки и методов уравнивания балансирных приводов;
- 2 разработка математической модели балансира привода УСШН на тихоходных режимах работы, учитывающей уточненную зависимость скорости движения точки подвеса штанг от угловой скорости кривошипа;
- 3 исследование взаимосвязи критериев уравновешенности с энергоэффективностью и нагрузками на привод штанговых установок при добыче высоковязкой и парафинистой нефти;
- 4 экспериментальные исследования метода уравнивания привода УСШН на тихоходных режимах работы по динамограмме на скважинах по добычи высоковязкой нефти.

### **Научная новизна**

Исследованием разработанной математической модели кинематики балансира привода УСШН, отличающейся аналитической зависимостью крутящего момента на выходном валу редуктора от геометрии, распределения масс и нагрузки в точке подвеса штанг при допущении, что шарниры привода являются идеальными, уточнены оценки влияния уравновешенности приводов УР-9 Т-2500-3500, СК 8-3,5-4000, и ПНШТ 60-3-31,5 на энергопотребление штанговых насосных установок на тихоходных режимах работы.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель кинематики балансира привода установки скважинного штангового насоса на тихоходных режимах работы. Получена аналитическая зависимость крутящего момента на выходном валу

редуктора от геометрии, распределения масс и нагрузки в точке подвеса штанг при допущении, что шарниры привода являются идеальными.

2. Установлено, что изменение в широком диапазоне коэффициента уравновешенности привода на тихоходных режимах работы, влияет на энергопотребление штанговой установки в пределах 5%.

3. Установлены закономерности влияния вязкости откачиваемой жидкости и парафинизации скважины на величину нагрузок на привод и энергопотребление штанговых установок, а также на оптимальное положение уравновешивающих кривошипных грузов, обеспечивающих минимизацию максимального крутящего момента на выходном валу редуктора.

Практическая значимость работы подтверждена двумя справками о внедрении и заключается в следующем:

1. Разработанный метод уравновешивания и программное обеспечение «Баланс СК» используется УК ООО «ТМС групп» в процессе пуско-наладочных работ и эксплуатации УСШН.

2. Результаты научной работы интегрированы в учебный процесс ГБОУ ВО АГНИ, по курсу «Машины и оборудование нефтегазовых промыслов (Спец.главы)» для магистров, обучающихся по направлению подготовки 15.04.02 «Технологические машины и оборудование» программа «Проектирование нефтяного оборудования».

### **Методология и методы исследований**

При выполнении диссертационного исследования применялись: известные положения теоретической и прикладной механики; теории математического и компьютерного моделирования.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Метод уравновешивания балансирного привода установки скважинного штангового насоса на тихоходных режимах работы по моменту на выходном валу редуктора, определяемому аналитически на основе результатов динамометрирования. (Заявление о выдаче патента Российской Федерации на изобретение RU 2019 127 216 от 28.08.2019г.)

2. Математическая модель балансирного привода УСШН на тихоходных режимах работы, учитывающая аналитическую зависимость момента на выходном валу редуктора балансирного привода от геометрии, распределения масс и нагрузки в точке подвеса штанг в предположении, что шарниры привода являются идеальными.

3. Результаты экспериментальных исследований метода уравнивания приводов УСШН на тихоходных режимах работы по динамограмме.

4. Результаты теоретических исследований влияния вязкости откачиваемой жидкости и парафинизации скважины на величину нагрузок на привод, энергопотребление штанговых установок и положение уравнивающих кривошипных противовесов.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью разработанной математической модели, её адекватностью, использованием известных положений инженерных наук, сходимостью полученных результатов экспериментов с практическими данными.

Основные теоретические положения и результаты диссертационной работы докладывались: на Международной научно-практической конференции молодых ученых «Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии», г. Альметьевск, Альметьевский государственный нефтяной институт, 2017 г.; Международной научно-технической конференции молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности», г. Могилев, Белорусско-Российский университет, 2017 г.; Международной научно-практической конференции «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли» г. Альметьевск, Альметьевский государственный нефтяной институт, 2018 г.; Научной сессии преподавателей и аспирантов Альметьевского государственного нефтяного института, г. Альметьевск, Альметьевский государственный нефтяной институт, 2018 г.

## **Публикации**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 9 печатных работах, в том числе, 2 статьи – в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, 1 статья – в базе данных научного цитирования Scopus и 1 монография. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов, списка использованных источников из 112 наименований, содержит 180 страниц машинописного текста, 65 рисунков, 12 таблиц и 4 приложения.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введение** дана общая характеристика работы, раскрыта актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и основные задачи исследований, приведены основные защищаемые положения, научная новизна диссертации, теоретическая и практическая ценность исследований.

**Первая глава** посвящена анализу научно-технической литературы по уравниванию балансирных приводов и энергопотреблению установок штанговых скважинных насосов, проведен обзор критериев оценки уравновешенности и способов их контроля.

Одним из ключевых факторов, оказывающих влияние на работу УСШН, является уравновешенность привода, позволяющая уменьшить нагрузки на механизм, которые приводят к расшатыванию и усиленному износу оборудования.

На сегодняшний день в условиях промысла наиболее распространенным методом оценки уравновешенности балансирных приводов установок штанговых скважинных насосов является способ, основанный на анализе токограмм и ваттметрограмм, т.е. регистрации параметров электропитания, что требует дополнительных измерений и привлечения специальных приборов и дополнительного электротехнического персонала.

Уравнивание УСШН по энергетическим параметрам электродвигателя не учитывает нагруженности редуктора, наиболее ответственного и дорогого узла станка-качалки. При этом число отказов УСШН по причине неисправности электродвигателя незначительно, в то время как отказы, связанные с крутящим моментом на выходном валу редуктора, занимают ключевую позицию в статистике.

Во **второй главе** описана математическая модель балансирующего привода установки штангового скважинного насоса на тихоходных режимах работы, позволяющая вычислять момент на выходном валу редуктора и энергопотребление штанговой установки в зависимости от конструктивных параметров станка-качалки, положения уравнивающих противовесов и переменных нагрузок в точке подвеса штанговой колонны.

Механизм станка-качалки представляет собой четырёхзвенник и имеет одну степень свободы. Движение механизма описывается с помощью одного параметра, угла  $\varphi$  поворота кривошипа  $O_1O_2$  длины  $l_1$  (Рисунок 1). Кривошип вращается на оси  $O_1(x_1, y_1)$  редуктора:

$$x_2 = x_1 + l_1 \cos \varphi, \quad (1)$$

$$y_2 = y_1 + l_1 \sin \varphi. \quad (2)$$

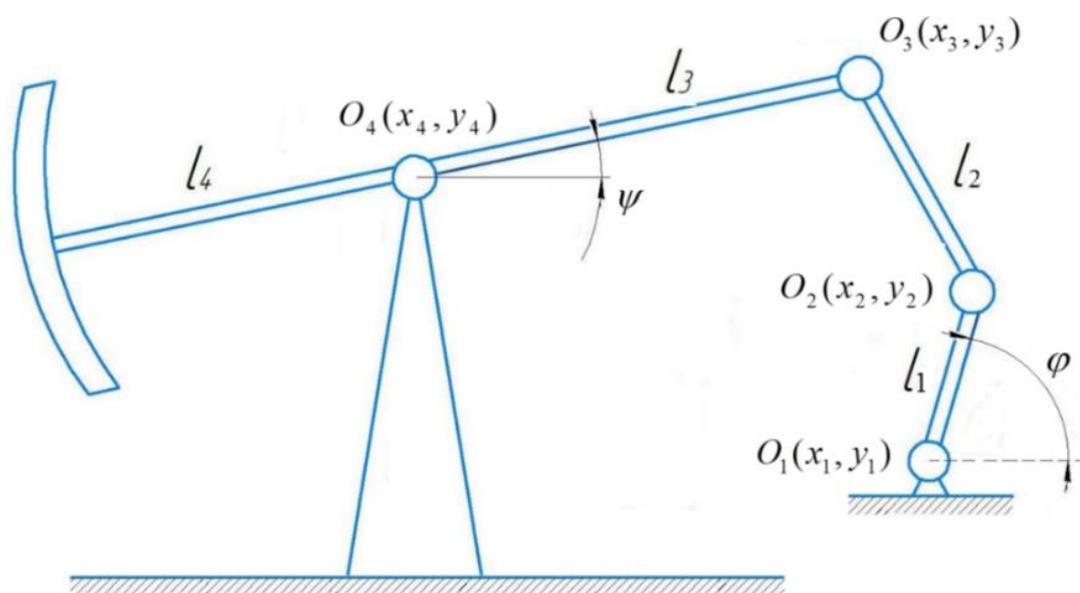


Рисунок 1 – Кинематическая схема балансирующего привода

Коромысло (балансир)  $O_3O_4$  вращается вокруг неподвижного центра  $O_4(x_4, y_4)$ :

$$x_3 = x_4 + l_3 \cos \psi, \quad (3)$$

$$y_3 = y_4 + l_3 \sin \psi, \quad (4)$$

где  $l_3$  – длина заднего плеча балансира;

$\psi$  – угол между балансиром и осью  $x$ .

Длина шатуна  $O_2O_3$  равна  $l_2$ :

$$(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 = l_2^2. \quad (5)$$

Получена зависимость угла поворота балансира  $\psi$  от геометрических параметров четырехзвенного механизма:

$$\psi = (-1)^n \arcsin \left( \frac{l_2^2 - l_3^2 - a^2 - b^2}{2l_3 \sqrt{a^2 + b^2}} \right) - \theta + \pi, \quad n \in \mathbb{Z}, \quad (6)$$

и угловой скорости балансира:

$$\psi' = \frac{l_1 l_3 \sin(\varphi - ((-1)^n \arcsin \left( \frac{l_2^2 - l_3^2 - a^2 - b^2}{2l_3 \sqrt{a^2 + b^2}} \right) - \theta + \pi)) + l_1(x_4 - x_1) \sin \varphi - l_1(y_4 - y_1) \cos \varphi}{l_3[(x_4 - x_1 - l_1 \cos \varphi) \sin \psi - (y_4 - y_1 - l_1 \sin \varphi) \cos((-1)^n \arcsin \left( \frac{l_2^2 - l_3^2 - a^2 - b^2}{2l_3 \sqrt{a^2 + b^2}} \right) - \theta + \pi)]}, \quad (7)$$

где  $b$  – проекция отрезка  $O_2O_4$  на вертикаль:

$$b = y_4 - y_1 - l_1 \sin \varphi; \quad (8)$$

$a$  – проекция отрезка  $O_2O_4$  на горизонталь:

$$a = x_4 - x_1 - l_1 \cos \varphi; \quad (9)$$

$\theta$  – угол между вертикалью и отрезком  $O_2O_4$ :

$$\theta = \arcsin \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}. \quad (10)$$

Во время эксплуатации штанговых установок на станок-качалку действуют следующие внешние силы: сила тяжести штанговой колонны, сила тяжести столба жидкости, сила сопротивления колонны о стенки скважины (граничное трение), сила вязкого трения штанговой колонны о жидкость, силы трения в редукторе и сила, создающая крутящий момент электродвигателя. В соответствии

с исследованиями Р.И. Шищенко, А.Х. Джанахмедова и др. остальные силы, действующие на привод (силы трения в шарнирах и прочее), незначительны и их влиянием можно пренебречь.

В тихоходных станках-качалках динамические нагрузки незначительны и соответственно момент на выходном валу редуктора определяется только нагрузкой на траверсе и уравновешивающим противовесом.

Для расчета момента на выходном валу используется принцип возможных перемещений, в соответствии с которым сумма работ активных сил на любом возможном перемещении системы равна нулю. Активными силами (Рисунок 2) являются:

1. Момент  $M_{кр}$ , приложенный к кривошипу (передается от двигателя через редуктор);
2. Сила тяжести кривошипа  $G_{кр}$  ( $G_{кр} = M_1 g$ );
3. Силы тяжести противовесов  $G_1$  и  $G_2$  ( $G_1 = m_1 g$ ,  $G_2 = m_2 g$ );
4. Сила тяжести коромысла  $G_3$  ( $G_3 = M_3 g$ );
5. Вес колонны  $G_{кол}$  ( $G_{кол} = m_{кол} g$ );
6. Вес столба жидкости (только при ходе вверх)  $G_{ж}$  ( $G_{ж} = m_{ж} g$ );
7. Сила сопротивления колонны  $F_{сопр}$  (направлена все время против движения колонны).

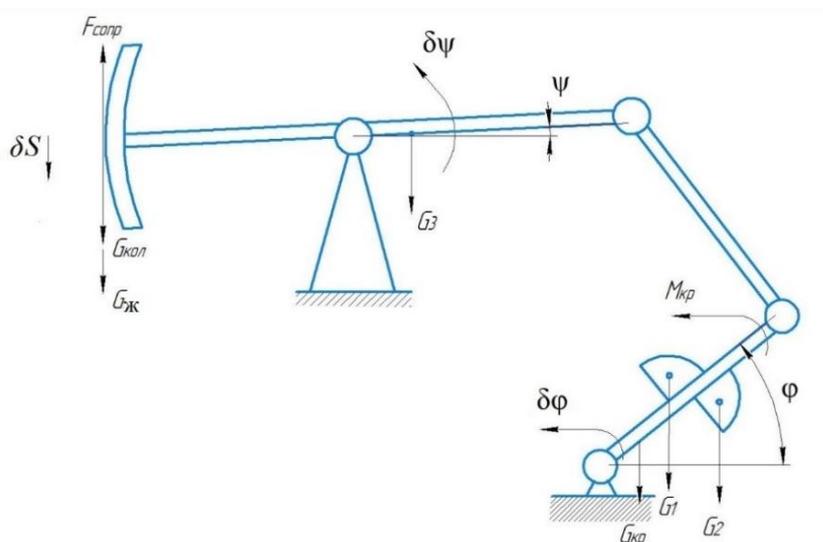


Рисунок 2 – Силевая расчетная схема привода УСШН

Работа активных сил на возможном перемещении составляет:

$$\begin{aligned} \delta A = & M_{кр} \delta \varphi - M_1 g \cdot \delta \varphi \cdot r_3 \cos \varphi - m_1 g (r_1 \cos \varphi - h_1 \sin \varphi) - \\ & - m_2 g (r_2 \cos \varphi + h_2 \sin \varphi) - M_3 g b \cos \psi \delta \psi + \\ & + (m_{кол} g + G_{ж} - F_{сопр}) \delta S, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $r_1$  и  $r_2$  – расстояние от оси вращения кривошипа до центра тяжести противовесов;

$r_3$  – расстояние от оси вращения до центра тяжести кривошипа;

$h_1$  и  $h_2$  – расстояние от оси кривошипа до центра тяжести противовесов;

$S$  – перемещение точки подвеса штанг.

Получен крутящий момент на выходном валу редуктора, в зависимости от конструкции УСШН и положения уравновешивающих противовесов:

$$\begin{aligned} M_{кр} = & M_1 g r_3 \cos \varphi + m_1 g (r_1 \cos \varphi - h_1 \sin \varphi) + m_2 g (r_2 \cos \varphi + h_2 \sin \varphi) + \\ & + M_3 g b \cos \psi \frac{\partial \psi}{\partial \varphi} - (m_{кол} g + G_{ж} - F_{сопр}) \frac{\partial \psi}{\partial \varphi} l_4, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $l_4$  – длина переднего плеча балансира.

Для упрощения процесса проведения расчетов была разработана программа «Баланс СК» на алгоритмическом языке C# в среде Microsoft Visual Studio 2010.

Программа позволяет сконфигурировать параметры установки скважинного штангового насоса на тихоходных режимах работы (Рисунок 3), оснащенной балансирным приводом и провести автоматизированные расчеты для определения:

- максимального, минимального и размаха крутящего момента на выходном валу редуктора;
- уравновешенности тихоходного балансирного привода;
- рекомендованных значений положения противовесов в зависимости от максимальной и минимальной нагрузки в точке подвеса штанг;
- зависимости энергопотребления от положения противовесов на кривошипе.

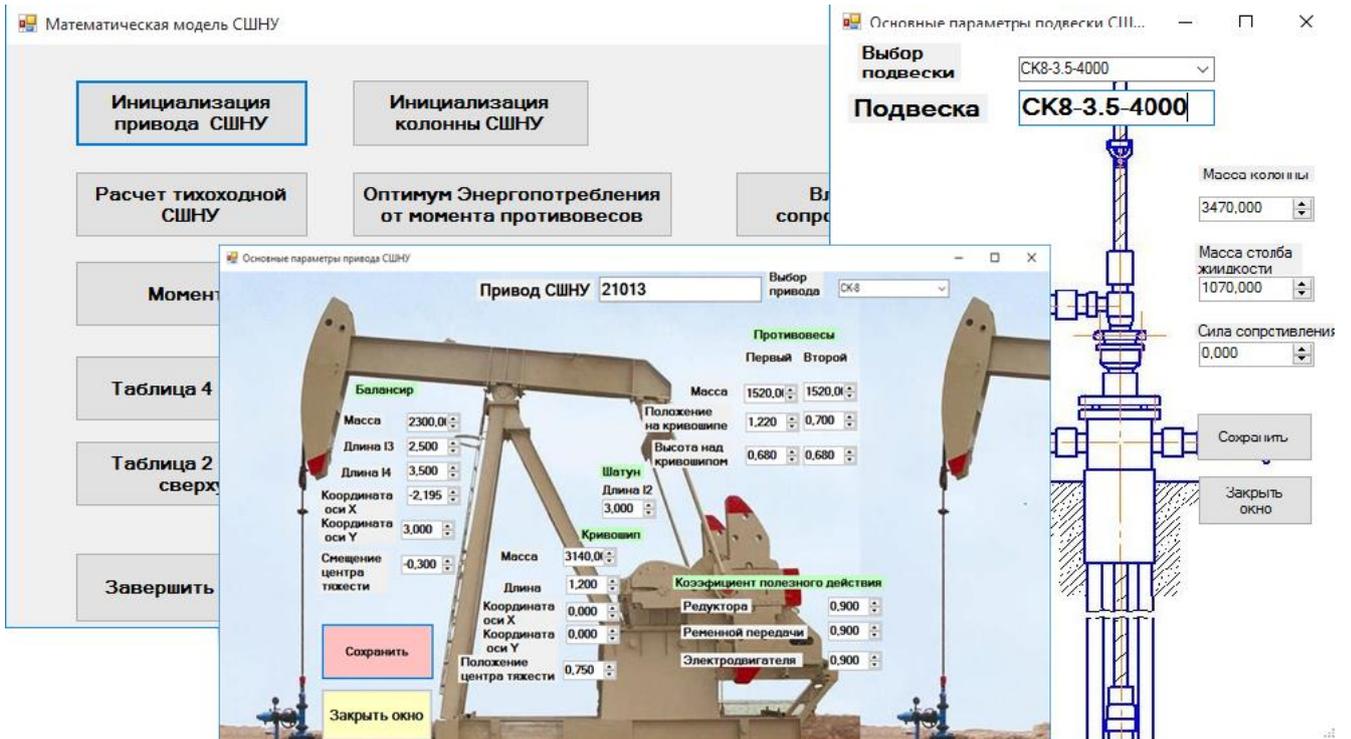


Рисунок 3 – Основные окна ПО «Баланс СК»

Пример результатов расчета программы показан на Рисунке 4.

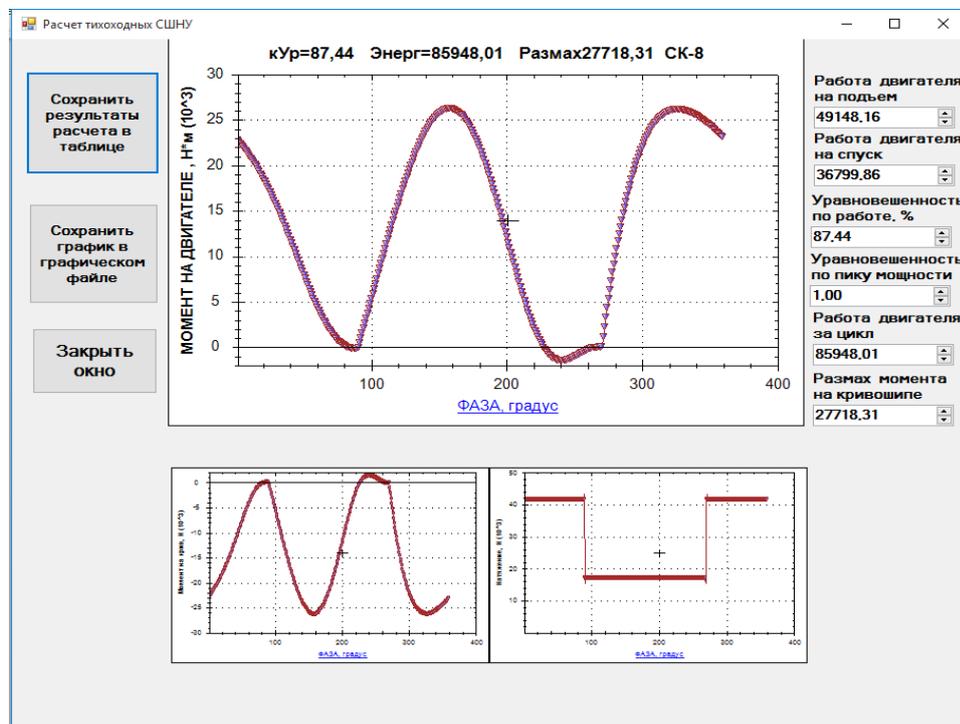


Рисунок 4 – Результаты расчетов изменения момента на выходном валу и энергопотребления

На построенной модели привода выполнено исследование зависимости энергопотребления и крутящего момента на выходном валу редуктора от уравновешенности привода штанговой скважинной насосной установки на тихоходных режимах работы, выполнен сравнительный анализ критериев оценки уравновешенности.

В качестве критериев оценки уравновешенности рассмотрены следующие: максимальный момент, размах (вариация) момента на выходном валу редуктора за один полный оборот, энергопотребление установки и коэффициент уравновешенности по потреблению энергии при ходе колонны штанг вверх и вниз.

В результате исследования получены зависимости максимального момента на выходном валу редуктора, размаха момента и коэффициента уравновешенности при вариации положения противовесов и соответственно создаваемого ими момента. Результаты исследования привода UP-9 Т-2500-3500 представлены в графическом виде на Рисунке 5.

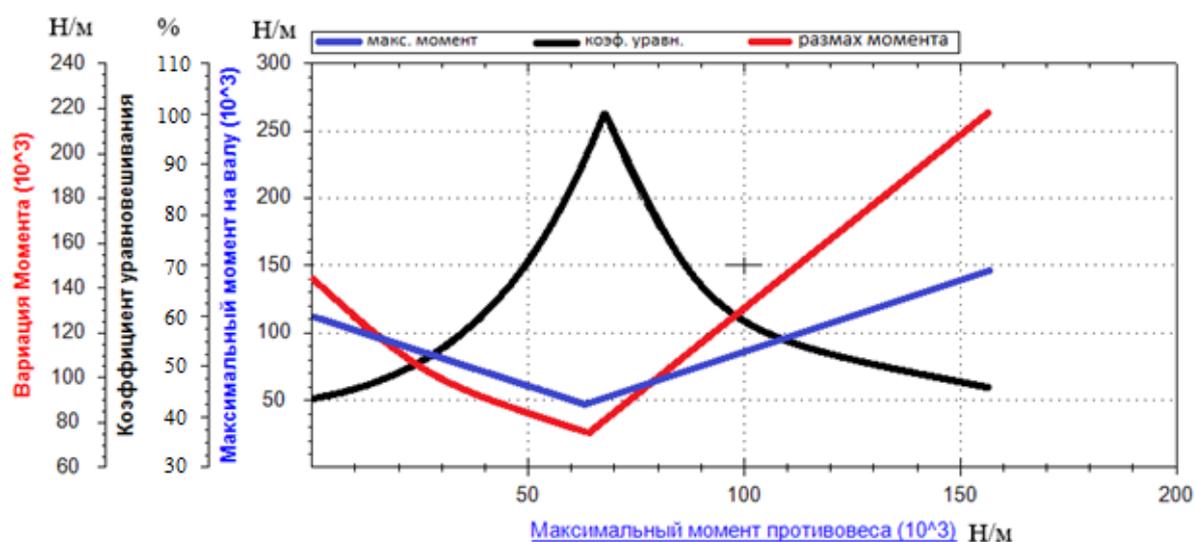
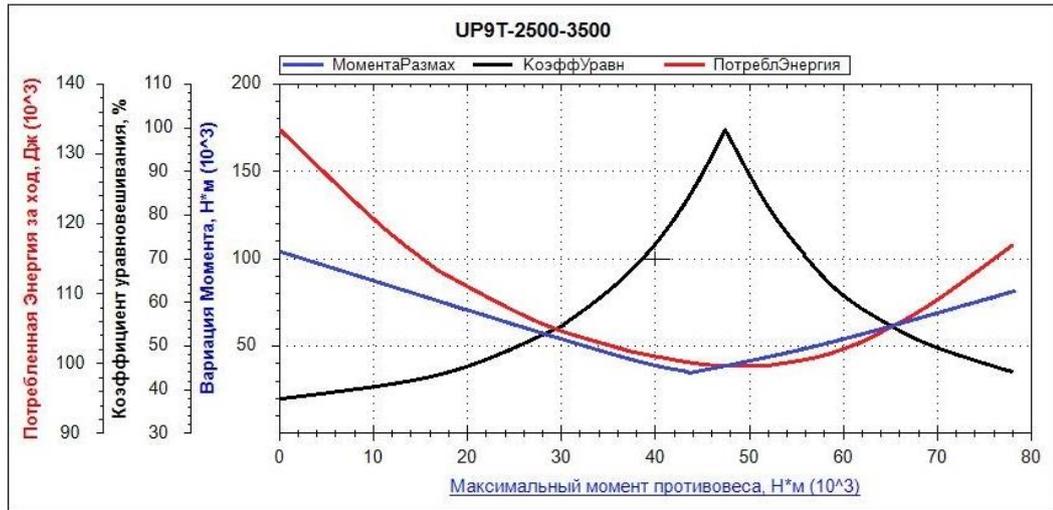
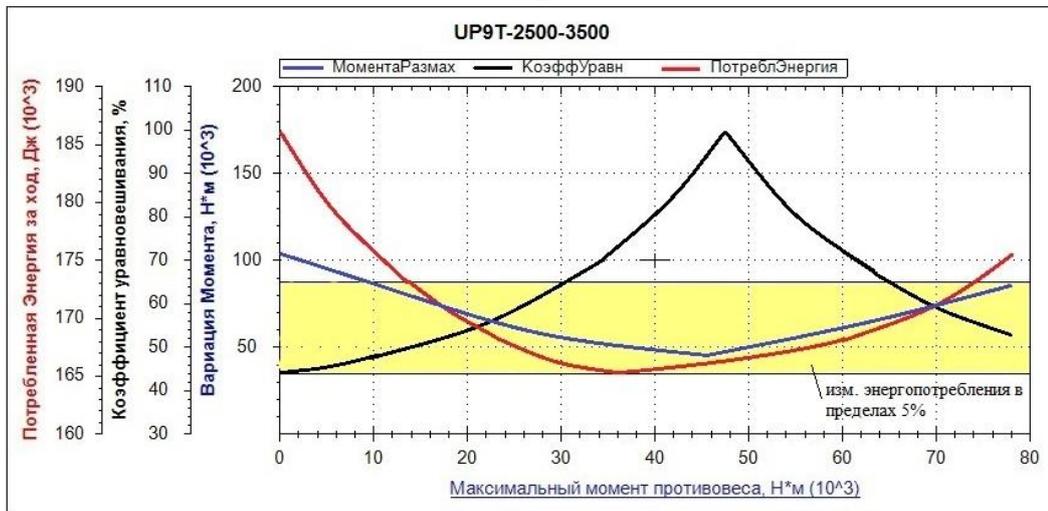


Рисунок 5 - Изменение критериев уравновешенности в зависимости от положения противовесов на кривошипе

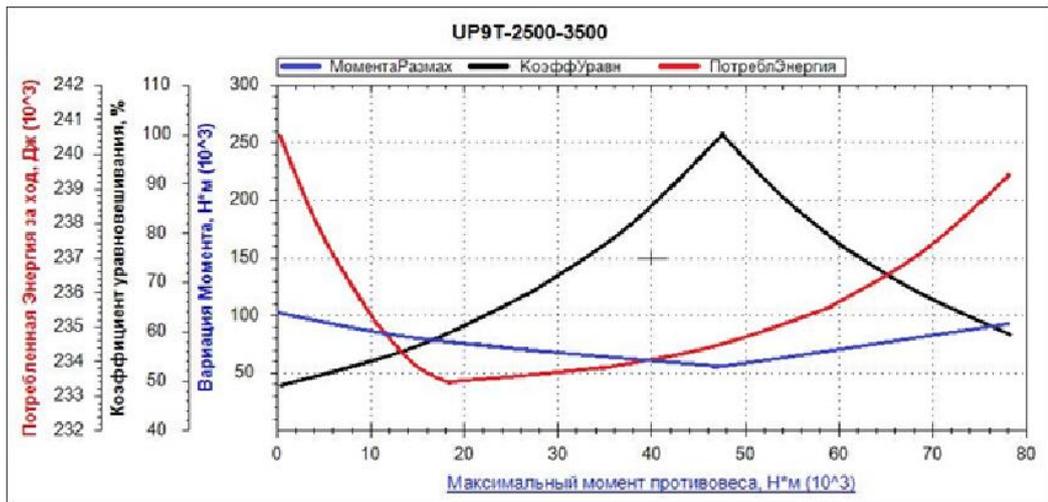
Оптимальные значения критериев уравновешенности по максимальному моменту и размаху (вариации) момента на выходном валу редуктора практически совпадают, но отличаются от критерия уравновешенности по энергопотреблению.



а)



б)



в)

а) при силе сопротивления 5кН; б) при силе сопротивления 15кН;

в) при силе сопротивления 25кН

Рисунок 6 – Результаты расчета для привода UP-9 T-2500-3500

Проведено исследование влияния сил сопротивления, действующих на штанговую колонну, на оптимальное положение уравнивающих грузов для различных критериев уравнивания. Варьированием сил сопротивления в диапазоне от 5 до 25кН (5кН; 15кН; 25кН) построены графики зависимости потребляемой энергии, размаха момента на выходном валу редуктора и коэффициента уравновешенности, которые представлены на Рисунке 6.

На основе проведенного исследования сделано заключение:

- уравнивание по равенству работ, совершенных электродвигателем на подъеме и спуске, не обеспечивает минимизацию нагрузки на редуктор привода УСШН и приводит к работе редуктора с большим максимальным моментом, что негативно сказывается на его надежности;

- оптимальные значения критериев уравновешенности достигаются при разных положениях противовесов;

- при минимальных силах сопротивления оптимальные значения критериев близки, при увеличении сил сопротивления расхождения увеличиваются, наиболее существенному изменению подвержен момент противовеса;

- для номинального режима работы балансирного привода, при силе сопротивления 15кН, изменение момента противовеса в диапазоне от 14 до 74кН·м влияет на потребление энергии в пределах 5%.

В **третьей главе** разработан метод уравнивания балансирного привода УСШН на тихоходных режимах работы, добывающей высоковязкую продукцию, по динамограмме.

Целью уравнивания установок является уменьшение нагрузки на привод. Нагрузки на стойку и шарниры установки практически не зависят от положения уравнивающих грузов на кривошипе и полностью определяются нагрузкой на траверсе, которая для тихоходных станков-качалок не связана с уравниванием. Меняется только момент на кривошипе редуктора станка-качалки, т.е. уравнивание влияет только на электродвигатель и редуктор. Запас надежности двигателя превалирует над тем же параметром редуктора.

Целесообразно при уравнивании УСШН на тихоходных режимах работы обращать внимание в первую очередь на нагруженность редуктора и ставить целью уравнивания уменьшение нагрузок на него.

В качестве критерия оценки уравновешенности установки рассматривается максимальный крутящий момент на выходном валу редуктора. На работающей штанговой скважинной насосной установке снимается динамограмма. По динамограмме определяются усредненные значения максимальной ( $T_{\max}$ ) и минимальной ( $T_{\min}$ ) нагрузки в точке подвеса штанг, на второй трети периода движения плунжера штангового насоса вверх и вниз соответственно.

Вычисляется максимальный момент на выходном валу редуктора за цикл оборота кривошипа:

$$M_{\text{кр\_макс}} = \max(M_1 g r_3 \cos\varphi + m_1 g (r_1 \cos\varphi - h_1 \sin\varphi) + m_2 g (r_2 \cos\varphi + h_2 \sin\varphi) + M_3 g b \cos\psi \frac{\partial\psi}{\partial\varphi} - T_{\text{мод}} \frac{\partial\psi}{\partial\varphi} l_4), \quad (13)$$

где  $T_{\text{мод}}$  – нагрузка в точке подвеса штанг ( $T_{\max}$  – при ходе вверх,  $T_{\min}$  – при ходе вниз).

Максимальное значение момента зависит от положения противовесов:

$$M_{\text{кр\_макс}} = f(r_1, r_2). \quad (14)$$

Принимая положения противовесов на кривошипе одинаковыми:

$$r = r_1 = r_2, \quad (15)$$

и варьируя плечо противовесов в интервале:

$$0 < r < 2,5, \quad (16)$$

определяем оптимальное значение плеча  $r = r_{\text{ур}}$ , обеспечивающего минимальное значение максимального момента на кривошипе.

Для упрощения применения предложенного метода уравнивания построена таблица рекомендованных положений уравнивающих противовесов для привода СК8-3,5-4000, в зависимости от максимальной и минимальной нагрузки в точке подвеса штанг за один двойной ход установки.

Проведено исследование энергопотребления и нагрузок на привод штанговых установок, добывающих высоковязкую и парафинистую продукцию в

тихоходном режиме. Показано, что увеличение вязкости продукции и степени парафинизации скважины обуславливает закономерное возрастание крутящего момента на выходном валу редуктора, потребляемой насосной установкой электроэнергии и средней мощности. Исследована зависимость оптимального положения кривошипных грузов в зависимости от вязкости и степени перекрытия сечения лифтовых труб.

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментов, проведенных с целью проверки предложенной математической модели и подтверждения полученных результатов моделирования.

Экспериментальные исследования проводились на опытном стенде установки штангового скважинного насоса с приводом СКЗ института «ТатНИПИнефть», и на скважинах добывающих высоковязкую продукцию, с помощью УСШН на тихоходных режимах работы, оснащенных балансирными приводами, расположенных на территории цеха по добыче нефти №1 нефтегазодобывающего управления «Альметьевнефть» (ЦДНГ-1 НГДУ «Альметьевнефть»), ПАО «Татнефть»).

Экспериментальные исследования заключались в сравнении результатов измерения параметров тихоходного привода УСШН, добывающего высоковязкую продукцию, и результатов моделирования по соответствующим исходным данным для нескольких скважин. Зарегистрированные одновременно ваттmetroграмма – прибором «Баланс-СК2» и динамограмма – «КВАНТОР-5абд», представлены на Рисунках 7-8.

В процессе измерений и моделирования получены следующие данные (пример скважины №21013):

- коэффициент уравновешенности, определенный ваттmetroграфом – 0,93;
- коэффициент уравновешенности, вычисленный по пикам сглаженной ваттmetroграммы – 0,95;
- расчетный коэффициент уравновешенности – 1,00.

Каждый из рассмотренных критериев оценки уравновешенности, в равной степени, свидетельствует об удовлетворительной балансировки привода, так как полученные значения коэффициентов лежат в допустимом пределе от 0,8 до 1,2.

Числовое значение коэффициента уравновешенности по крутящему моменту, находится в пределах погрешности прибора относительно значения коэффициента уравновешенности определенного по ваттметрограмме.

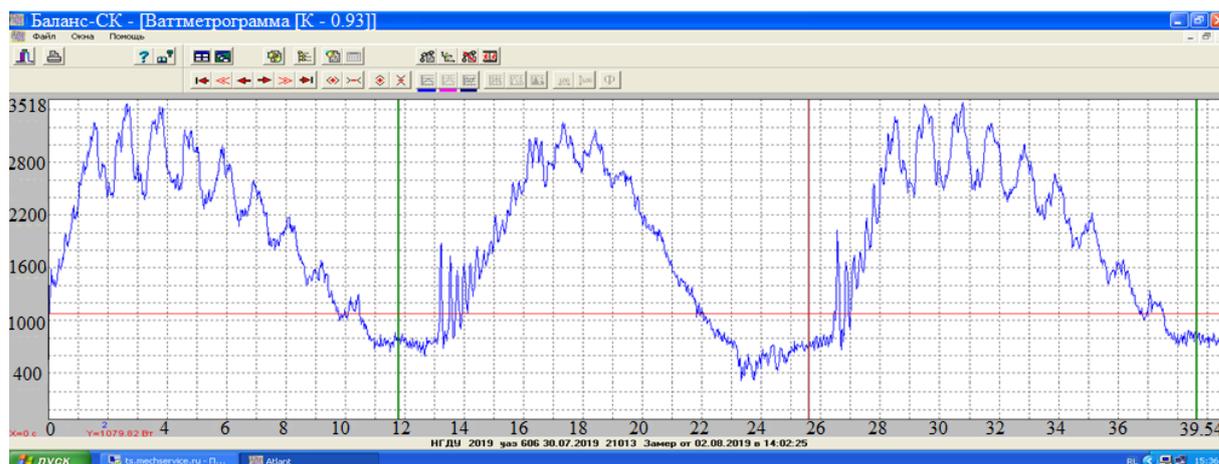


Рисунок 7 – Ваттметрограмма (скважина №21013)

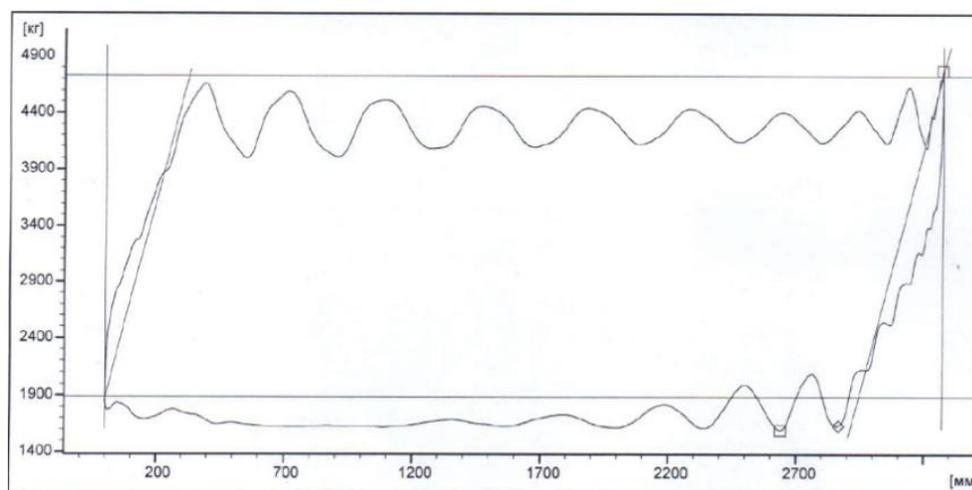


Рисунок 8 – Динамограмма (скважина №21013)

В результате экспериментов сделаны следующие заключения:

- оптимальное значение критерия уравновешенности по соотношению работ, совершенных электродвигателем при ходе колонны штанг вверх и вниз, не соответствует оптимальным значениям критериев уравновешенности по

соотношению пиков потребляемой мощности и максимальному моменту на выходном валу редуктора;

- уравнивающие положения противовесов, определяемые по соотношению пиков потребляемой мощности при ходе колонны штанг вверх и вниз и по максимальному моменту на выходном валу редуктора, совпадают;

- числовое значение коэффициента уравновешенности, рассчитанное программным обеспечением на основе данных, полученных динамометрированием, находится в пределах погрешности прибора относительно значения, измеренного при натурном эксперименте, что подтверждает валидность предложенного метода для уравнивания балансирного привода УСШН на тихоходных режимах работы;

- проведенные исследования показывают возможность уравнивания балансирного привода штанговых установок по результатам анализа динамограмм. Такой метод позволит отказаться от привлечения дополнительных измерений, в частности, регистрации ваттметрограмм.

### **Основные результаты и выводы**

1. Анализ опыта эксплуатации балансирных приводов скважинных штанговых насосов показал, что 64% отказов связано с крутящим моментом на выходном валу редуктора. Применяемые критерии оценки уравновешенности основаны на регистрации энергетических параметров и не учитывают непосредственно нагрузку на редуктор привода.

2. Разработана математическая модель, учитывающая аналитическую зависимость момента на выходном валу редуктора тихоходного балансирного привода от геометрии, распределения масс и нагрузки в точке подвеса штанг при допущении, что шарниры привода являются идеальными.

3. Аналитически обоснован и экспериментально подтвержден метод уравнивания балансирного привода штанговой насосной установки на тихоходных режимах работы по результатам динамометрирования, позволяющий снизить нагрузки на редуктор.

4. Исследованием зависимости энергоэффективности и уравновешенности приводов штанговых установок на тихоходных режимах работы показано, что в широком диапазоне изменения момента противовесов УР-9 Т-2500-3500 (14-74 кН·м); СК 8-3,5-4000 (12-85 кН·м); ПНШТ 60-3-31,5 (0-66 кН·м) энергопотребление меняется в пределах 5%. Увеличение вязкости продукции и интенсивное отложение парафинов на штангах и стенках лифтовых труб (перекрытие до 50% сечения) обуславливает возрастание крутящего момента на выходном валу редуктора до 50% и увеличение потребляемой электроэнергии и мощности до 100%, т.е. в 2 раза.

5. Верификация разработанной математической модели и предложенного метода уравнивания по динамограмме на скважинах при добыче высоковязкой нефти, оснащенных тихоходными приводами показала:

- значения коэффициентов уравновешенности по крутящему моменту на выходном валу редуктора и по критерию равенства пиков мощности совпадают с погрешностью в пределах 10%;
- реализация контроля уравновешенности балансирного привода штанговых установок на тихоходных режимах по динамограммам осуществима на объектах нефтегазодобывающих предприятий.

### **Основные результаты диссертационной работы**

**опубликованы в следующих научных трудах:**

– в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, выпускаемых в РФ, в соответствии с требованиями ВАК Министерства науки и высшего образования РФ:

1. Сабанов, С.Л. Сравнительный анализ критериев уравнивания тихоходной штанговой скважинной насосной установки / С.Л. Сабанов // Газовая промышленность. – 2019. - №7. – С. 20-25.

2. Галеев, А.С. Станция мониторинга состояния скважинной штанговой насосной установки / А.С. Галеев, Г.И. Бикбулатова, Р.Н. Сулейманов,

О.В. Филимонов, С.Л. Сабанов, Ю.А. Болтнева // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2019. - №4. – С. 82-91.

**– статьи в изданиях, индексируемых в Scopus:**

3. Garipova, Liliya I. Development of a model for the analysis of the effect of equilibrium on the energy consumption of a borehole rod pumping unit / Liliya I. Garipova, Arslan V. Nasybullin, Akhmetsalim S. Galeev, Golia I. Bikbulatova, Sergey L. Sabanov // XIX International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. - 2019. – Pp. 241-248.

**– свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:**

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019617444 Российская Федерация. Система мониторинга скважинной штанговой насосной установки промысла / Бикбулатова Г.И., Кузьмин И.А., Лявшенко А.О., Галеев А.С., Сулейманов Р.Н., Сабанов С.Л.; правообладатель ГБОУ ВО «Альметьевский государственный нефтяной институт». – № 2019616233; заявл. 29.05.2019, опубл. 07.06.2019, Бюл. № 6. – 1 с.

**– в монографии:**

5. Арсланов, Р.И. Вопросы эффективности эксплуатации промышленного оборудования: монография / Р.И. Арсланов, Г.И. Бикбулатова, А.С. Галеев, П.П. Ермилов, С.Л. Сабанов, Р.Н. Сулейманов. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. – 84 с.

**– в прочих изданиях:**

6. Галеев, А.С. Обзор современного оборудования в области контроля технического состояния ШСНУ / А.С. Галеев, И.Г. Арсланов, С.Л. Сабанов // Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института. - Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2018. – Том XVII. - С. 141-145.

7. Сабанов, С.Л. Оценка влияния уравновешенности привода ШСНУ на энергоэффективность установки / С.Л. Сабанов, А.С. Галеев, Г.И. Бикбулатова, Ю.А. Болтнева // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли: материалы международной научно-практической конференции. -

Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2018. - Т.2. – С. 354-359.

8. Сабанов, С.Л. Кинематическая модель уравнивания тихоходного привода скважинной штанговой насосной установки / С.Л. Сабанов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы международной научно-технической конференции молодых ученых. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – С. 60.

9. Шакиров, Д.Л. К вопросу о снижении энергопотребления привода штангового скважинного насоса / Д.Л. Шакиров, С.Л. Сабанов // Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии: материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых. - Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2017. – С. 328-331.