

*На правах рукописи*



Дубинов Юрий Сергеевич

АНАЛИЗ И МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ ПОДБОРА ПОЛЫХ  
НАСОСНЫХ ШТАНГ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ОДНОВРЕМЕННО-  
РАЗДЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (нефтегазовая  
отрасль)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва, 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина», г. Москва

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности Российского государственного университета нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина  
**Ивановский Владимир Николаевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор кафедры «Нефтегазопромысловое оборудование» Уфимского государственного нефтяного технического университета  
**Уразаков Камил Рахматуллович**

кандидат технических наук, первый заместитель директора по НПО ООО «Пермская компания нефтяного машиностроения»  
**Песин Михаил Владимирович**

Ведущая организация: Институт «ТатНИПИнефть» ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина

Защита состоится «22» июня 2017 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета Д212.291.02 в Ухтинском государственном техническом университете по адресу: 169300, г. Ухта, ул. Первомайская, д.13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ухтинский государственный технический университет», [www.ugtu.net](http://www.ugtu.net) в разделе «Диссертации».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с заверенными гербовой печатью и подписью просим направлять по адресу: 169300, г. Ухта, ул. Первомайская, д.13. ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», диссертационный совет.

Автореферат разослан «20» апреля 2017г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук



А.И. Попова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Актуальность работы.*

По статистике за 2015 г., более трети всего добывающего фонда нефтяных скважин в России оборудовано скважинными штанговыми насосными установками (СШНУ). Однако применение штанговых насосов ограничивается недостаточной надежностью её основного элемента, а именно штанговой колонны.

В настоящее время применяются сплошные и полые насосные штанги. Полые насосные штанги применяются: при эксплуатации скважин, в которых отмечено большое содержание механических примесей и АСПО; при одновременно-раздельной эксплуатации, когда возможно эксплуатировать одной скважиной более одного продуктивного горизонта.

Количество отказов сплошных и полых насосных штанг остается значительным (более 30%). Это объясняется тем, что современные методики расчета приведенных напряжений и математические модели процесса работы штанговой колонны не позволяют точно определить действующие нагрузки в насосных штангах. Еще сложнее это сделать при эксплуатации колонны штанг в наклонно-направленных скважинах.

Методики расчета приведенных напряжений и математические модели процесса работы штанговой колонны, применяемые при подборе насосных штанг, не полностью учитывают на сегодняшний день факторы, влияющие на работу штанговой колонны (конструктивные особенности насосных штанг, прочностные свойства материала, из которого они изготовлены), что приводит к её отказу.

В связи с этим проведение исследований, направленных на создание модернизированной методики подбора штанговых колонн на основе корректной математической модели процесса работы штанговой колонны, является актуальным и востребованным.

### *Цели и задачи диссертационной работы*

*Целью работы* является модернизация методики подбора колонны полых насосных штанг, позволяющей увеличить наработку насосных штанг до отказа.

Для достижения цели необходимо решить следующие *задачи*:

- проанализировать отказы штанговых колонн и существующие методики расчета приведенных напряжений при подборе сплошных и полых насосных штанг;

- разработать модернизированную методику подбора сплошных и полых насосных штанг, учитывающую свойства материала и конструктивные особенности штанг;
- на основании проведенных исследований разработать математическую модель процесса работы полый штанговой колонны в наклонно-направленной скважине совместно с модернизированной методикой расчета приведенных напряжений, учитывающей свойства материала насосных штанг и конструктивные особенности полых насосных штанг;
- исследовать на основе математического моделирования влияние такого фактора, как темп набора кривизны, на значение напряжений в полый насосной штанге;
- провести численный и физический эксперимент со сплошными и полыми насосными штангами для проверки разработанной математической модели;
- подготовить предложения по улучшению конструкции полых насосных штанг.

#### *Научная новизна*

Разработана методика подбора насосных штанг, применяемых при одновременно-раздельной эксплуатации, учитывающая конструктивные особенности насосных штанг и свойства материала насосных штанг, из которого они изготовлены, и с помощью неё проведен подбор и математическое моделирование процесса работы колонны насосных штанг.

Разработаны формулы расчета коэффициента, учитывающего конструктивные особенности насосных штанг и свойства материала, из которого они изготовлены, для сплошных и полых насосных штанг.

Разработана математическая модель процесса работы насосных штанг в наклонно-направленной скважине, учитывающая темп набора кривизны  $\rho$ , конструкцию колонны штанг, усилия, возникающие при работе скважинной штанговой насосной установки.

На основе математического моделирования процесса работы штанговой колонны выявлено влияние темпа набора кривизны на величину приведенных напряжений, возникающих в полых насосных штангах.

#### *Практическая значимость*

Разработана программа (блок ПО «Автотехнолог»), позволяющая подбирать сплошные и полые насосные штанги для эксплуатации нефтяных скважин с учетом модернизированной методики и параметров, действующих в скважине.

Результаты, полученные в диссертационной работе, используются в программном комплексе «Автотехнолог», применяемом в нефтяных компаниях России и СНГ; используются в учебном процессе РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина при подготовке студентов по дисциплинам «Современные исследовательские комплексы техники и технологии ТЭК» и «Основы научных исследований, организация и планирование эксперимента».

#### *Теоретическая значимость*

Разработанная математическая модель процесса работы полый штанговой колонны и модернизированная методика подбора могут послужить основой для развития научных исследований и математического моделирования в области расчета и конструирования оборудования для добычи нефти.

#### *Методы исследования*

Поставленные задачи решены с использованием следующих методов: измерение и сравнение – для постановки экспериментальной части исследования и проверки адекватности математической модели, абстрагирование (идеализация) - для создания расчетных схем процесса работы штанговой колонны в скважине, эксперимент – для определения порядка и стадий проведения исследований и проверки адекватности математических моделей.

#### *Положения, выносимые на защиту*

Разработанная модернизированная методика подбора сплошных и полых насосных штанг, учитывающая конструктивные особенности насосных штанг и свойства материала насосных штанг.

Разработанная математическая модель работы полых насосных штанг в наклонно-направленной скважине, учитывающая темп набора кривизны, конструкцию колонны штанг, усилия, возникающие при работе скважинной штанговой насосной установки, и усилия, возникающие при наличии опоры колонны штанг в наклонно-направленных скважинах.

#### *Степень достоверности результатов и выводов*

Проведена верификация теоретических научных результатов с результатами физического эксперимента и с результатами теоретических, стендовых и промысловых испытаний других авторов.

#### *Соответствие паспорту специальности*

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (нефтегазовая отрасль) в части пунктов:

1. Разработка научных и методологических основ проектирования и создания новых машин, агрегатов и процессов; механизации производства в соответствии с современными требованиями внутреннего и внешнего рынка, технологии, качества, надежности, долговечности, промышленной и экологической безопасности.

3. Теоретические и экспериментальные исследования параметров машин и агрегатов и их взаимосвязей при комплексной механизации основных и вспомогательных процессов и операций.

5. Разработка научных и методологических основ повышения производительности машин, агрегатов и процессов, и оценки их экономической эффективности и ресурса.

#### *Личный вклад автора*

Личный вклад автора в диссертационную работу заключается в создании новой методики расчета приведенных напряжений, возникающих в теле полых и сплошных насосных штанг, применяемых при ОРЭ, разработке способа расчета комплексного коэффициента, учитывающего конструктивные особенности насосных штанг и свойства материала, разработке лабораторного стенда для проведения натурных испытаний насосных штанг различной конструкции, проведении численного и физического эксперимента на разработанном стенде, разработке компьютерной программы расчета приведенных напряжений, возникающих в теле полых и сплошных насосных штанг, работающих в наклонно-направленных скважинах, разработке новой конструкции головки полый насосной штанги.

#### *Апробация работы*

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на X, XI Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» (г. Москва, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2014, 2016 гг.); Одиннадцатой Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика)» (г. Москва, РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2015 г.); Пятой международной научной и практической конференции «Нефтегазовые горизонты» (г. Москва, РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2013 г.); 65-ой, 66-ой, 67-ой, 68-ой, 69-ой Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ» (г. Москва, РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, соответственно 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 гг.); Международном конкурсе научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие топливно-энергетической и добывающей отрасли,

проводимом при поддержке Министерства энергетики Российской Федерации (г. Москва, Министерство энергетики Российской Федерации, 2016 г.).

#### *Реализация результатов работы*

Результаты работы включены в учебный процесс федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» при подготовке студентов по дисциплинам «Современные исследовательские комплексы техники и технологии ТЭК» и «Основы научных исследований, организация и планирование эксперимента».

Методика подбора сплошных и полых насосных штанг используется в ПО «Автотехнолог», широко используемом в работе российских и зарубежных нефтяных компаний.

#### *Публикации*

По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендуемых ВАК Министерства образования и науки РФ.

#### *Структура и объем диссертации*

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (109 наименований) и 7 приложений. Работа изложена на 132 страницах машинописного текста, содержит 59 рисунков, 16 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** проведен анализ фонда скважин в Российской Федерации, проведен анализ причин отказов штанговых колонн и основных участков отказов, сформулированы задачи исследования.

Анализ фонда скважин показал, что количество скважин, оборудованных СШНУ, велико и превышает 30% за 2015 год. Это объясняется большим количеством мало- и среднедебитных скважин, а также внедрением технологий эксплуатации боковых стволов и одновременно-раздельной эксплуатации.

На основании анализа причин отказов штанговых колонн определено, что свыше 45% отказов происходят вследствие усталостного разрушения и 30% - вследствие превышения допустимых напряжений.

Выяснено, что основным местом отказа сплошных и полых насосных штанг является гладкая часть штанги возле галтели, а также места установки центраторов и скребков.

Определены цели и главные задачи настоящего исследования.

**Во второй главе** приведены основные конструкции насосных штанг, применяемые на территории РФ: сплошные и полые (различных производителей), проанализированы основные методики расчета приведенных напряжений.

Анализ нормативной документации производителей насосных штанг показал, что в Российской Федерации в настоящее время эксплуатируются насосные штанги, выполненные по ГОСТ Р 31825-2012 «Штанги насосные, штоки устьевые и муфты к ним. Технические условия» и стандарту API Spec11B, а также полые насосные штанги, производимые по различным ТУ.

Также применяются полые насосные штанги иностранных производителей: FanZhenming (КНР), YuanLu (КНР), CangzhouRuntaoPetroleumEqui (КНР).

Анализ различных конструкций полых насосных штанг показал, что производители могут изготавливать полые насосные штанги совершенно различными способами, к примеру, это может быть и холодная поковка, и горячая протяжка. К тому же, по ГОСТ 31825-2012 «Штанги насосные, штоки устьевые и муфты к ним. Технические условия» резьба сплошной насосной штанги должна производиться только методом накатывания, производители же полых насосных штанг иногда применяют нарезание

резьбы, что вызывает увеличение числа концентраторов напряжений. Полые насосные штанги могут быть однослойными и многослойными (стеклопластиковыми и из легкосплавного материала).

Анализ различных математических моделей работы штанговых колонн показал, что этому вопросу посвящено большое количество работ следующих авторов: Уразаков К.Р., Ренёв Д.Ю., Вассерман И.Н.

Анализ этих работ показал, что оценка влияния факторов на работу колонны насосных штанг в наклонно-направленных скважинах, а также математическое моделирование процесса работы сплошных насосных штанг изучены достаточно подробно. Однако моделированию процесса работы полых насосных штанг, которые обладают следующими особенностями: другая форма поперечного сечения (флюид омывает штангу по наружной и внутренней поверхности), способ создания резьбы, повышенная жесткость - внимание не уделено.

Проведенный анализ литературных источников показал, что вопросу определения максимальных напряжений посвящено большое количество работ следующих авторов: Фаерман И.Л., Круман Б.Б., Одинг И.А., Ивановский В.Н., Уразаков К.Р., Баграмов Р.А., Адонин А.Н., Марковец М.П., Вирновский А.В., Грабович В.П.

Анализ промысловых данных показывает, что число отказов насосных штанг остается велико даже при наличии большого числа опытно-конструкторских и научных работ. Это объясняется тем, что современные методики не позволяют с должной точностью определить действующие нагрузки и напряжения в насосных штангах, а существующие математические модели не могут с должной достоверностью воссоздать условия работы в скважине.

Анализ методик расчета приведенных напряжений показал, что основными зависимостями являются: зависимость Одингга, зависимость Марковца, зависимость Серенсена-Кинасошвили, зависимость АЗИНМаш, зависимость Гудмана, а также диаграмма Смита.

В результате анализа работы скважин Самотлорского, Усинского и Ромашкинского месторождений получено, что ни одна из перечисленных зависимостей не может описать ситуацию на скважине.

Проведенный анализ показал, что некоторые методики: не учитывают свойства материала, из которого изготавливаются насосные штанги, конструктивные особенности насосных штанг, которые могут изготавливаться по различным ТУ, а также никак не учитывается особенность работы насосных штанг в наклонно-направленных скважинах.

Для учета отмеченных выше факторов, автором предложено внести в зависимость Одингга, применяемую для подбора колонны штанг по ГОСТ 31825-2012 «Штанги насосные, штоки устьевые и муфты к ним. Технические условия», коэффициент  $k^*$ , который учитывает конструктивные особенности насосных штанг и свойства материала насосных штанг:

$$\sigma_{пр} = k^* \cdot \sqrt{\sigma_{max} \cdot \sigma_a} \quad (1)$$

где:  $k^*$ -коэффициент, учитывающий конструктивные особенности насосных штанг и свойства материала сплошных насосных штанг;

$\sigma_a$ -амплитудные напряжения, МПа;

$\sigma_{max}$ -максимальные напряжения за цикл, МПа.

Для учета различных конструктивных факторов предложено определять коэффициент  $k^*$  по формуле:

$$k^* = \frac{K_s \cdot K_{ds} \cdot K_v \cdot K_r}{K_f} \quad (2)$$

где:

$K_s$  – коэффициент концентрации напряжений;

$K_{ds}$  - коэффициент масштабного фактора;

$K_v$  – коэффициент, учитывающий метод технологического упрочнения поверхности;

$K_r$  – коэффициент разупрочнения;

$K_f$  - коэффициент, учитывающий качество обработки поверхности.

Коэффициенты, используемые для расчета коэффициента  $k^*$ , описаны в научно-технической литературе по расчету прочности конструкций.

Расчеты показали, что коэффициент  $k^*$  зависит от типоразмера и материала насосной штанги:

Таблица 1 –Коэффициент  $k^*$  для сплошных насосных штанг из нормализованной стали 40

Типоразмер штанги, D, мм	16	19	22	25	29
Коэффициент $k$	1,54	1,56	1,58	1,60	1,63

При анализе конструкций сплошных и полых насосных штанг определено, что для полых насосных штанг необходимо также учесть непостоянство их проходного сечения. Для учета данной особенности предложено в методику для расчета полых насосных штанг ввести дополнительно коэффициент  $K_{nc}$ .

$$k^{**} = \frac{K_s \cdot K_{ds} \cdot K_v \cdot K_r}{K_f \cdot K_{nc}} \quad (3)$$

где:

$k^{**}$  -коэффициент, учитывающий конструктивные особенности насосных штанг и свойства материала полых насосных штанг;

$K_{nc}$  – коэффициент, учитывающий непостоянство проходного сечения.

Таблица 2 – Коэффициент  $k^{**}$  для полых насосных штанг из стали 45

Типоразмер штанги, $D \times s$ , мм	$k^{**}$
36x5,5	1,52
32x4,0	1,50

Модернизированная методика прошла этап верификации на контрольной выборке, состоящей из 120 скважин Самотлорского, Усинского и Ромашкинского месторождений. В результате получено, что в 90% случаев результаты расчетов совпали с ситуацией на скважине.

В третьей главе представлено теоретическое исследование напряженного состояния полых насосных штанг в наклонно-направленных скважинах.

Нагрузка, действующая на колонну насосных штанг, состоит из статической и динамической составляющей.

В статическую составляющую входит нагрузка от веса столба жидкости над плунжером и веса колонны штанг в жидкости.

В динамическую составляющую входят силы инерции колонны штанг, силы трения штанг о жидкость и силы трения штанг о стенки трубы, а также вибрационные силы, возникающие в процессе работы.

Статическую составляющую можно учесть, пользуясь методикой расчета, приведенной во второй главе данного исследования, в то время как динамическую составляющую необходимо рассчитывать, исходя из параметров скважины и режима работы СШНУ. К примеру, негерметичность клапанного узла скважинного насоса приводит к изменению значений нагрузки на колонну штанг, увеличивая или уменьшая нагрузку на нее, а также приводит к увеличению вибрационной составляющей нагрузки.

Усилиями, возникающими в стволе наклонно-направленной скважины, часто пренебрегают, что приводит к отказу колонны вследствие превышения расчетных приведенных напряжений.

Для уточнения расчетов разработана математическая модель вычисления приведенных напряжений с учетом условий работы СШНУ в наклонно-направленной скважине. Расчетная схема к этой модели представлена на рисунке 1.

В приведенной математической модели колонна штанг рассматривается как упругий стержень диаметром  $D$  с внутренним каналом

диаметром  $d$ , помещенный внутрь НКТ с внутренним диаметром  $d_{tr}$  и длиной хода  $l_{sh}$ .

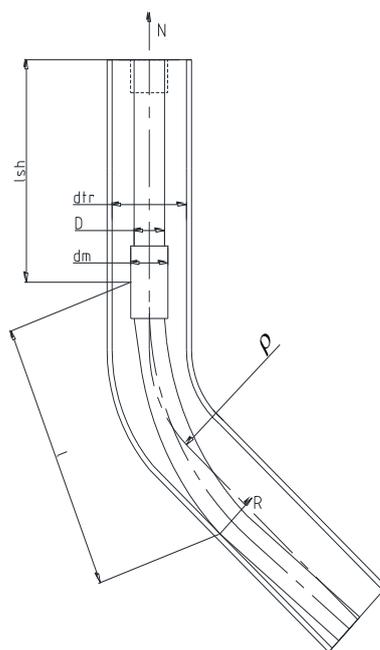


Рисунок 1 - Схема расчета напряжений в наклонно-направленной скважине

Исходными параметрами для модели являются:

$l$  – расстояние от муфты полой насосной штанги до точки касания с НКТ;  $R$  – реакция со стороны НКТ в месте контакта;  $\rho$  – радиус кривизны скважины;  $E$  – модуль упругости материала;  $P_{max}$  – усилие при ходе вверх;  $P_{min}$  – усилие при ходе вниз;  $l_{sh}$  – длина хода штока;  $D$  – наружный диаметр полой штанги;  $d$  – внутренний диаметр полой штанги;  $d_m$  – диаметр муфты;  $N$  – продольная сила в сечении колонны;  $d_{tr}$  – внутренний диаметр НКТ.

Разработанная математическая модель процесса работы штанговой колонны в наклонно-направленной скважине позволяет уточнить напряженное состояние полых насосных штанг за счет учета действия таких факторов, как профиль скважины, силы, возникающие в месте контакта колонны штанг и колонны НКТ.

Ограничения, принятые в данной математической модели: начало координат находится в точке подвеса штанг (в верхнем сечении); ось  $x$  совпадает с осью канала НКТ и направлена вертикально вниз; внутренний диаметр  $d_{tr}$  ограничивает движение стержня, движение только вдоль оси; верхний конец стержня совершает колебательное движение по заданному закону; к нижнему концу приложена сила, величина которой зависит от направления движения верхнего конца стержня.

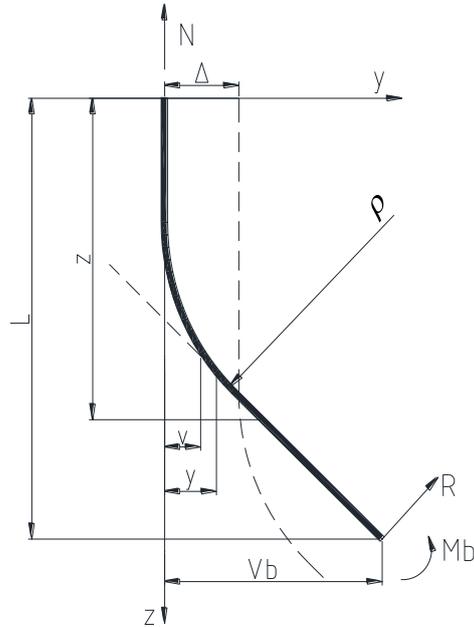


Рисунок 2 - Участок изогнутой оси стержня (верхняя часть опирается, нижняя часть касается НКТ):  $\rho$  - радиус кривизны канала (скважины) (кривизна  $k=1/\rho$ );  $N$  – продольная сила;  $\Delta$  - разница между радиусами стержня (штанги) и муфты;  $l$  – расстояние от муфты до точки касания стержня (штанги) с НКТ;  $y$  – расстояние между изогнутой осью стержня (штанги) и точкой касания стержня (штанги) с НКТ;  $R$  – реакция, возникающая в точке касания стержня (штанги) с НКТ;  $M_b$  – изгибающий момент в точке касания стержня (штанги) с НКТ.

В модели рассматривается два случая: тело штанги касается стенок НКТ и опирается на них; тело штанги не касается НКТ.

Ниже приведены основные расчетные зависимости модели для случая, когда отсутствует касание между колонной полых штанг и колонной НКТ.

Постоянные  $C_1$  и  $C_2$ , а также реакция  $R$  и размер  $l$  (наличие опоры) определяются из системы уравнения (4):

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 + C_2 + \left( \frac{d_m - D}{2} + \frac{l^2 \cdot k}{2} - \frac{E \cdot (D^4 - d^4) \cdot k \cdot \pi}{64 N} + \left( \frac{R}{N} - k \cdot l \right) \cdot l \right) = 0 \\ C_1 \cdot \sqrt{\frac{N}{\frac{E \cdot (D^4 - d^4) \cdot \pi}{64}}} - C_2 \cdot \sqrt{\frac{N}{\frac{E \cdot (D^4 - d^4) \cdot \pi}{64}}} + \left( k \cdot l - \frac{R}{N} \right) = 0 \\ C_1 \cdot e^{\sqrt{\frac{N}{\frac{E \cdot (D^4 - d^4) \cdot \pi}{64}}} l} + C_2 \cdot e^{-\sqrt{\frac{N}{\frac{E \cdot (D^4 - d^4) \cdot \pi}{64}}} l} + \frac{d_m - D}{2} + \frac{l^2 \cdot k}{2} - \frac{E \cdot (D^4 - d^4) \cdot k \cdot \pi}{64 N} + \left( \frac{R}{N} - k \cdot l \right) \cdot l + \left( k \cdot l - \frac{R}{N} \right) \cdot l = \frac{d_m - D}{2} + \frac{l^2 \cdot k}{2} \\ C_1 \cdot \sqrt{\frac{N}{\frac{E \cdot (D^4 - d^4) \cdot \pi}{64}}} \cdot e^{\sqrt{\frac{N}{\frac{E \cdot (D^4 - d^4) \cdot \pi}{64}}} l} - C_2 \cdot \sqrt{\frac{N}{\frac{E \cdot (D^4 - d^4) \cdot \pi}{64}}} \cdot e^{-\sqrt{\frac{N}{\frac{E \cdot (D^4 - d^4) \cdot \pi}{64}}} l} + \left( k \cdot l - \frac{R}{N} \right) = k \cdot l \end{array} \right. \quad (4)$$

Определить изгибающий момент при отсутствии касания:

$$M_{im} = k \cdot \frac{l_{sh} \cdot \sqrt{N \cdot E \cdot \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64}} \cdot (e^{\sqrt{\frac{N}{E \cdot \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64}} \cdot l_{sh}}} + 1)}{2 \cdot (e^{\sqrt{\frac{N}{E \cdot \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64}} \cdot l_{sh}}} - 1)} \quad (5)$$

Составить уравнение изогнутой оси:

$$V_m = \frac{M_{im}}{N} \cdot \left[ 1 + \frac{(e^{-\sqrt{\frac{N}{E \cdot \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64}} \cdot l_{sh}}} - 1)}{e^{\sqrt{\frac{N}{E \cdot \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64}} \cdot l_{sh}}} - e^{-\sqrt{\frac{N}{E \cdot \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64}} \cdot l_{sh}}}} \cdot e^{\sqrt{\frac{N}{E \cdot \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64}} \cdot z}} + \right. \\ \left. + \frac{(1 - e^{-\sqrt{\frac{N}{E \cdot \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64}} \cdot l_{sh}}})}{e^{\sqrt{\frac{N}{E \cdot \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64}} \cdot l_{sh}}} - e^{-\sqrt{\frac{N}{E \cdot \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64}} \cdot l_{sh}}}} \cdot e^{-\sqrt{\frac{N}{E \cdot \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64}} \cdot z}} \right] \quad (6)$$

Проводим расчет нормальных напряжений. При помощи операторов выбираем значения максимальных ( $\sigma_{max}$ ) и минимальных ( $\sigma_{min}$ ) напряжений, которые подставляются в формулу (1).

Анализ полученных зависимостей показывает, что значения расчетных напряжений отличаются на 30-50 % в зависимости от продольного усилия (при нагрузках до 10 кН при радиусе кривизны от 1000 м до  $\infty$  напряжения отличаются на 30 %, при увеличении радиуса кривизны до 500 м напряжения отличаются на 40 % и на 50 % при радиусе кривизны 100 м), что видно из рисунка 3.

При уменьшении радиуса искривления скважины зависимость между приведенными напряжениями и продольным усилием становится нелинейной, что говорит о значительном влиянии радиуса искривления на величину напряженного состояния колонны штанг, что видно из рисунка 3.

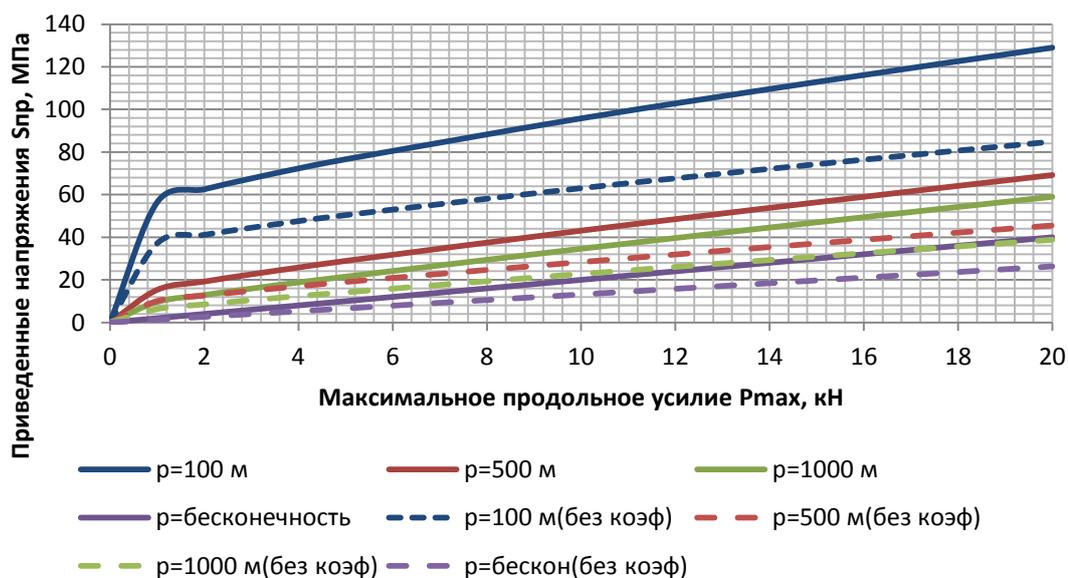


Рисунок 3 - Сравнение зависимостей приведенных напряжений от продольных усилий при различных радиусах кривизны скважины, полученных при использовании зависимости Одингга и методики, предложенной автором

**Четвертая глава** посвящена проведению численного и физического эксперимента со сплошными и полыми насосными штангами для получения данных об их пределе выносливости.

В САПР SolidWorks создана трехмерная графическая модель полой и сплошной насосной штанги. При создании моделей использовалась база данных САПР и метод расчета - метод конечных элементов, а также дополнительно были введены параметры, характерные для работы насосных штанг (материал, конструкция, особенности эксплуатации).

Результаты, полученные при физическом эксперименте со сплошной насосной штангой, прошли верификацию с результатами промышленных испытаний, опубликованными в работах других авторов, максимальная ошибка между значениями напряжений не превысила 18 %, что дает основание сделать вывод о применимости данной модели для расчета напряженного состояния полой насосной штанги.

Результаты физического эксперимента в виде кривой Велера представлены на рисунке 4. Предел выносливости на воздухе в результате физического эксперимента составил 121 МПа. Кривая усталости аппроксимировалась степенным уравнением вида  $N\sigma^m = C$ .

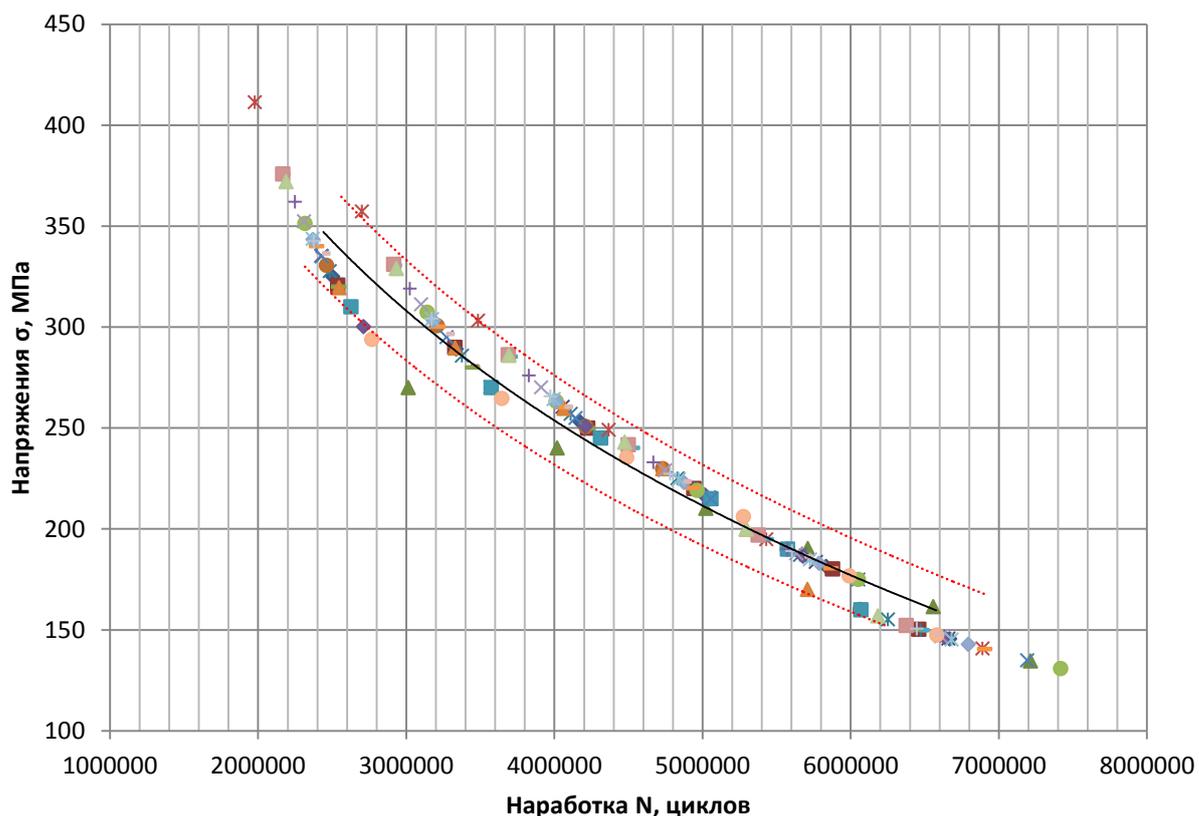


Рисунок 4 - Кривая Велера на основе 25 компьютерных испытаний:  $\sigma$  - приведенные напряжения;  $N$  – число циклов

Для проверки расчетов, значения напряжений были нанесены на построенную диаграмму Смита (диаграмма построена теоретическая (по справочным данным), для хрупкого разрушения, и по данным, полученным в системе SolidWorks при численном эксперименте).

Модернизированная методика дает результаты, которые попадают в общую область, образованную тремя диаграммами, представленную на рисунке 5.

Это позволяет сделать вывод, что предложенная методика, учитывает факторы, влияющие на работоспособность колонны насосных штанг.

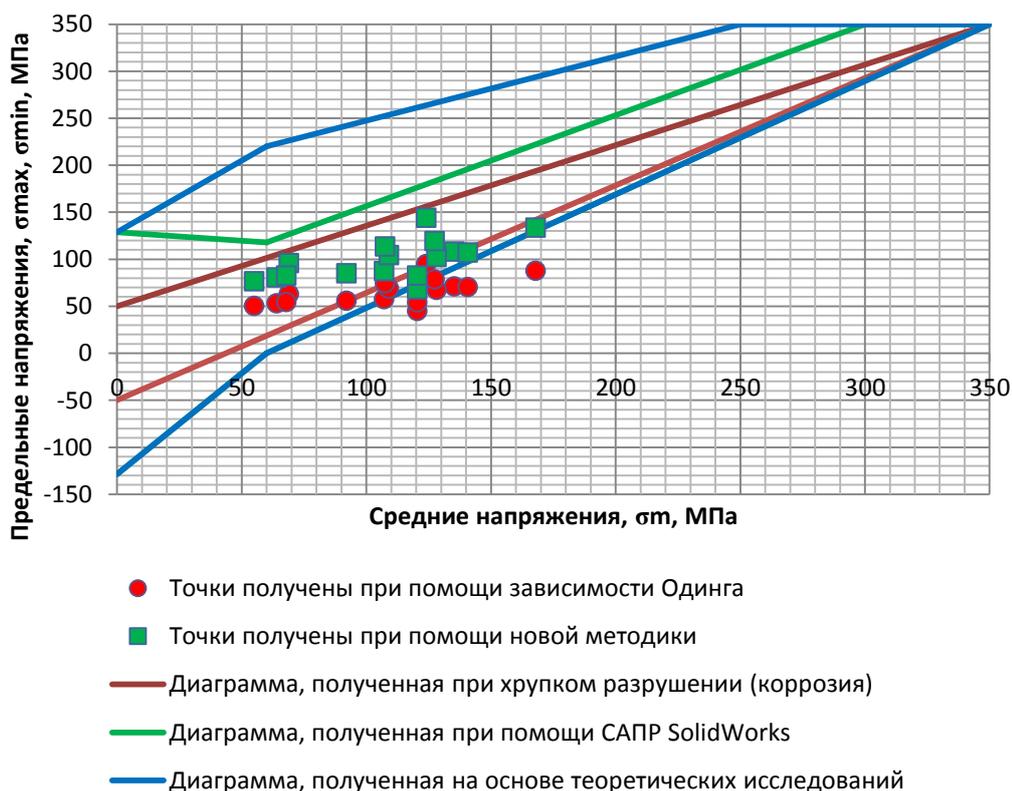


Рисунок 5 - График результатов расчетов по методике, предложенной автором, с зависимостью Одинга на диаграмме Смита

Для определения предела выносливости материала полых насосных штанг предложена методика испытаний натуральных образцов, длиной 350-700 мм, вырезанных из полый штанги. В процессе подготовки образцов в пределах опасного сечения, а именно в области высадки и муфты полностью сохранено качество поверхности полый штанги.

Определение предела выносливости проводилось на стенде, спроектированном на кафедре машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности (с учетом ГОСТ 25.502-79 «Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость»), обеспечивающем поперечный изгиб при вращении образцов полый насосной штанги при симметричном цикле нагружения с частотой 520 циклов в минуту. Исследовались штанги типоразмеров 36x5,5 и 32x4 мм.

Предел выносливости в результате физического эксперимента составил 140 МПа.

Сравнение результатов численного и физического эксперимента показало, что погрешность между значениями пределов выносливости не превышает 15 %.

В результате экспериментов установлено, что после 300 тыс. циклов происходит изменение структуры поверхностного слоя полый насосной

штанги. Структура поверхности до и после испытаний представлена на рисунке 6.

Замеры твердости до и после эксперимента показали, что твердость увеличилась на 20%.



Рисунок 6 - Структура поверхностного слоя полый насосной штанги (увел. x500): а - поверхностный слой без приложения нагрузки; б -поверхностный слой после приложения нагрузки

Анализ результатов численного и физического эксперимента позволил доказать, что разработанная методика расчета штанг практически полностью отражает специфику нагружения этого вида оборудования. Компьютерный анализ конструкций головок полых насосных штанг позволил создать новую конструкцию головки полый насосной штанги, представленной на рисунке 8, сечение которой выполнено в виде десятигранника. Требование к герметичности соблюдается благодаря уплотнению по торцу муфты.

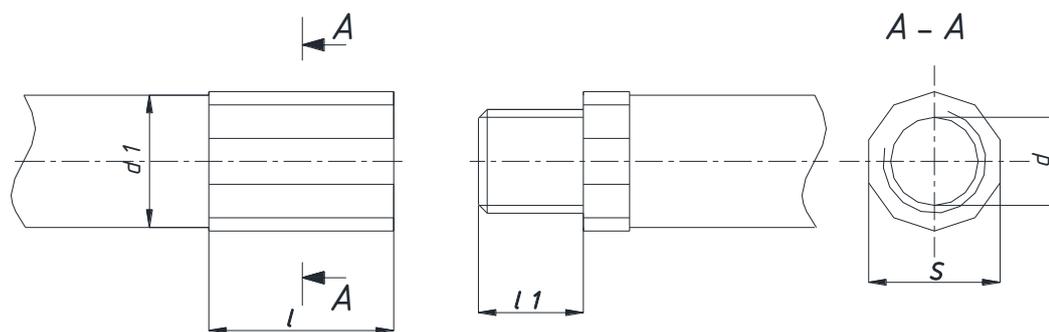


Рисунок 8 - Схема головки полый насосной штанги:  $d1$  –наружный диаметр штанги,  $d$  – внутренний диаметр,  $l$  – длина места «под ключ»,  $l1$  – длина резьбы,  $S$  – размер «под ключ»

Данная конструкция рекомендована для создания опытного образца и проведения физического эксперимента.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены следующие результаты.

1. Основными причинами отказов штанговых колонн являются усталостное разрушение и превышение допустимых приведенных напряжений.
2. Анализ существующих методик определения приведенных напряжений в насосных штангах показал, что многие методики не учитывают следующие факторы: конструктивные особенности насосных штанг, свойства материала насосных штанг, а также напряжения, возникающие вследствие изгиба в наклонно-направленных скважинах.
3. Анализ результатов расчетов при использовании разных зависимостей показал, что при одних и тех же условиях работы (конструкция скважины, конструкция штанг, нагрузки) значения приведенных расчетных напряжений могут отличаться в 4-6 раз.
4. Для разработки модернизированной методики подбора насосных штанг создана новая математическая модель процесса работы насосных штанг, в том числе - полых, в наклонно-направленной скважине.
5. Модернизирована методика подбора насосных штанг с учетом конструктивных особенностей и свойств материала изготовления штанг. В качестве основы выбрана широко применяемая в нефтяной промышленности зависимость Одингга, которая дополнена научно обоснованными: коэффициентом концентрации напряжений, коэффициентом, учитывающим масштабный фактор, коэффициент, учитывающий метод технологического упрочнения поверхности, коэффициент разупрочнения, коэффициент, учитывающий качество обработки поверхности, коэффициент, учитывающий непостоянство проходного сечения у полых насосных штанг.
6. Сравнение зависимостей приведенных напряжений от продольного усилия с применением методики, предложенной автором, и зависимости Одингга показало, что значения напряжений отличаются на 30-50 % в зависимости от значений нагрузки.
7. Установлено, что максимальное отклонение между значениями расчетных напряжений в насосных штангах, полученных в результате компьютерного моделирования, и значениями напряжений, полученных при собственных испытаниях или опубликованных в работах других авторов, не превышает 18 %.

8. Сравнение результатов численного и физического эксперимента с полый насосной штангой показало погрешность результатов на 15 %, что говорит о возможности применения данного способа для определения прочностных свойств сложных конструкций, которой является насосная штанга.
9. Установлено, что циклическое нагружение полый насосной штанги приводит к изменению структуры поверхностного слоя материала штанги и увеличению твердости, что учтено в методике расчета, предложенной автором.
10. Результаты исследования послужили основанием для создания новой конструкции головки полый насосной штанги, которая позволяет уменьшить напряжения в переходной зоне.
11. Методика подбора полых штанговых колонн, разработанная на основе созданной математической модели процесса работы штанговой колонны, внедрена в ПО «Автотехнолог», широко используемое в нефтяной промышленности России.

**Основные положения и результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:**

***Статьи в реферируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ:***

1. Ивановский В.Н., Дубинов Ю.С. Уточнение величин допускаемых приведенных напряжений и методики расчета штанговых колонн при добыче нефти в осложненных условиях эксплуатации // Труды РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2014 г. -№1, с.65-75.
2. Ивановский В.Н., Елагина О.Ю., Гантимиров Б.М., Сабиров А.А., Дубинов Ю.С., Долов Т.Р. Анализ работы различных конструкций клапанных пар скважинного штангового насоса // Территория «НЕФТЕГАЗ», 2015, №9, с.92-99.
3. Дубинов Ю.С., Ивановский В.Н., Оптимизация конструкции головки полый насосной штанги // Территория «НЕФТЕГАЗ», 2016, № 3, с. 66–69.
4. Дубинов Ю.С., Модернизация методики подбора насосных штанг// Газовая промышленность, 2016, №2/734, с.37-40.
5. Ивановский В.Н., Дубинов Ю.С., Пекин С.С., Булат А.В. Совершенствование подбора полых насосных штанг путем использования математической модели поведения штанг в скважине // Труды РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2016 г. -№1, с.89-97.

***Прочие публикации:***

6. Дубинов Ю.С. Модернизация методики подбора и расчета полых насосных штанг, применяемых при одновременно-раздельной эксплуатации //Тезисы докладов 65-ой Международной научной студенческой конференции «Нефть и газ -2011». 11-14 апреля 2011 г. Секция «Инженерная и прикладная механика нефтегазового комплекса». – М., 2011 - с.220.
7. Дубинов Ю.С. Принципы подбора штанговых колонн //Тезисы докладов 66-ой Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ -2012». 17-20 апреля 2012 г. Секция «Инженерная и прикладная механика нефтегазового комплекса». – М., 2012 - с.16.
8. Дубинов Ю.С. Анализ и модернизация методики подбора полых насосных штанг // Тезисы докладов 67-ой Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ - 2013». 9-12 апреля 2013 г. Секция «Инженерная и прикладная механика нефтегазового комплекса». – М., 2013 - с.18.
9. Yurii Dubinov S. Principles of selection of rod //The book of abstracts The fifth international scientific and practical conference «Oil and Gas Horizons». 11-13 November 2013. PhD Papers Section - p.125.
10. Дубинов Ю.С. Модернизация методики подбора полых насосных штанг // Тезисы докладов X Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России». 10-12 февраля 2014 г. Секция «Проектирование, изготовление и эксплуатация оборудования и сооружений нефтегазового комплекса» - с.213.
11. Дубинов Ю.С. Модернизация методики подбора полых насосных штанг, применяемых при ОРЭ //Тезисы докладов 68-ой Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ - 2014». 14-16 апреля 2014 г. Секция «Инженерная и прикладная механика нефтегазового комплекса». – М., 2014 - с.33.
12. Дубинов Ю.С. Модернизация методики расчета приведенных напряжений, возникающих в полых насосных штангах //Тезисы докладов 69-ой Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ -2015». 14-16 апреля 2015 г. Секция «Инженерная и прикладная механика нефтегазового комплекса». – М., 2015 -с.32.
13. Дубинов Ю.С. Модернизация методики расчета приведенных напряжений, возникающих в насосных штангах // Тезисы докладов 11 Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть,

- энергетика)». 20-23 октября 2015г. Секция «Проблемы разработки, стандартизации, сертификации и обеспечения надежности оборудования нефтегазового комплекса». – М., 2015 - с.264.
- 14.Ивановский В.Н., Долов Т.Р., Дубинов Ю.С. Ускоренные испытания насосных штанг на усталость для оценки пределов выносливости материалов и конструкций, Учебно-методическое пособие, М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2016, с.39.
- 15.Ивановский В.Н., Бабакин И.Ю., Долов Т.Р., Дубинов Ю.С. Ускоренные испытания клапанных узлов скважинных штанговых насосных установок на величину износа и герметичности, Учебно-методическое пособие, М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2016, 23 с.
- 16.Дубинов Ю.С. Создание модернизированной методики расчета приведенных напряжений, возникающих в полых насосных штангах// Тезисы докладов XI Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России». 8-10 февраля 2016 г. Секция «Проектирование, изготовление и эксплуатация оборудования и сооружений нефтегазового комплекса» - с.10.