

На правах рукописи



КОВАЛЕВСКИЙ ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ И МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО
ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ БУРЕНИЯ НА ОБСАДНОЙ КОЛОННЕ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2018

Работа выполнена на кафедре «Машины и оборудование нефтегазовых промыслов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Ишбаев Гниятулла Гарифуллович

Официальные оппоненты: **Нескоромных Вячеслав Васильевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный
университет» / кафедра «Технология и техника
разведки месторождений полезных
ископаемых», заведующий кафедрой

Чулкова Виктория Валерьевна
кандидат технических наук,
ООО «Газпром флот»,
главный специалист технологического отдела
Управления по бурению

Ведущая организация ФБГОУ ВО «Ухтинский государственный
технический университет» (г. Ухта)

Защита состоится «14» декабря 2018 года в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 212.289.05 при ФБГОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФБГОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте www.rusoil.net.

Автореферат разослан «__» _____ 2018 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Абуталипова Елена Мидхатовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Технология бурения на обсадной колонне является одним из современных способов строительства скважин, позволяющих повысить эффективность работ в осложненных горно-геологических условиях: интервалах с потерей циркуляции, переходных зонах с переменным давлением, интервалах с неустойчивыми стенками скважины или зонах многолетнемерзлых пород. Особенность технологии заключается в том, что для разрушения горной породы используется одноразовое легкоразбуриваемое долото, а для передачи долоту крутящего момента – обсадные трубы. Породоразрушающий инструмент, согласно технологии, подвергается разбуриванию после достижения проектной глубины секции. Операция разбуривания, как правило, осуществляется стандартными долотами с поликристаллическими алмазными режцами PDC, что позволяет продолжать бурение следующего интервала, не прибегая к дополнительным спуско-подъемным операциям.

Однако процесс разбуривания всегда сопряжен с риском повреждения алмазного вооружения долота, совершающего разбуривание. А ухудшение состояния режцов негативно влияет на эффективность дальнейшего бурения, выражающуюся в снижении механической скорости и проходки на долото. Износ PDC режцов при разбуривании зачастую зависит от свойств материала, из которого изготовлен породоразрушающий инструмент обсадной колонны.

Также неверно подобранные режимы разбуривания могут привести к вибрациям, неравномерному резанию, резким изменениям реактивного момента, потере устойчивости компоновки для разбуривания, что повышает риск повреждения алмазных режцов и иного оборудования, входящего в компоновку низа бурильной колонны.

Поэтому вопрос разработки породоразрушающего инструмента обсадной колонны с возможностью легкого разбуривания долотами, оснащенными PDC режцами, является актуальным в современном бурении.

Степень разработанности темы

Созданию технологии бурения на обсадной колонне, включая разработку и исследование конструкций долот обсадной колонны, посвящены работы ученых ВНИИБТ Константинова Л.П., Агошашвили Т.Г., а также зарубежных авторов Dewey C., Swadi C., Alsup S., Desai P., William W. King, Cesar Leon и др. Вопросы работы компоновок низа бурильной колонны нашли отражения в исследованиях Е.И. Ишемгужина, Б.З. Султанова, А.В. Лягова. Однако решению вопроса разбуривания долот обсадной колонны посвящено весьма мало работ.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности ВАК РФ 05.02.13 – «Машины, агрегаты и процессы» (нефтегазовая отрасль): п.1 Разработка научных и методологических основ проектирования и создания новых машин, агрегатов и процессов; п.5. Разработка научных и методологических основ повышения производительности машин, агрегатов и процессов.

Цель работы

Разработка породоразрушающего инструмента для бурения на обсадной колонне с повышенными показателями процесса разбуривания.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи**:

1 Аналитические исследования работы компоновки при разбуривании породоразрушающего инструмента для бурения на обсадной колонне.

2 Модернизация испытательного стенда для проведения исследований по изучению процесса разбуривания.

3 Стендовые исследования процесса разбуривания долот для бурения на обсадной колонне, подбор оптимальных режимов разбуривания.

4 Разработка методического руководства по проектированию породоразрушающего инструмента для бурения на обсадной колонне.

5 Разработка опытной конструкции долота для бурения на обсадной колонне. Проведение опытно-промышленных испытаний.

Научная новизна

1 На основании численного решения разработанной феноменологической математической модели получены аналитические зависимости расположения

точки касания компоновки о стенки обсадной трубы при разбурировании породоразрушающего инструмента для бурения на обсадной колонне от осевой силы, жесткости компоновки, кажущегося радиуса и угла изменения распределенной нагрузки, позволяющие повысить стабильность компоновки в процессе разбурирования.

2 Аналитически установлена полиномиальная зависимость скорости разбурирования долот для бурения на обсадной колонне, изготовленных из сплавов дюралюминия Д16Т, бронзы БрАЖ 9-4 и полиамида ПА 6, от осевого усилия, частоты вращения и расхода жидкости. Полученные закономерности подтверждены экспериментально и позволили установить, что максимальная эффективность процесса достигается при использовании полиамида марки ПА 6, скорость разбурирования которого при оптимальных режимах 1,01...1,02 м/ч.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в научном обосновании выбора оптимальных параметров конструкции породоразрушающего инструмента для бурения на колонне обсадных труб с целью обеспечения эффективности его работы.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1 Разработано методическое руководство «Проектирование породоразрушающего инструмента для бурения на обсадной колонне», которое утверждено и используется при разработке долот в ООО НПП «БУРИНТЕХ».

2 Разработана конструкция долота для бурения на обсадной колонне БИТ 295,3 БОК 616 с применением полиамида марки ПА 6 в качестве материала для изготовления разбуриваемого узла (патент РФ на полезную модель №156923). Проведены опытно-промысловые испытания в условиях бурения секции под кондуктор на Восточно-Лениногорской площади Республики Татарстан.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач использовались аналитические и экспериментальные методы исследований: статистический и регрессионный анализ полученных экспериментальных данных. Проведены расчеты методом

конечных элементов, а также скважинные испытания предлагаемой конструкции долота.

Положения, выносимые на защиту

1 Результаты решения уравнения упругой линии, описывающего условия работы компоновки при разбурировании долота для бурения на обсадной колонне.

2 Количественные зависимости скорости разбурирования долота для бурения на обсадной колонне от частоты вращения, осевой нагрузки и расхода промывочной жидкости.

3 Конструкция экспериментального стенда и результаты исследований процесса разбурирования, определяющие оптимальные режимы разбурирования и подтверждающие возможность использования полиамида ПА 6 для изготовления долот для бурения на обсадной колонне.

4 Методические положения по проектированию породоразрушающего инструмента для бурения на колонне обсадных труб, включающие расчет элементов и систем долота, а также методику промысловых испытаний.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов работы обеспечивается применением широко апробированных методов и методик, экспериментальных исследований, осуществленных на оборудовании, прошедшем государственную поверку.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на: II-ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых Таргин «Сервисные услуги» УГНТУ (г. Уфа, 2015г.); 68-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (г. Уфа, 2017г.); Международной научно-технической конференции «Опыт, проблемы и перспективы развития неразрушающих методов контроля и диагностики машин и агрегатов» УГНТУ (г. Октябрьский, 2017 г.); Международной научно-методической конференции «Роль математики в становлении специалиста» УГНТУ (г. Уфа, 2017 г., 2018 г.); Международной научно-технической конференции «Современные технологии в нефтегазовом

деле – 2017» УГНТУ (г. Октябрьский, 2017 г.); Международной научно-практической конференции «Современные технологии в мировом научном пространстве» Аэтерна (г. Уфа, 2017 г.).

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе 3 в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, получен 1 патент РФ на полезную модель.

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, основных выводов, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 115 наименований и приложений. Работа изложена на 147 страницах машинописного текста, включает 76 рисунков, 19 таблиц, 3 приложения.

Автор выражает благодарность за помощь научному руководителю д.т.н., профессору, ген. директору ООО НПП «БУРИНТЕХ» Г.Г. Ишбаеву и заведующему кафедры МОНПП УГНТУ д.т.н., профессору В.У. Ямалиеву.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель, основные задачи исследований, приведены научная новизна, основные защищаемые положения и практическая ценность работы.

В **первой главе** проанализированы исследования, направленные на разработку разбуриваемого породоразрушающего инструмента для бурения на колонне обсадных труб. Анализ показывает активность только зарубежных организаций в вопросе патентования. Ведущими организациями являются Weatherford/Lamb Inc., Baker Hughes Incorporated и Varel International.

Установлено, что с точки зрения скорости разбуривания и сохранения вооружения долота, осуществляющего этот процесс, целесообразно использовать конструкцию с приварными лопастями, раздвигающимися под действием давления при достижении проектного забоя.

Показано, что в целях повышения эффективности показателей бурения целесообразно особое внимание уделить вопросу адаптации технологического оборудования обсадной колонны под возможность разбуривания PDC долотами (рисунок 1). Это связано с тем, что износ вооружения долот, осуществляющих разбуривание, негативно влияет на общую эффективность бурения из-за снижения механической скорости и проходки на долото.



Рисунок 1 – Типичный износ вооружения после разбуривания инструмента обсадной колонны, не адаптированного под разбуривание PDC долотом

Особенно пагубное воздействие оказывает оборудование, изготовленное из железосодержащих материалов, потому что алмазный слой реза подвергается выкрашиванию, вступая в химическую реакцию с железом.

За время исследований и изучения вопроса разбуривания оборудования обсадных колонн были предложены решения, обеспечивающие одновременно возможность разрушения железосодержащих узлов инструмента и дальнейшего бурения горной породы.

Показано, что важным резервом повышения эффективности процесса разбуривания является применение материалов с улучшенными свойствами для изготовления внутренних разбуриваемых элементов. Одним из других

направлений увеличения эффективности разбуривания служит выбор режимов, позволяющих эффективно осуществлять этот процесс.

Во **второй главе** исследована работа бурильной колонны, осуществляющей разбуривание породоразрушающего инструмента для бурения на колонне обсадных труб. При работе данной компоновки её поперечное перемещение полностью ограничено внутренними стенками обсадных труб.

Глава опирается на достигнутые результаты существующей научной школы кафедры «Машины и оборудование нефтегазовых промыслов» УГНТУ по разработке компоновок для различных способов бурения.

Для колонны, которая находится в прямолинейной, но не вертикальной скважине, дифференциальное уравнение упругой линии имеет вид:

$$EJ \frac{d^2 y}{dx^2} = Qx - Py + \frac{qx^2}{2}, \quad (1)$$

где EJ – жесткость компоновки, кгс · см²; Q – горизонтальная отклоняющая сила, кгс; P – продольная сжимающая сила, кгс; q – вес единицы длины колонны, кгс/м.

Известно, что распределенная нагрузка q меняется ступенчато в зависимости от рассматриваемого участка колонны и установленных на этом участке элементов. Принимаем, что вес единицы длины колонны меняется не ступенчато, как это показано в работах, а имеет линейную зависимость (рисунок 2), представленную в виде:

$$q = q_0 + \operatorname{tg} \alpha_q x, \quad (2)$$

где α_q – угол изменения распределенной нагрузки, рад;

q_0 – вес долота в жидкости, кгс/м.

Так как α_q будет принимать малые значения, учитывая длину колонны, принимаем, что $\operatorname{tg} \alpha_q = \alpha_q$.

Тогда уравнение упругой линии будет иметь следующий вид:

$$EJ \frac{d^2 y}{dx^2} + Py = Qx + \frac{q_0 x^2}{2} + \frac{\alpha_q x^3}{2}. \quad (3)$$

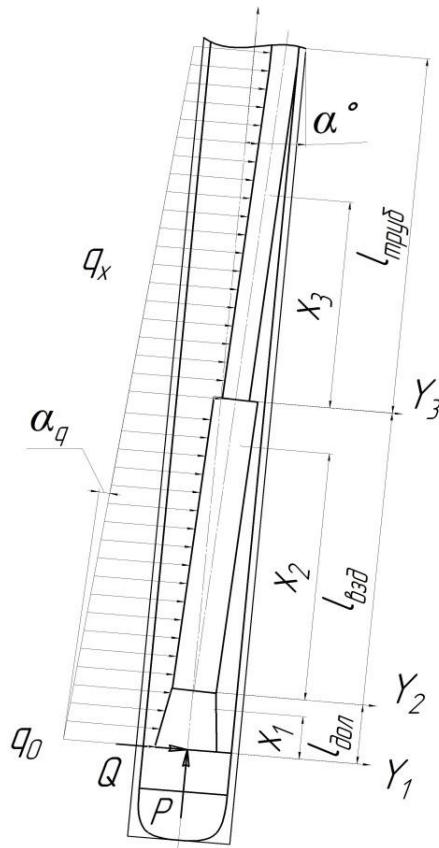


Рисунок 2 – Схема действия сил на колонну при разбурировании

Решение этого уравнения:

$$y = C_1 \sin kx + C_2 \cos kx + \frac{Qx}{P} - \frac{3\alpha_q x}{k^2 P} + \frac{q_0 x^2}{2P} + \frac{\alpha_q x^3}{2P} - \frac{q_0}{k^2 P}, \quad (4)$$

где C_1 и C_2 – постоянные интегрирования.

Граничные условия:

$$\text{при } x = 0, \quad y = 0, \quad \frac{dy}{dx} \neq 0, \quad \frac{d^2 y}{dx^2} = 0;$$

$$\text{при } x = l, \quad y = r, \quad \frac{dy}{dx} = 0, \quad \frac{d^2 y}{dx^2} = 0,$$

где l – расстояние от долота до точки касания, м; r – кажущийся радиус скважины (максимальный прогиб буровой колонны внутри обсадной), м.

Подставляя граничные условия, получим систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} C_2 - \frac{q_0}{k^2 P} &= 0; \\ C_1 k \cos kl - C_2 k \sin kl + \frac{Q}{P} - \frac{3\alpha_q}{k^2 P} + \frac{q_0 l}{P} + \frac{3\alpha_q l^2}{2P} &= 0; \\ C_1 \sin kl + C_2 \cos kl + \frac{Ql}{P} - \frac{3\alpha_q l}{k^2 P} + \frac{q_0 l^2}{2P} + \frac{\alpha_q l^3}{2P} - \frac{q_0}{k^2 P} &= r. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Решая систему уравнений получим

$$Q = \frac{Prk^2 \cos kl - q_0(1 - \cos kl + kl(0.5kl \cos kl - \sin kl)) + 0.5\alpha_q k^2 l^3 \cos kl}{k(kl \cos kl - \sin kl)} + \frac{3\alpha_q}{k^2} - \frac{3\alpha_q l^2}{2} \quad (6)$$

Учитывая, что $\frac{d^2 y}{dx^2} = 0$ при $x = l$, горизонтальная отклоняющая сила Q :

$$Q = \frac{Pr - 0.5q_0 l^2 - 0.5\alpha_q l^3}{1}. \quad (7)$$

Сопоставляя выражения, получаем формулу:

$$\frac{Prk^2 \cos kl - q_0(1 - \cos kl + kl(0.5kl \cos kl - \sin kl)) + 0.5\alpha_q k^2 l^3 \cos kl}{k(kl \cos kl - \sin kl)} = \frac{Pr - 0.5q_0 l^2 + \alpha_q l^3}{1} - \frac{3\alpha_q}{k^2} \quad (8)$$

Данное трансцендентное уравнение используется для определения расстояния l от долота до точки касания колонны со стенками обсадной колонны. Определив точку касания колонны, вычисляем составляющую реакции забоя Q , угол наклона долота β и реакцию стенки обсадной трубы R .

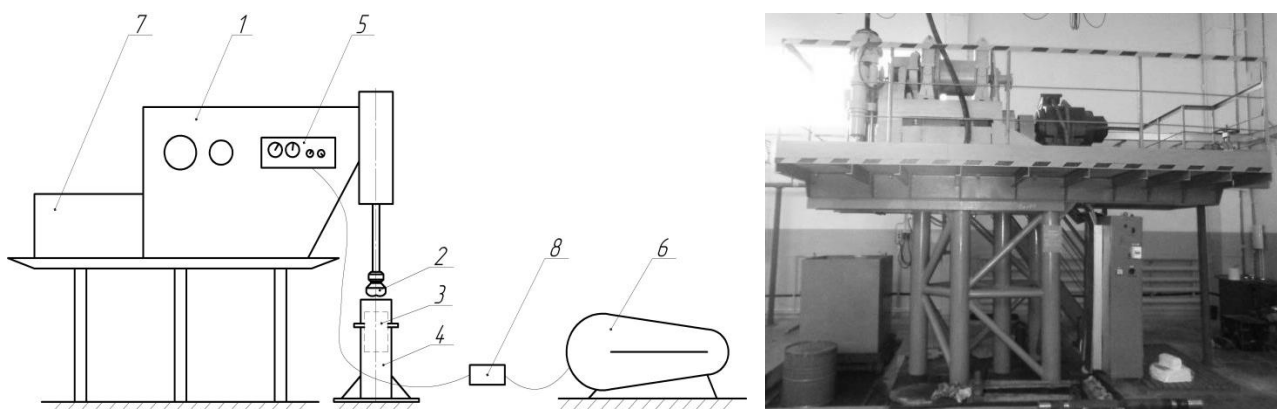
Система уравнений решена с использованием программного комплекса Mathcad. В результате решения получены аналитические зависимости расположения точки касания колонны о стенки обсадной колонны при разбурировании от осевой силы, жесткости компоновки, кажущегося радиуса и угла изменения распределенной нагрузки. Например, при нагрузке на долото 5000 кгс, жесткости компоновки $EJ = 1,06 \cdot 10^9$ кгс·см², кажущемся радиусе $r=0,05$ м и угле изменения распределенной нагрузки $\alpha_q=0,005$ рад точка касания компоновки будет располагаться на расстоянии $l = 71,85$ м от забоя.

В **третьей главе** рассмотрены вопросы модернизации испытательного стенда, методика проведения испытаний и описаны объекты исследований.

В главе показано, что задачу по изучению процессов разбурирования целесообразно решать с использованием испытательного стенда на базе станка ЗИФ-1200 (рисунок 3). Приведены технические характеристики стенда и параметры инструмента, обеспечивающего разбурирование.

Модернизация стенда включала следующие этапы и операции:

- 1) изготовление дополнительных узлов насосной линии;
- 2) установка насосного агрегата СИН 50.5.14.00.000;
- 3) разработка оснастки для крепления образцов.



- 1 – станок для вертикального бурения ЗИФ-1200MP; 2 – долото PDC;
 3 – испытываемый образец; 4 – специальная оснастка; 5 – пульт управления;
 6 – насосная установка; 7 – электродвигатель; 8 – расходомер

Рисунок 3 – Схема испытательного стенда на базе станка ЗИФ-1200

К станку 1 крепится с помощью резьбового замкового соединения PDC долото 2 диаметром 142,9 мм. Долото выбрано в соответствии с реально применяемым инструментом на промыслах. В специализированную оснастку 4 установлен образец 3. Регулировка режимов работы, а именно осевая нагрузка на долото и частота его вращения, производилась с помощью пульта управления 5. Вращение шпинделя через редуктор приводится с помощью электродвигателя 7. Насосная установка 6 обеспечивает подачу промывочной жидкости через долото к месту резания образцов для выноса стружки и охлаждения элементов вооружения долота. Ультразвуковой расходомер 8 осуществляет точные замеры расхода.

Модернизирован испытательный стенд, позволяющий проводить эксперименты по разбуриванию материала для изготовления центрального узла долота. Определена конструкция PDC долота, осуществляющего разбуривание образцов, установленных в специально разработанную оснастку.

Показана методика проведения экспериментов, позволяющая дать оценку эффективности разбуривания, а также проанализировать и найти оптимальные

условия протекания процесса для различных материалов. Представлены объекты исследования, представляющие собой образцы материала для изготовления разбуриваемого узла долота для бурения на обсадной колонне.

В четвертой главе исследованы процессы разбуривания материалов для изготовления внутренних элементов долот для бурения на обсадной колонне.

С целью поиска наилучших условий функционирования процесса разбуривания проведено планирование эксперимента. Зависимость числа опытов от числа уровней факторов имеет вид:

$$N = 3^k = 3^3 = 27, \quad (9)$$

где k – число факторов.

Основными параметрами роторного бурения являются осевая нагрузка на долото, частота вращения и количество жидкости. От их рационального сочетания зависит эффективность работы долота, поэтому исследование этих параметров и нахождение их оптимальных сочетаний являются актуальной задачей. В этой связи рассмотрена зависимость механической скорости разбуривания от частоты вращения, осевой нагрузки и расхода жидкости:

$$V = f(x_1, x_2, x_3), \quad (10)$$

x_1 – частота вращения, об/мин; x_2 – осевая нагрузка, т; x_3 – расход жидкости, л/с.

Выбраны основной уровень, интервал варьирования и экспериментальные точки (таблица 1).

Таблица 1 – Интервалы варьирования независимых переменных

Значения	x_1	x_2	x_3
Основной уровень	130	3	15
Интервал варьирования	45	2	10
Нижний уровень ($x_i = -1$)	85	1	5
Верхний уровень ($x_i = +1$)	175	5	25

Согласно проведенному в первой главе обзору, испытания проводили на образцах из сплавов дюралюминия Д16Т и бронзы БрАЖ 9-4 как наиболее часто применяемых зарубежными компаниями. В качестве третьего материала был взят полимерный материал полиамид ПА 6. Для поиска оптимальных значений отклика уравнения регрессии был использован комплекс Statistica 10.

Уравнение регрессии процесса разбуривания сплава дюралюминия Д16Т представляли в виде алгебраического полинома второй степени. После определения значимости коэффициентов, уравнение регрессии процесса разбуривания алюминия приняло вид:

$$y = -0,619 + 0,012x_1 + 0,066x_2 + 0,023x_3 - 0,00005x_1^2. \quad (11)$$

Полученное соотношение показывает взаимосвязь скорости разбуривания дюралюминия Д16Т с такими факторами, как частота вращения, осевая нагрузка и расход промывочной жидкости (рисунок 4).

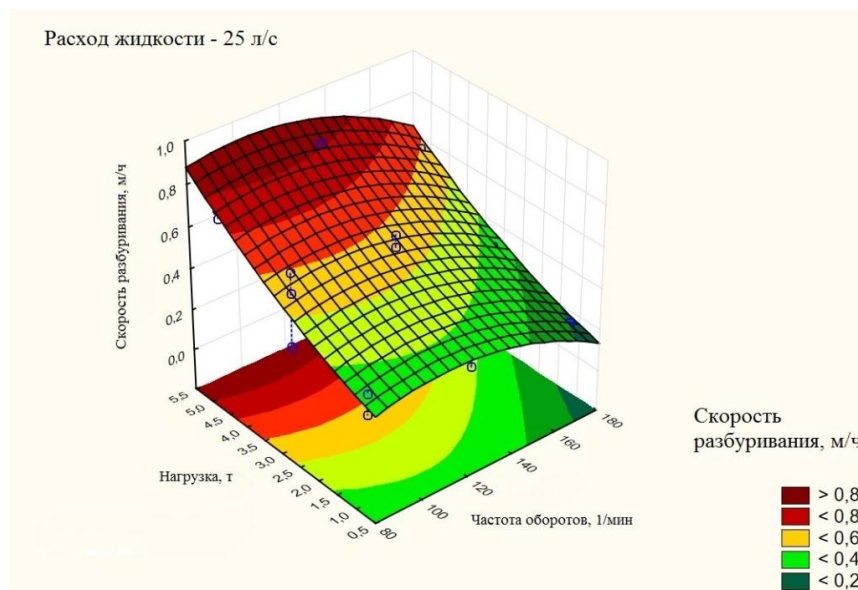


Рисунок 4 – Графическое представление поверхности отклика в зависимости от частоты оборотов и осевой нагрузки при расходе 25 л/с

В данном случае изменение осевой нагрузки влияет прямо пропорционально. С её увеличением скорость разбуривания образца возрастает. Аналогично ведет себя параметр оптимизации при увеличении расхода

жидкости, но в гораздо меньшей степени. Максимальное влияние на скорость разбуривания частота вращения оказывает, принимая значение 116,5 об/мин.

В ходе испытаний отмечено, что оптимальный режим резания дюралюминия характеризуется плавностью, отсутствием вибраций (рисунок 5).



а) оптимальный режим;

б) неустойчивый режим

Рисунок 5 – Дюралюминиевый забой при разных режимах разбуривания

По итогам испытаний выявлено, что наибольшее влияние на скорость разбуривания дюралюминия Д16Т оказывает осевая нагрузка. Объяснение данного явления, по всей видимости, стоит искать в низкой по сравнению с горной породой прочности, что позволяет резцу легко заглубляться. Максимальное значение скорости разбуривания Д16Т достигнуто при частоте оборотов 116,5 об/мин, осевой нагрузке 2,8 т, расходе 24,3 л/с и равно 0,82 м/ч.

Уравнение регрессии процесса разбуривания сплава БрАЖ 9-4 имеет вид:

$$y = -0,182 + 0,004x_1 + 0,185x_2 - 0,019x_2^2. \quad (12)$$

Установлено, что бронза режется сегментами и её стружка представляет собой мелкие частички. Её можно охарактеризовать как стружку скалывания, которая при определенных условиях может стать стружкой надлома.

Наибольшее влияние на скорость разбуривания бронзы оказывает осевое усилие. Отмечено, что сочетание высокой нагрузки и низкой частоты вращения

позволяет добиться максимального значения скорости разбуривания. Объяснением этого явления, по нашему мнению, служат механические свойства бронзы, показатели которых выше по сравнению с алюминием и полиамидом. Установлено, что максимальное значение скорости разбуривания достигается при частоте оборотов 101,6 об/мин, осевой нагрузке 3,9 т и расходе 20,2 л/с и равно 0,52 м/ч.

Уравнение регрессии процесса разбуривания полиамида ПА 6:

$$y = -0,369 + 0,009x_1 - 0,025x_2 + 0,016x_3 - 0,00003x_1^2 + 0,0179x_2^2. \quad (13)$$

Обобщенный коэффициент детерминации уравнения $R^2_{\text{extend}} = 0,948$.

Стоит отметить, что процесс резания полиамида отличается от резания металлов. Отличие заключается в малой теплостойкости, поэтому большие скорости вращения не приемлемы. Увеличение частоты оборотов влияет не столь значительно по сравнению с ростом осевой нагрузки (рисунок 6). Увеличение нагрузки приводит к значительному повышению параметра оптимизации. Процесс разбуривания полиамида характеризуется плавностью и стабильностью во всех исследуемых режимах. Предположительно данная особенность связана с малой плотностью материала порядка $1,15 \text{ г/см}^3$ и низким модулем Юнга 2,2 ГПа, что ниже, чем у цветных металлов.

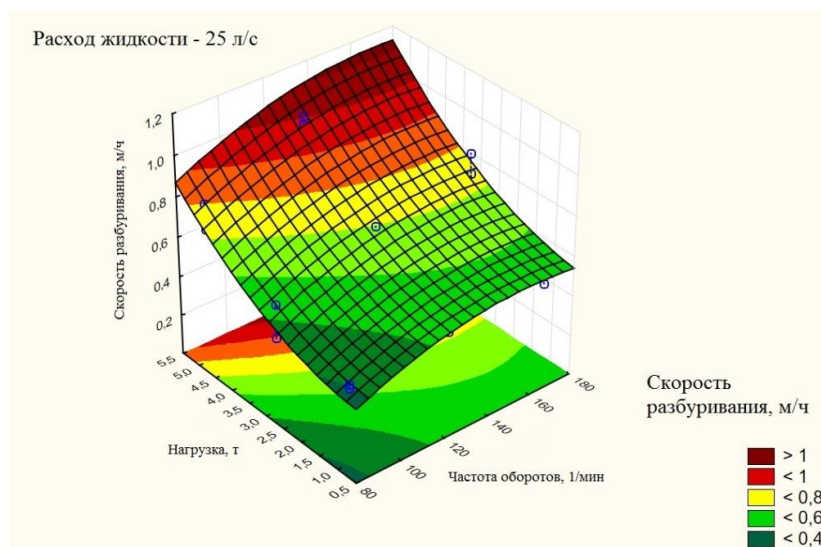


Рисунок 6 – Графическое представление скорости разбуривания полиамида ПА 6 в зависимости от режимов при расходе 25 л/с

Установлено, что наибольшее влияние на скорость разбуривания полиамида оказывают частота вращения и осевая нагрузка. Наименьшее влияние опять же оказывает расход промывочной жидкости и парное взаимодействие перечисленных факторов друг с другом. Максимальное значение скорости разбуривания полиамида достигнуто при частоте оборотов 154,5 об/мин, осевой нагрузке 4,5 т, расходе 24,4 л/с и равно 1,02 м/ч.

Пятая глава посвящена вопросам разработки методических положений по проектированию породоразрушающего инструмента для бурения на обсадной колонне. Представлен процесс разработки долота.

Обоснование схемы размещения вооружения включает в себя определение профиля режущей структуры, необходимого запаса режущих элементов и схемы их размещения на рабочей поверхности. В зависимости от условий применения выбирается длина профиля, угол внутреннего конуса, радиус носовой части, количество лопастей, диаметр и углы резания резцов.

В разработанном на предприятии ООО НПП «БУРИНТЕХ» программном комплексе САПР «Долото» моделируется работа структуры вооружения. Задаются механические свойства горных пород и основные параметры процесса бурения. Для заданных значений механической скорости и частоты вращения определяется проходка за оборот. Для каждого резца рассчитываются нормальная и окружная силы, крутящий момент и объем выбуренной породы. При сложении всех осевых сил и крутящих моментов определяются осевая нагрузка и крутящий момент на долото. Изменяя входные данные, определяется режущая структура, удовлетворяющая требованиям.

Вторым этапом показаны прочностные расчеты лопастей, способных воспринять рассчитанные силы. Задача решается методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Расчеты проводятся для лопастей из различного материала, применяемого в нефтегазовой отрасли, и с различными значениями ширины для определения расчетных значений коэффициента запаса прочности.

Конструкция долота предполагает раскрытие его лопастей при достижении проектного забоя под действием давления. Определение давления,

при создании которого происходит активация долота, осуществляется на гидравлическом стенде ГАКС-И-7-14. Испытания проходят после прочностного расчета на образцах с удовлетворяющими параметрами. В результате определяются лопасти, обеспечивающие раскрытие в требуемом диапазоне значений давления.

Следующим этапом является определение оптимального материала для изготовления внутренних элементов долота и поиск режимов его разрушения. Задача решается с помощью анализа и стендовых исследований процесса разбуривания образцов материала при различных режимах (рисунок 7). Методика проведения испытаний представлена в главе 3.



Рисунок 7 – Стендовые испытания образца

Завершающий этап проектирования – это разработка системы промывки долота, т.к. организация призабойных потоков промывочной жидкости является важным аспектом повышения эффективности очистки забоя.

Для решения поставленной задачи использовался метод конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Создается упрощенная трехмерная твердотельная модель. Задаются граничные условия: частота вращения, расход, давление на выходе. Учитываются плотность жидкости и

гидростатическое давление. Задаются параметры расположения промывочных насадок и пределы их варьирования при расчете.

В расчетах допускаем, что не учитывается влияние трения калибрующих поверхностей о стенки скважины, не учитывается размер шлама и прилипание его к стенкам. В результате расчета определяются оптимальные параметры расположения насадок для максимально эффективной очистки забоя.

В **шестой главе** описан процесс проектирования долота обсадной колонны для бурения кондукторов в условиях месторождений Республики Татарстан и показаны результаты опытно-промысловых испытаний.

Известно, что интервал 0 – 300 м в рассматриваемом регионе сложен мягкими и средними горными породами, состоящими из песчаника, глины, известняка и включений доломитов. Длина профиля вооружения принята средняя, а радиус носовой части – 75 мм. Данное сочетание обеспечивает стабильную работу в перемежающихся породах, свойственных региону.

Проведены силовые расчеты вооружения для 4, 5 и 6-ти лопастной конструкции с применением резцов диаметром 13, 16 и 19 мм, по итогам которых выявлено, что шестилопастная конструкция долота имеет наиболее равномерный и сбалансированный уровень загрузки резцов. Показано, что вооружение диаметром 16 мм сочетает в себе стойкость и возможность обеспечить требуемую механическую скорость бурения.

Вторым этапом проектирования произведен рациональный подбор геометрии лопастей. Проведены прочностные расчеты единичной лопасти долота методом конечных элементов. Ширина лопасти для расчета составила 35, 40, 45 и 50 мм. Материал раздвижной лопасти выбирался из списка сталей, применяемых в нефтегазовой промышленности и применяемых в ООО НПП «БУРИНТЕХ»: стали 20, 19ХГНМА и 40ХН2МА. Осевая нагрузка на единичную лопасть при расчете составила 2 тонны и крутящий момент 12 кН*м, согласно эксплуатационным нагрузкам (рисунок 8).

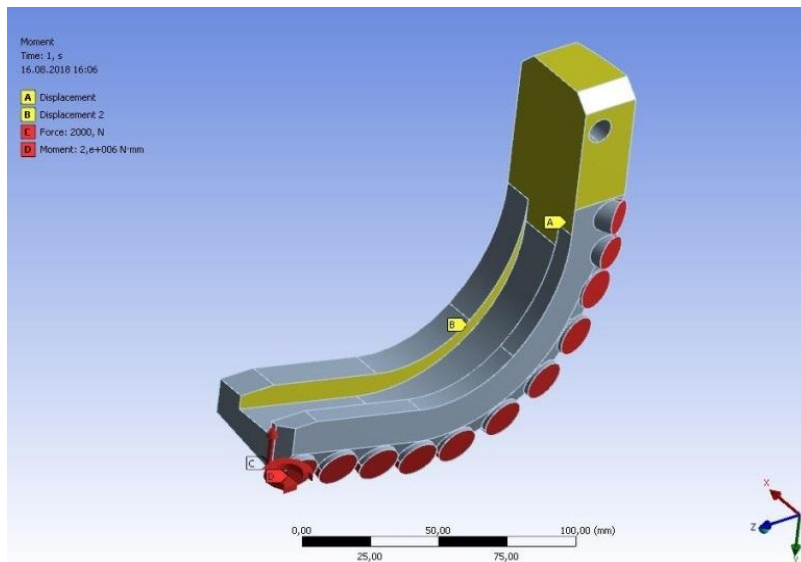


Рисунок 8 – Конечно-элементная модель раздвижной лопасти долота

Анализ расчетных данных показал увеличение коэффициента запаса прочности с увеличением ширины лопасти, причем значение коэффициента зависит от прочности на разрыв используемой стали. Согласно справочным данным и опыту проектирования выбран коэффициент запаса прочности $n = 1,35 \times 2 \times 1,5 \approx 4$ как произведение трёх частных коэффициентов. Требованию удовлетворяют стали 19ХГНМА и 40ХН2МА (рисунок 9).

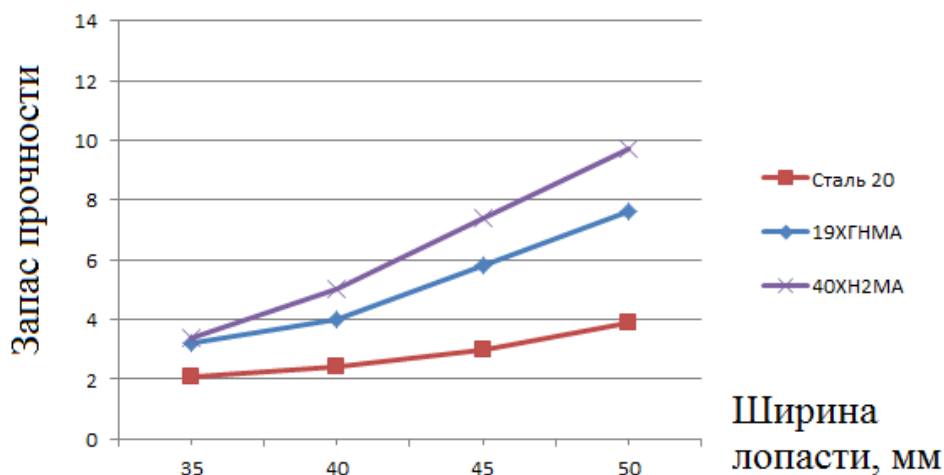


Рисунок 9 – Зависимость запаса прочности от ширины лопасти

Проведены опыты по раскрытию лопастей на гидравлическом испытательном стенде ГАКС-И-7-14. Учитывая данные, полученные теоретическими исследованиями, использованы образцы лопастей, изготовленные из полученных выше сталей. Давление опрессовки 245 обсадной колонны

составляет 9,0 МПа. Результаты испытаний показали, что сталь 40ХН2МА имеет высокие значения давления раскрытия и не удовлетворяет заданным условиям. Давление 7,0 МПа близко к критическому, поэтому оптимально выбрать ширину лопасти 40 мм при давлении 5,5 МПа (таблица 2).

Таблица 2 – Давление раскрытия лопастей долота обсадной колонны

Марка стали / ширина лопасти, мм	40	45
19ХГНМА	5,5 МПа	7,0 МПа
40ХН2МА	8,0 МПа	9,0 МПа

Подбор материала сердечника осуществляется с помощью анализа и показанных в главе 3 стендовых исследований процесса разбуривания образцов материала при различных режимах (осевая нагрузка, частота вращения, расход жидкости). По результатам выбран полимерный материал – полиамид ПА 6.

Далее показаны результаты опытно-промысловых испытаний разработанного долота, проводимых в два этапа. Первые предварительные испытания проведены на колонне бурильных труб с целью определения ресурса и проверки технических возможностей инструмента. Второй этап испытаний проведен непосредственно на обсадных трубах с целью оценки процесса разбуривания долота.

В рамках первого оценочного этапа бурение велось долотом БИТ 295,3 БОК 616 №26 на *бурильных трубах* в интервале 20–300 м на Ташлиярской площади НГДУ «Джалильнефть». В результате проходка на долото составила 280 м, механическая скорость 39,88 м/ч, что соответствует скорости бурения стандартной компоновкой в данных условиях.

Долото доказало свою работоспособность и достигло требуемой глубины.

Испытания долота БИТ 295,3 БОК 616 №28636 на *обсадных трубах* проходили в интервале 20–280 м на Восточно-Лениногорской площади НГДУ «Азнакаевскнефть». Бурение велось согласно рекомендуемым режимам бурения: частота вращения 40–120 об/мин, осевая нагрузка 2–10 т, расход промывочной жидкости 30–55 л/с.

Состав компоновки: БИТ 295,3 БОК 616 №28636 / ОК245ТМК QX-ост.

Литолого-стратиграфический разрез интервала представлял собой совокупность пород, таких как пески, глины, доломиты и известняки.

Бурение велось при следующих режимах: 1–6 т, 40–60 об/мин, 16–40 л/с, 3–9 кН*м. Почти весь интервал бурили в условиях полных поглощений промывочной жидкости. Механическая скорость за интервал 12,2 м/ч, проходка на долото 260 м. После двух циклов промывки на забое произведена успешная активация долота путем сброса пластикового шара и поднятия давления агрегатом ЦА-320 (рисунок 10).



Рисунок 10 – Долото до спуска в скважину и сброс шара активации

Давление активации 7,0–8,0 МПа при расходе 4 л/с. О срабатывании механизма свидетельствует фиксация колонны в скважине и возобновление циркуляции. Произведено разбуривание внутреннего узла долота компоновкой для бурения следующей секции на бурильных трубах. Скорость разбуривания составила 1,1 м/ч, что совпадает со стендовыми показателями. После подъема на долоте следов работы по металлу не обнаружено. Промысловые испытания разработанного долота показали эффективность его работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1 Разработана математическая модель, описывающая работу компоновки для разбуривания породоразрушающего инструмента для бурения на обсадной колонне и учитывающая угол изменения распределенных сил. На основании численного решения математической модели получены аналитические зависимости расположения точки касания компоновки о стенки обсадной колонны от осевой силы P , жесткости компоновки EJ , кажущегося радиуса r и угла изменения распределенных сил α_q . Например, при $P=5000$ кгс, $r=0,05$ м, $EJ=1,06 \cdot 10^9$ кгс·см², $\alpha_q=0,005$ рад касание будет на расстоянии $l=71,85$ м от забоя.

2 Разработан испытательный стенд на базе станка ЗИФ-1200, позволяющий проводить исследования процесса разбуривания образцов материала для изготовления внутренних элементов породоразрушающего инструмента для бурения на колонне обсадных труб.

3 Установлена полиномиальная зависимость скорости разбуривания долот для бурения на обсадной колонне, изготовленных из дюралюминия Д16Т, бронзы БрАЖ 9-4 и полиамида ПА 6, от осевого усилия, частоты вращения и расхода жидкости. Показано, что максимальная эффективность процесса достигается при использовании в качестве разбуриваемого материала полиамида марки ПА 6, скорость разбуривания которого при оптимальных режимах 1,01...1,02 м/ч. Применение полиамида защищено патентом РФ на полезную модель №156923.

4 Разработано методическое руководство «Проектирование породоразрушающего инструмента для бурения на обсадной колонне», которое утверждено и используется при разработке долот в ООО НПП «БУРИНТЕХ».

5 Спроектирована рациональная конструкция долота для бурения на обсадной колонне БИТ 295,3 БОК 616 для бурения секций под кондуктор. Проведены опытно-промысловые испытания на Восточно-Ленинградской площади Республики Татарстан. Скорость разбуривания составила 1,1 м/ч, что совпадает с расчетными и стендовыми показателями с погрешностью 7%.

Основные публикации по теме диссертационной работы:

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1 Шарипов, А.Н. Оптимизация конструкций долот PDC, направленная на снижение времени бурения секции под эксплуатационную колонну / А.Н. Шарипов, Д.Г. Храмов, Е.А. Ковалевский // Бурение и нефть. – 2013. – № 6. – С. 52-54.

2 Ковалевский Е.А., Ишбаев Г.Г. Проектирование породоразрушающего инструмента для бурения на обсадной колонне // Бурение и нефть. – 2017. – №1. – С. 32-35.

3 Ковалевский Е.А., Ямалиев В.У. Пути повышения эффективности разбуривания породоразрушающего инструмента обсадной колонны // Нефтегазовое дело. – 2017. – Том 15. – №4. – С. 17-23.

Статьи в прочих изданиях:

4 Ковалевский Е.А. Технология бурения нефтегазовых скважин с использованием колонны обсадных труб / Е.А. Ковалевский // Сервисные услуги в добыче нефти: матер. II научн.-тех. конф. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2015. – С. 75-78.

5 Ковалевский Е.А. Разработка породоразрушающего инструмента для бурения на колонне обсадных труб / Е.А. Ковалевский // Опыт, проблемы и перспективы развития неразрушающих методов контроля и диагностики машин и агрегатов: матер. Междунар. научн.-тех. конф. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. – С. 358-363.

6 Ковалевский Е.А. Разработка испытательного стенда на базе станка ЗИФ-1200 для проведения исследований процесса разбуривания / Е.А. Ковалевский // Современные технологии в нефтегазовом деле – 2017: сборник трудов междунар. научн.-тех. конф. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. – Т.1. – С. 349-354.

7 Ковалевский Е.А. К вопросу о проблеме разбуривания специализированных средств технологической оснастки и породоразрушающего инструмента обсадной колонны / Е.А. Ковалевский // Сборник научных трудов 44-ой междунар. научн.-тех. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. – Т.1 – С. 253-255.

8 Ковалевский Е.А. Определение оптимальных условий разбуривания узлов долота обсадной колонны методом анализа и решения уравнений регрессии / Е.А. Ковалевский // Роль математики в становлении специалиста: матер. Междунар. научн.-методич. конф. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. – С. 19-22.

9 Ковалевский Е.А. Опыт применения долот обсадной колонны на месторождениях Республики Татарстан в условиях бурения неглубоких кондукторов / Е.А. Ковалевский // Современные технологии в мировом научном пространстве: сборник статей Междунар. научн.-практич. конф. – Уфа: АЭТЕРНА, 2017. – Ч.3. – С. 98-100.

10 Ковалевский Е.А., Сулейманов И.Н. К вопросу аналитического исследования работы компоновки при разбуривании породоразрушающего инструмента обсадной колонны / Е.А. Ковалевский // Роль математики в становлении специалиста: матер. Междунар. научн.-практич. конф. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. – С. 107-110.

Патенты:

11 Патент на полезную модель 156923 Российская Федерация, МПК E21B 10/64. Долото для бурения на обсадной колонне / Е.А. Ковалевский, А.Ю. Драган, А.Н. Шарипов, А.Г. Балута - заяв. 20.04.2015; опубл. 20.11.2015, бюл. №32.