

На правах рукописи



Лысков Александр Анатольевич

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ ТАЛЕВЫХ КАНАТОВ

Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы
(нефтяная и газовая промышленность)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина»

Научный руководитель:

Ефимченко Сергей Иванович,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Молчанов Александр Георгиевич,
доктор технических наук, профессор
РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина

Трифанов Геннадий Дмитриевич,
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВПО «Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет»

Ведущая организация:

ОАО НПО «Буровая техника» – ВНИИБТ

Защита состоится «25» июня 2013 года в 11.00 на заседании диссертационного совета Д212.200.07 в РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, 65, корпус 1, ауд. 612.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с заверенными гербовой печатью подписями просим направлять по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, 65, корпус 1, РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, Ученый совет.

Автореферат разослан «___» мая 2013 года.

Ученый секретарь диссертационного
совета, кандидат технических наук



Гинзбург Э.С.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Неточное (или отсутствующее) представление о загруженности талевого каната в оснастке талевой системы буровых установок во многих случаях снижает безопасность ведения работ и требует дополнительных затрат времени на перепуск.

В классическом бурении спуско-подъемные операции с бурильными трубами (СПО) занимали основную долю буровых работ, а все остальные операции: механическое бурение (долбление), отбор керна, наращивание, проработка ствола и т.п. – занимали небольшую долю работ, и при расчете объема выполненной спуско-подъемным комплексом (СПК) работы ими пренебрегали. Однако, в связи с совершенствованием техники и технологий, ситуация в современном бурении изменилась: объем СПО существенно сократился, поскольку замена изношенного долота стала требоваться реже, и доля работы СПК при других операциях стала сопоставима с СПО. Очевидно, из-за этого изменятся и параметры отработки талевого каната. Поэтому весьма актуально создание уточненной модели работы талевого каната, учитывающей изменившиеся условия бурения с соответствующей системой перепуска.

Создание уточненной модели работы каната в оснастке талевой системы необходимо также в связи с появлением принципиально новых конструкций буровых установок. Талевые системы с отводными шкивами, лебедки мобильных буровых установок с барабанами уменьшенного диаметра, новые тормозные устройства и системы управления буровыми лебедками, применение систем верхнего привода (СВП) – все эти конструктивные изменения требуют также учета их влияния на расходование технического ресурса каната.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами работы канатов в талевой системе буровых установок занимались М.А. Букштейн, И. Костин, В.И. Тарасевич, С.А. Волонсевич, С.И. Ефимченко и др. Однако в трудах этих ученых остаются невыясненными вопросы моделирования работы талевого каната с учетом существенных факторов изменившихся условий работы каната, влияющих на выход его из строя, в том числе: влияния соотношения диаметров шкивов и навивки каната на барабан лебедки, учета разнообразных перемещений талевого блока при выполнении операций в процессе проводки скважины, влияния вибрации и наличия отводных шкивов в талевой системе.

Цель и задачи. Целью исследования является обеспечение эффективной работы талевых канатов на буровых установках с учетом изменившихся условий бурения и конструктивных особенностей талевых систем буровых установок последнего поколения. Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

1. Разработать математическую модель работы канатов в талевой системе с учетом изменившихся условий бурения и конструктивных факторов.
2. Изучить влияние основных факторов на работу талевых канатов в изменившихся условиях бурения, проанализировать и обработать экспериментальные и статистические данные работы канатов.
3. Проверить адекватность результатов моделирования работы талевых канатов в сопоставлении с их фактической работой.
4. Разработать рекомендации по эффективной работе талевых канатов в талевой системе буровых установок.

Научная новизна

1. Разработана математическая модель работы талевого каната, учитывающая: а) уточненное влияние соотношения диаметра шкивов и диаметра навивки каната на барабан лебедки; б) изменение высоты подъема талевого блока и его нижнего положения при различных операциях в процессе проводки скважины; в) уточненное влияние вибрации в талевой системе; г) наличие отводных шкивов.
2. Уточнены показатели долговечности талевого каната, учитывающие влияние соотношения диаметра тела огибания к диаметру каната (показатель k) и влияние растягивающего усилия в канате (показатель m).
3. Получена аналитическая зависимость КПД талевой системы, позволяющая качественно оценить процесс работы талевой системы, при этом указанный КПД находится как среднее геометрическое двух КПД – при подъеме и при спуске, с учетом возможных отводных шкивов для тяговой струны.

Теоретическая и практическая значимость. Основные научные результаты диссертационной работы взяты за основу в программном комплексе «Автоперепуск», позволяющем подбирать уточненные параметры отработки талевых канатов, вести журнал учета наработки каната, проводить перепуски каната исходя и из достигнутой наработки, и из достигнутого числа

оборванных проволок на шаге свивки каната во внешнем слое прядей. Разработанное программное обеспечение может быть использовано в проектных и научно-исследовательских организациях, занимающихся исследованием и разработкой бурового оборудования, на канатных заводах, в буровых организациях, эксплуатирующих буровое оборудование. Применение научных результатов диссертации позволяет увеличить технический ресурс талевых канатов на 30-45% и обеспечивает их эффективную работу.

Методология и методы исследования. Методологической и теоретической основой диссертационного исследования послужили труды С.И. Ефимченко в области изучения загруженности талевого каната числом изгибов на шкивах и барабане буровой лебедки при СПО и сформированная на их базе математическая модель работы каната в талевой системе. При проведении исследования и изложении материала были применены общенаучные подходы (системный, формализованный и др.) и методы научного познания (эксперимент, сравнение, моделирование и др.).

Положения, выносимые на защиту

Математическая модель работы талевого каната, учитывающая: уточненное влияние соотношения диаметра шкивов и диаметра навивки каната на барабан лебедки; изменение высоты подъема талевого блока и его нижнего положения при различных операциях в процессе проводки скважины; уточненное влияние вибрации в талевой системе; наличие отводных шкивов.

Уточненные оценочные значения показателей долговечности талевого каната, учитывающие влияние соотношения диаметра тела огибания к диаметру каната и влияние растягивающего усилия в канате.

Формула КПД талевой системы, как среднее геометрическое КПД при подъеме и при спуске, с учетом отводных шкивов для тяговой струны.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных данных обеспечивалась применением апробированных методик измерения и обработки данных, анализом точности измерений, повторяемостью результатов.

Результаты исследований были доложены и обсуждены на 61-ой, 62-ой, 63-ей Студенческой научной конференции «Нефть и газ» (г. Москва, РГУ

нефти и газа имени И.М. Губкина, соответственно 2007, 2008, 2009 гг.); VIII и IX Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» (г. Москва, РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, соответственно 2010, 2012 гг.).

Для постепенного внедрения результатов исследований в производственный процесс, с 2010 г. организованы технологические семинары по направлению «Рациональная отработка талевых канатов» для повышения квалификации работников нефтегазовой промышленности.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 13 научных работах, в том числе: 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 1 учебное пособие, 1 учебник, 2 свидетельства о государственной регистрации программы на ЭВМ. Опубликованные материалы охватывают все научные результаты, полученные во время работы над диссертацией.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 70 наименований, в том числе на иностранных языках. Содержание работы изложено на 145 страницах машинописного текста и на 63 страницах приложений. Диссертация содержит 50 таблиц, в том числе 15 таблиц в приложениях, иллюстрирована 137 рисунками, в том числе 43 рисунками в приложениях.

Основное содержание работы

Во **введении** работы дается обоснование актуальности темы исследования и необходимости моделирования работы каната в талевой системе. Объектом исследования является работа в талевой системе традиционного стального талевого каната 6х31 по ГОСТ 16853-88, где 6 – количество прядей, а 31 – количество проволок в пряди (рис. 1).

В **первой** главе приведен литературный обзор по работе канатов в талевой системе. Проанализированы основные разработки ученых, связанные с исследованием талевых канатов по длине в оснастке талевой системы.

Анализ литературы показал, что отсутствует обоснованная расчетная методика системы перепуска каната. Распространенная система отработки талевых канатов по API RP 9B заключается в экспериментальном,

теоретически не подкрепленном методе. Однако затраты на такую обработку каната велики, так как для одного каната проводится несколько десятков перепусков, требующих дополнительных времени и трудозатрат. Методика API не предусматривает учет фактической загруженности каната в оснастке.

В российской практике широко распространен метод перепуска каната по рекомендациям ВНИИНефтемаша. Это, аналогично API, теоретически не обоснованный экспериментальный метод, при котором канат обрабатывается неэффективно, без знания его фактической загруженности в оснастке.

М.А. Букштейн, В.И. Тарасевич, С.И. Ефимченко и другие исследователи пытались сделать такой учет фактической загруженности каната в оснастке. Наиболее прогрессивными исследованиями в области моделирования работы каната в оснастке являются исследования С.И. Ефимченко. Однако при этом приняты допущения:

- эффект изгиба на барабане приравнивается к эффекту изгиба на шкивах, несмотря на различие диаметров шкивов и навивки каната на барабан;
- высота подъема талевого блока фиксирована и равна длине свечи при СПО, поэтому такая модель не может учесть другие операции, происходящие в процессе проводки скважины, объем которых в современном бурении может превышать объем СПО, например – операции наращивания бурильной колонны в процессе бурения для традиционных СПК (рис. 2, а);
- не учитывается вибрация и другие конструктивные особенности современных талевых систем, в том числе влияние возможных отводных шкивов (рис. 2, б), особенности укладки каната на барабан, и др.

Таким образом, известные исследования по моделированию работы каната в оснастке не учитывают существенные факторы, влияющие на выход талевого каната из строя, в том числе: влияние соотношения диаметра шкивов и диаметра намотки каната на барабан лебедки, особенностей укладки каната на барабан (слои, радиусы перехода); изменение высоты подъема талевого блока и его нижнего положения при различных операциях в процессе проводки скважины; наличие вибрации в талевой системе; наличие отводных шкивов для тяговой и неподвижной струн.

Необходимость изучения вышеперечисленных факторов и внесения их в моделирование работы талевых канатов накапливалась годами, и крайне

востребована буровиками для объяснения фактов неэффективной работы канатов в талевой системе и обеспечения безопасного ведения буровых работ. В свою очередь прогрессирующее развитие компьютерных технологий позволяет разработать уточненную модель работы талевого каната с системой перепусков.

Итогом первой главы является постановка задач исследования.

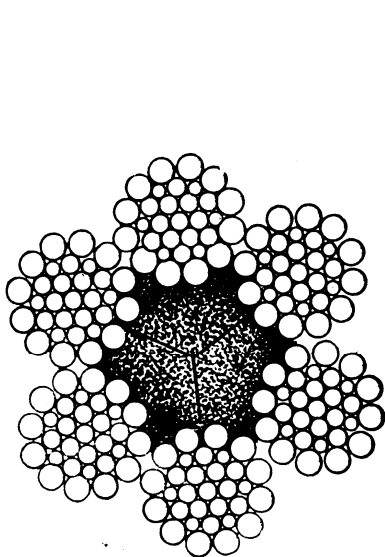


Рис. 1. Талевый канат 6х31 по ГОСТ 16853-88 (пример с органическим сердечником)

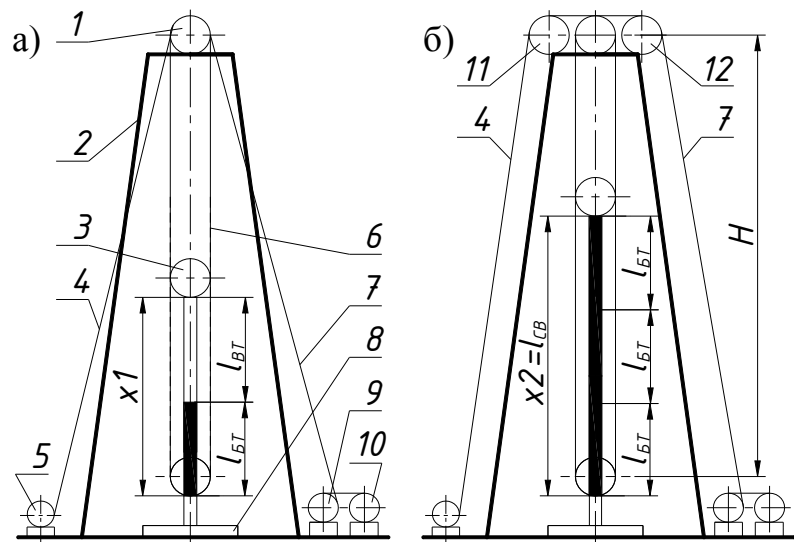


Рис. 2. Схема талевой системы в процессе наращивания:
а) для традиционных СПК; б) для СВП с отводными шкивами
 1 – кронблок; 2 – вышка; 3 – талевый блок; 4 – тяговая струна каната; 5 – барабан лебедки; 6 – рабочие струны каната; 7 – неподвижная струна каната; 8 – стол ротора; 9 – механизм крепления неподвижной струны каната; 10 – бухта с канатом; 11, 12 – отводной шкив для тяговой и неподвижной струн соответственно; $l_{лг}$ и $l_{лг}$ – длина ведущей и бурильной труб соответственно; $l_{св}$ – дна свечи; x_1, x_2 – различная высота подъема талевого блока

Во **второй** главе показано, что на работу канатов подъемных комплексов буровых установок в основном влияют: переменные и циклически изменяющиеся по длине каната в оснастке изгибные напряжения, переменные по величине и практически одинаковые по длине каната растягивающие напряжения, конструктивные факторы и вибрация талевой системы.

Число циклов изгибов каната до разрушения при работе на шкивах выражается наиболее распространенной зависимостью:

$$N = \frac{\left(\frac{D_{ш}}{d_K}\right)^k}{T^m} \cdot C, \quad (1)$$

где N – число изгибов каната до разрушения; D_{III} – диаметр тела огибания (шкива, барабана и пр.); d_K – диаметр каната; k – показатель степени (по данным исследователей $k=2,0\dots3,0$); m – показатель степени (по данным исследователей $m=1,65\dots1,7$); T – растягивающее усилие в канате; C – коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции и типоразмера каната.

С точки зрения рассмотрения изгибных факторов, в формуле (1) присутствует показатель степени k (показатель долговечности, учитывающий влияние величины соотношения диаметра тела огибания к диаметру каната). Этот показатель мало изучен, варьируется в больших пределах (от 2 до 3), и его выбор из этого диапазона ничем не обоснован. С точки зрения рассмотрения факторов растягивающих напряжений, в формуле (1) присутствует показатель степени m (показатель долговечности, учитывающий влияние величины растягивающего усилия в канате). Этот показатель мало изучен, варьируется в узких рамках от 1,65 до 1,7, и его выбор ничем не обоснован.

Перечислены основные конструктивные факторы талевого системы, то есть те факторы, которые сформировались из-за определенной той или иной конструкции талевого системы (особенности укладки каната на барабан, наличие или отсутствие отводных шкивов, заделка концов каната, закрутка и отклонение талевого блока, и прочие).

При вибрациях, возникающих из-за неравномерной навивки каната на барабан при СПО и динамических колебаний в процессе бурения, зона набегания неподвижной струны на последний шкив является локальной зоной накопления усталостных факторов, что приводит к износу каната. Вибрация талевого системы – это негативный фактор, его следует избегать или минимизировать.

В **третьей** главе в ходе анализа и обработки экспериментальных и статистических данных уточнены показатели долговечности каната: показатель k , учитывающий влияние величины соотношения диаметра тела огибания к диаметру каната, и показатель m , учитывающий влияние величины растягивающего усилия в канате.

Для уточнения показателя k обработаны данные API RP 9B, основанные на лабораторных испытаниях. Было найдено среднее значение, равное 2,44, сделана интервальная оценка. Также для уточнения показателя k обработаны

результаты ВНИИНефтемаша и С.А. Волонсевича. По ним для нагрузок 67 и 105 кН были получены средние значения k : 2,34 и 2,77 соответственно.

Исходя из этого, сделан вывод о рекомендации оценочного показателя долговечности k , равного 2,4 при глубине бурения до 2000 м; 2,6 при глубине бурения от 2000 м до 3500 м; и 2,8 при глубине бурения более 3500 м. Такой выбор показателя k обусловлен тем, что нагрузки, действующие на талевый канат, не постоянны, и при бурении скважин большей глубины присутствует больший спектр нагрузок (и величина этих нагрузок больше), чем при бурении неглубоких скважин или интервалов.

Знание показателя k дает представление о зависимости между диаметром тела огибания и долговечностью каната при постоянном диаметре каната. Например, если диаметр шкива по дну желоба равен 1000 мм, диаметр навивки на барабан равен 800 мм, а показатель k равен 2,8, то расходование технического ресурса каната за один изгиб на барабане больше расходования технического ресурса каната за один изгиб на шкиве примерно в 2 раза.

Уточненный показатель k сравнен с данными других исследователей. Из ранее предложенных зависимостей наиболее близкие к экспериментальным данным расчетные значения дают формулы С.А. Волонсевича, К.М. Масленникова и А.И. Колчина. Расчеты по формуле Г.Д. Житкова дают значительные расхождения с результатами экспериментальных данных. Общая погрешность менее 10% получилась только при расчете по формуле (1) с уточненным показателем k , поэтому данная зависимость с рекомендуемым выбором показателя долговечности k является наиболее достоверной и точной.

Для уточнения показателя m обработаны данные API RP 9B, основанные на лабораторных испытаниях. Найдено среднее значение, равное 1,09, сделана интервальная оценка. Среднее значение изменяется от 0,74 до 1,49, при этом при меньшем запасе прочности (большей растягивающей нагрузке) показатель m больше, а при большем запасе прочности (меньшей растягивающей нагрузке) – меньше. Также для уточнения показателя m обработаны результаты ВНИИНефтемаша и С.А. Волонсевича. Установлено, что чем больше отношение диаметров шкива к канату – тем больше показатель m .

Анализ оценочного значения показателя m из опытов API и опытов ВНИИНефтемаша показал, что оно изменяется в зависимости от

растягивающей нагрузки и в зависимости от отношения диаметра тела огибания к диаметру каната. Имеет значения от 0,7 до 2,4 (находится в более широком диапазоне, чем установлено ранее). В оценочных расчетах рекомендуется принимать значение m , равное 1,2 при глубине бурения до 2000 м; 1,6 при глубине бурения от 2000 м до 3500 м; и 2,0 при глубине бурения более 3500 м, причем величина показателя m может быть снижена, если условия работы каната легкие (то есть когда запас прочности каната гарантировано большой). Такой выбор показателя m обусловлен тем, что нагрузки, действующие на талевый канат, непостоянны, и при бурении скважин большей глубины отношение диаметра тела огибания к диаметру каната больше, чем при бурении неглубоких скважин.

Знание показателя долговечности m дает представление о зависимости между действующими на канат растягивающими нагрузками и его долговечностью. Например, долговечность каната с показателем $m=1,6$ в 1,6 раза (на 60%) больше по сравнению с канатом, имеющим показатель $m=1,7$.

В **четвертой** главе разработана математическая модель работы талевых канатов, учитывающая основные факторы, влияющие на выход талевого каната из строя, в том числе: влияние соотношения диаметра шкивов и диаметра навивки каната на барабан лебедки; изменение высоты подъема талевого блока и его нижнего положения при различных операциях в процессе проводки скважины; уточненное влияние вибрации в талевой системе; наличие отводных шкивов для тяговой и неподвижной струн.

Основные допущения моделирования:

- объект исследования – работа в талевой системе традиционного талевого каната 6х31 по ГОСТ 16853-88 (см. рис. 1), с известной изученной зависимостью между количеством оборванных проволок и относительной наработкой каната, изображенной на рис. 3 (вне зависимости от разновидности, т.е. качества каната по ГОСТ 16853-88);
- за цикл работы каната (один спуск-подъем талевого блока) канат испытывает один цикл изгиба на шкиве и один цикл изгиба на барабане, при этом эффект цикла изгиба на шкиве равен эффекту цикла изгиба на барабане, если их диаметры равны;
- эффект изгиба на отводном шкиве равен эффекту изгиба на основном шкиве талевой системы, если их диаметры равны;

- влияние вибрации – оценочное;
- по длине каната в оснастке принимается одинаковое нагружение его участков от переменной растягивающей нагрузки, поэтому при определении загруженности талевого каната по длине в оснастке основными считаются изгибные факторы.

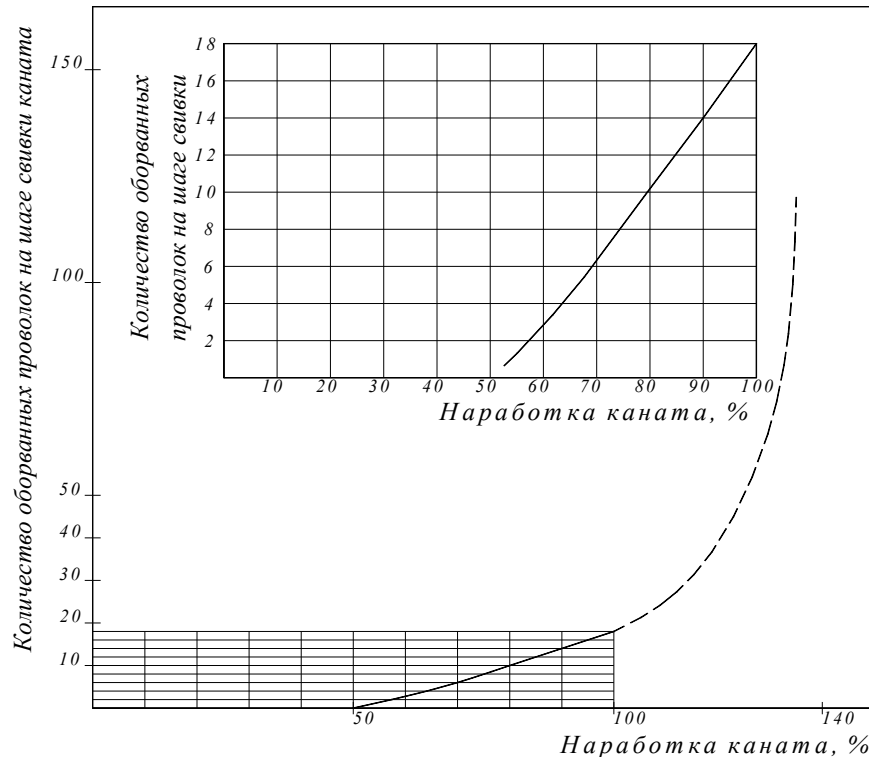


Рис. 3. Зависимость количества оборванных проволок на шаге свивки каната от наработки каната

Процесс моделирования можно разбить на следующие этапы.

1) Вычисляем длину каната A , огибающую половину окружности шкива. Вычисляем длину L_{NE} несвиваемых с барабана витков каната. Находим длину каната L_{OS} в оснастке и разбиваем ее на массив значений L от 0 до L_{OS} , м. Получаем $Z_{ОБЩ}(L)$ – суммарное число изгибов каната по длине в оснастке талевой системы за цикл работы каната. При отсутствии отводного шкива для тяговой струны:

$$Z_{ОБЩ}(L) = \sum_{i=1}^{U_{ТС}} Z_i(L), \quad (2)$$

где $i = 0; 1..U_{ТС}$; причем:

$$Z_i(L) = \begin{cases} \text{если } i = 0, \text{ то } Z_i(L) = \begin{cases} 1, \text{ если } [L_z + L_{NE}] \leq L \leq [L_z + L_{NE} + x \cdot U_{ТС}] \\ 0, \text{ иначе} \end{cases} \\ \text{иначе } Z_i(L) = \begin{cases} 1, \text{ если } [L_z + L_{NE} + L_T + A + (i-1) \cdot (H + A)] \leq L \leq [L_z + L_{NE} + L_T + A + (i-1) \cdot (H + A) + x \cdot (U_{ТС} - i + 1)] \\ 0, \text{ иначе} \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

где L_Z – длина каната, необходимая для закрепления на барабане лебедки прижимной планкой; x – высота подъема талевого блока; U_{TC} – кратность оснастки; L_T – длина тяговой струны; H – расстояние между осью кронблока и осью талевого блока при нижнем положении последнего.

При наличии отводного шкива для тяговой струны:

$$Z_{\text{ОБЩ}}(L) = \sum_{i=1}^{U_{TC}+1} Z_i(L), \quad (4)$$

где $i = 0; 1..U_{TC} + 1$; причем:

$$Z_i(L) = \begin{cases} \text{если } i=0, \text{ то } Z_i(L) = \begin{cases} 1, \text{ если } [L_Z + L_{NE}] \leq L \leq [L_Z + L_{NE} + x \cdot U_{TC}] \\ 0, \text{ иначе} \end{cases} \\ \text{если } i=1, \text{ то } Z_i(L) = \begin{cases} 1, \text{ если } [L_Z + L_{NE} + L_T + A] \leq L \leq [L_Z + L_{NE} + L_T + A + x \cdot U_{TC}] \\ 0, \text{ иначе} \end{cases} \\ \text{иначе } Z_i(L) = \begin{cases} 1, \text{ если } [L_Z + L_{NE} + L_T + L_{OT} + A + (i-2) \cdot (H+A)] \leq L \leq [L_Z + L_{NE} + L_T + L_{OT} + A + (i-2) \cdot (H+A) + x \cdot (U_{TC} - i)] \\ 0, \text{ иначе} \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

где L_{OT} – расстояние между осями отводного шкива и быстроходного шкива кронблока.

Пример распределения числа изгибов каната по длине в оснастке с отводным шкивом для тяговой струны за цикл работы каната в талевой системе показан на рис. 4 и рис. 5.

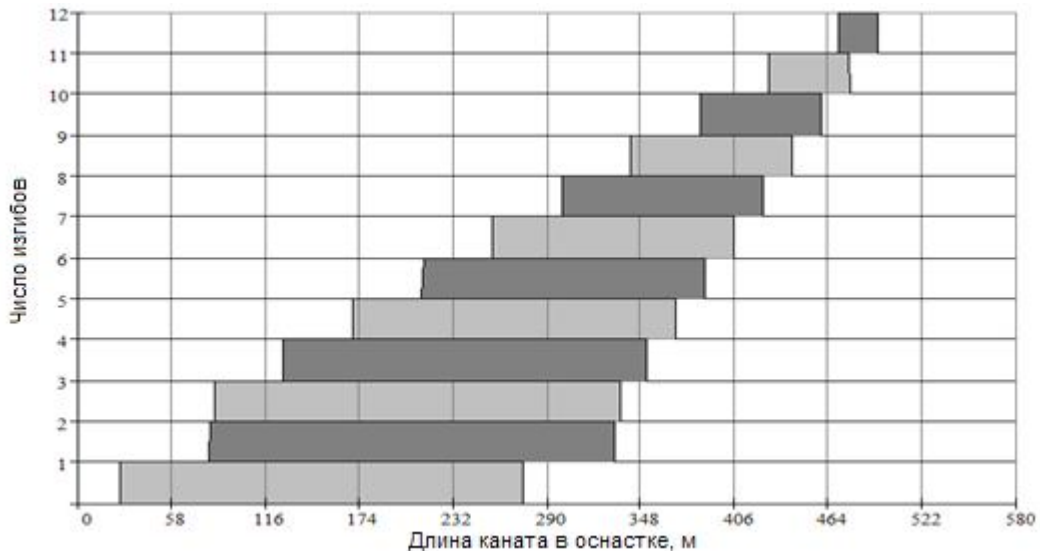


Рис. 4. Число изгибов каната в оснастке талевой системы за один цикл работы каната по отдельности каждым телом огибания



Рис. 5. Суммарное число изгибов каната в оснастке за один цикл работы каната

2) Учитываем начальное положение талевого блока:

- считаем массив $Zx1h10(L)$ – он равен массиву $Z_{ОБЩ}(L)$, только не при высоте x , как в (3) и (5), а при высоте $(x1+ h1_0)$, где $x1$ – величина подъема талевого блока в первой группе операций, а $h1_0$ – начальное положение талевого блока в первой группе операций;
- считаем массив $Zh10(L)$ – он равен массиву $Z_{ОБЩ}(L)$, только не при высоте x , как в (3) и (5), а при высоте $h1_0$;
- считаем массив $Zx1(L)$ – эквивалентное число изгибов на шкивах с учетом начального положения талевого блока:

$$Zx1(L) = Zx1h10(L) - Zh10(L); \quad (6)$$

аналогично считаем $Zx2(L)$, $Zx3(L)$ и т.д., в зависимости от исходно заданного пользователем числа групп операций.

Разбиение на число групп операций дает возможность учесть не только СПО, как было во всех известных ранее методиках, но и совместное действие всех операций с талевым блоком, которые можно объединить в группы. Например, группа №1: СПО; группа №2: наращивание при бурении; группа №3: наращивание при бурении (отличается от №2 высотой подъема талевого блока); группа №4: промывка при бурении; и т.д. Каждая из групп операций будет отличаться величиной подъема талевого блока ($x1$, $x2$, $x3$ и т.д.), начальным положением талевого блока ($h1_0$, $h2_0$, $h3_0$ и т.д.), максимальной наработкой каната за соответствующую группу операций ($B_{\max}^{ОПЕР1}$, $B_{\max}^{ОПЕР2}$, $B_{\max}^{ОПЕР3}$ и т.д.), рассчитанной в кН^m или в других единицах, и коэффициентом, учитывающим динамические нагрузки при заделке неподвижного конца и вибрации ($V1$, $V2$, $V3$ и т.д.).

3) Учитываем слои на барабане и переходы со слоя на слой и из витка в виток. Для этого в каждой из групп операций вычисляем диаметр навивки каната на барабан $D_B(L)$ (за начальные условия принимаем $D_0=0$; $D_{\Pi}=\infty$):

$$D_B1(L) = \begin{cases} 0, & \text{если } L > L_{KB}1 \\ \text{иначе} \begin{cases} D_n, & \text{если } \left[\left[\left(\frac{L_B}{d_K} \right) \cdot \pi \sum_{i=0}^{n-1} D_i \leq L \leq \left(\frac{L_B}{d_K} \right) \cdot \pi \sum_{i=0}^n D_i \right] \wedge [D_{\Pi n} \geq D_n] \right] \\ D_{\Pi n}, & \text{если } \left[\left[\left(\frac{L_B}{d_K} \right) \cdot \pi \sum_{i=0}^{n-1} D_i \leq L \leq \left(\frac{L_B}{d_K} \right) \cdot \pi \sum_{i=0}^n D_i \right] \wedge [D_{\Pi n} < D_n] \right] \end{cases} \end{cases}, \quad (7)$$

аналогично считаем $D_B2(L)$, $D_B3(L)$ и т.д., в зависимости от исходно заданного пользователем числа групп операций, где D_n – диаметр n -го слоя навивки каната на барабан:

$$D_n = D_B + d_K + 2 \cdot h_\Delta \cdot (n-1), \quad (8)$$

n – номер слоя на барабане; h_Δ – высота треугольника, образованного центрами трех соприкасающихся друг к другу витков:

$$h_\Delta = \sqrt{d_K^2 - \left(\frac{d_K + m_B}{2}\right)^2}, \quad (9)$$

m_B – зазор между витками; D_B и L_B – диаметр и длина обечайки барабана лебедки; d_K – диаметр каната; $D_{Пn} = 2 \cdot R_{Пn}$ – диаметр перехода каната со слоя на слой или из витка в виток; $R_{Пn}$ – радиус изгиба каната при переходе с предыдущего слоя на n -ый слой или из витка в виток в n -ом слое:

$$R_{Пn} = \frac{\left[\frac{D_n - d_K}{2} + \sqrt{d_K^2 - \left(\frac{d_K + m_B}{2}\right)^2}\right]^2 + \left(\frac{D_n + d_K}{2}\right)^2 - 2 \cdot \left[\frac{D_n - d_K}{2} + \sqrt{d_K^2 - \left(\frac{d_K + m_B}{2}\right)^2}\right] \cdot \left(\frac{D_n + d_K}{2}\right) \cdot \cos \frac{\alpha}{2}}{2 \cdot \left[\left(\frac{D_n + d_K}{2}\right) - \left(\frac{D_n - d_K}{2} + \sqrt{d_K^2 - \left(\frac{d_K + m_B}{2}\right)^2}\right) \cdot \cos \frac{\alpha}{2}\right]}, \quad (10)$$

α – угол сектора перехода каната со слоя на слой и из витка в виток; L_{KB1} , L_{KB2} , и т.д. – канатоемкость барабана в зависимости от группы операций, то есть полная длина каната, укладываемая на барабан при подъеме талевого блока на необходимую высоту:

$$L_{KB1} = L_{NE} + (x1 + h1_0) \cdot U_{TC}. \quad (11)$$

Для каждой из групп операций вычисляем массив коэффициентов KD , учитывающий влияние соотношения диаметра шкивов и диаметра навивки каната на барабан на долговечность каната по длине L в оснастке:

$$KD1(L) = \left(\frac{D_{III}}{D_{B1}(L)}\right)^k; \quad (12)$$

аналогично считаем $KD2(L)$, $KD3(L)$ и т.д., в зависимости от исходно заданного пользователем числа групп операций.

Для каждой из групп операций вычисляем эквивалентное число изгибов на шкивах $ZBx(L)$ с учетом начального положения талевого блока (6) и особенностей навивки каната на барабан (12):

$$ZBx1(L) = \begin{cases} Zx1(L), & \text{если } L \geq (L_Z + L_{KB1}) \\ [Zx1(L) + KD1(L) - 1], & \text{если } (L_Z + L_{NE}) \leq L \leq (L_Z + L_{KB1}) \end{cases}; \quad (13)$$

аналогично считаем $ZBx2(L)$, $ZBx3(L)$ и т.д., в зависимости от исходно заданного пользователем числа групп операций.

На рис. 6 показаны модели расходования технического ресурса талевого каната по его длине в оснастке числом эквивалентных циклов изгиба по четырем вариантам (*а*, *б*, *в*, *г*): *а*) без учета разницы диаметров шкивов и барабана и многослойной навивки каната на барабан (по зависимости (6)); *б*) с учетом разницы диаметров шкивов и барабана и без учета многослойной навивки каната на барабан (диаметр навивки каната на барабан в этом случае принят постоянным); *в*) с учетом разницы диаметров шкивов и барабана и с учетом многослойной навивки каната на барабан; *г*) с учетом всего вышеперечисленного и с учетом перехода каната со слоя на слой и с витка в виток (по зависимости (13)).

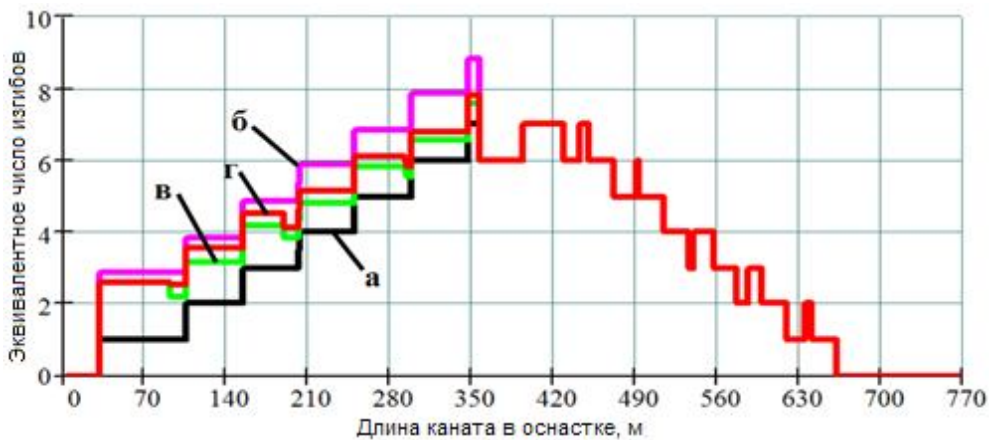


Рис. 6. Влияние конструктивных особенностей (геометрических факторов) на загруженность каната эквивалентным числом изгибов по длине в оснастке за цикл работы каната: *а*) без учета разницы диаметров шкивов и барабана и многослойной навивки каната на барабан; *б*) с учетом разницы диаметров шкивов и барабана и без учета многослойной навивки каната на барабан; *в*) с учетом разницы диаметров шкивов и барабана и с учетом многослойной навивки каната на барабан; *г*) с учетом всего вышеперечисленного и с учетом перехода каната со слоя на слой и с витка в виток

Из рис. 6 видно, что для варианта *а* загруженность каната меньше, чем для трех других вариантов *б*, *в*, *г*. Если учитывать только разницу диаметров шкивов и барабана без учета многослойной навивки на барабан (вариант модели *б*), то загруженность каната будет больше, чем для варианта *а*. При учете же обоих факторов (и разницы диаметров шкивов и барабана, и многослойной навивки каната на барабан, см. вариант модели *в*) загруженность каната займет промежуточное положение между вариантами *а* и *б*. Это объясняется тем, что диаметр барабана увеличивается по мере навивки на него каната, и изгибающие напряжения уменьшаются по сравнению с исходным диаметром обечайки барабана, тем самым технический ресурс каната расходуется меньше (вариант *в* по сравнению с вариантом *б*). Если учитывать переход каната со слоя на слой и с витка в виток (вариант модели *г*), то загруженность каната будет либо такая же,

как и по варианту *в* (если угол α больше или равен 60^0), либо будет больше, чем для варианта *в* (если угол α меньше 60^0). Следует отметить, что модель по варианту *г* наиболее приближена по сравнению с вариантами *а*, *б* и *в* к фактическому расходованию ресурса талевого каната, поскольку учитывает наибольшее число основных факторов, выводящих канат из строя.

4) Учитываем заделку неподвижного конца и вибрацию: вычисляем длину зоны влияния L_V (рис. 7); для каждой из групп операций находим максимум функции $ZBx(L)$; для каждой из групп операций вычисляем эквивалентное число изгибов $ZVBx(L)$ на шкивах с учетом начального положения талевого блока (см. зависимость (6)), особенностей навивки каната на барабан (см. зависимость (13)), особенностей заделки каната на неподвижном конце и вибрации. Для учета влияния заделки неподвижной струны и оценки вибрации при СПО и бурении на расходование ресурса талевого каната по длине в оснастке талевой системы в этой зоне нами выделено два случая, которые можно выбрать пользователю: а) без учета вибрации ($V=0$), при этом влияние заделки в зоне невращающегося шкива кронблока приравнивается к одному циклу изгиба на шкиве за цикл работы каната; и б) с учетом вибрации ($V=1$), при этом влияние нагрузки от вибрации и влияние заделки неподвижной струны в зоне невращающегося шкива кронблока приравнивается к максимальному эквивалентному числу изгибов на шкивах (см. рис. 7). То есть, сопоставив влияние вибрации и заделки неподвижной струны с изгибными факторами, учет указанных динамических нагрузок введен в математическую модель работы талевого каната. При проверке на адекватность такая математическая модель более адекватна, чем модель без учета влияния указанных динамических нагрузок (рис. 10).

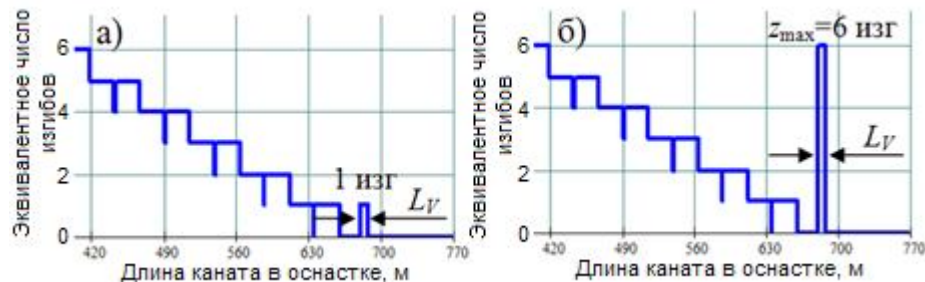


Рис. 7. Влияние динамических нагрузок в зоне невращающегося шкива кронблока на загруженность каната эквивалентным числом изгибов по длине в оснастке за цикл работы каната: а – без учета вибрации, с учетом заделки неподвижной струны; б – с учетом вибрации и учетом заделки неподвижной струны

5) Общая загруженность, то есть расходование технического ресурса каната, учитывающая все вышеперечисленные факторы, равна:

$$ZЭ_{\text{Общ}}(L) = \frac{ZVБx1(L) \cdot B_{\text{max}}^{\text{ОПЕР1}} + ZVБx2(L) \cdot B_{\text{max}}^{\text{ОПЕР2}} + ZVБx3(L) \cdot B_{\text{max}}^{\text{ОПЕР3}} + \dots}{B_{\text{max}}^{\text{ОПЕР1}} + B_{\text{max}}^{\text{ОПЕР2}} + B_{\text{max}}^{\text{ОПЕР3}} + \dots}, \quad (14)$$

в зависимости от исходно заданного пользователем числа групп операций.

6) Наконец, строим модель работы всей бухты каната с системой перепуска (рис. 8); выводим результаты моделирования (контрольная карта отработки каната и прочие действия с выводом и сохранением отчетов).

На основе данной математической модели составлен программный комплекс «Автоперепуск», написанный в системах Mathcad и C#.

При анализе работы каната в талевой системе также получена уточненная и более показательная формула КПД талевой системы, найденная как среднее геометрическое двух КПД – при подъеме и при спуске:

$$\eta_{ТС} = \eta_{Ш}^{\frac{1}{2}(U_{ТС} + N_{ОТВ} + 1)}, \quad (15)$$

где $\eta_{Ш}$ – КПД одного шкива; $U_{ТС}$ – кратность оснастки, $N_{ОТВ}$ – число отводных шкивов для тяговой струны. Полученная новая аналитическая зависимость позволяет качественно оценить процесс работы талевой системы (при увеличении $\eta_{Ш}$ увеличивается $\eta_{ТС}$, при увеличении $U_{ТС}$ или $N_{ОТВ}$ уменьшается $\eta_{ТС}$), делает менее трудоемким расчет КПД талевой системы по сравнению с известными формулами, и расхождение между ними составляет не более 1%.

В **пятой** главе проверена адекватность модели работы канатов в талевой системе буровых установок, т.е. проведено сравнение полученной математической модели с фактической работой каната в оснастке. Внедрены результаты исследования в качестве готового программного обеспечения и даны рекомендации по эффективной работе талевых канатов.

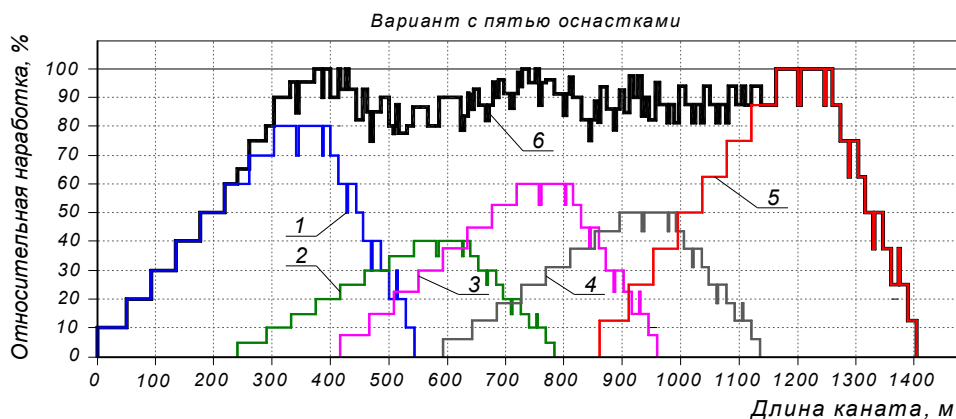


Рис.8. Пример моделирования работы каната по длине в бухте:

1 ... 5 – кривые расходования технического ресурса каната по длине в соответствующих оснастках; 6 – кривая расходования технического ресурса по всей длине каната в бухте

Проведен расчет показателя m на основе данных бурения Кольской скважины СГ-3, подтверждающий выбор оценочного показателя m в главе 3 и влияние факторов отношения диаметров тела огибания к канату и нагрузки в канате, что связано с изменением глубины бурения скважины (рис. 9).

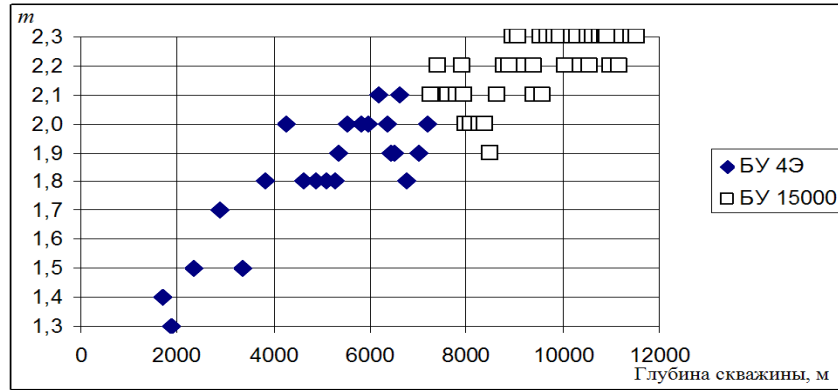


Рис. 9. Значения показателя m по данным бурения

Обработка промысловых данных отработки канатов показала лучшую приближенность загруженности каната по всей бухте к фактической работе каната по сравнению с прежней методикой (см. пример на рис. 10), поэтому учтенные в предлагаемой методике (на основе уточненной математической модели) факторы оценены верно. Уточненная разработанная модель работы каната позволяет не только объяснить причину раннего выхода каната из строя в последней оснастке при отработке его по прежней методике, но и позволяет достичь увеличения использования технического ресурса каната, отработав его на 30-45% больше по сравнению с отработкой по прежней методике.

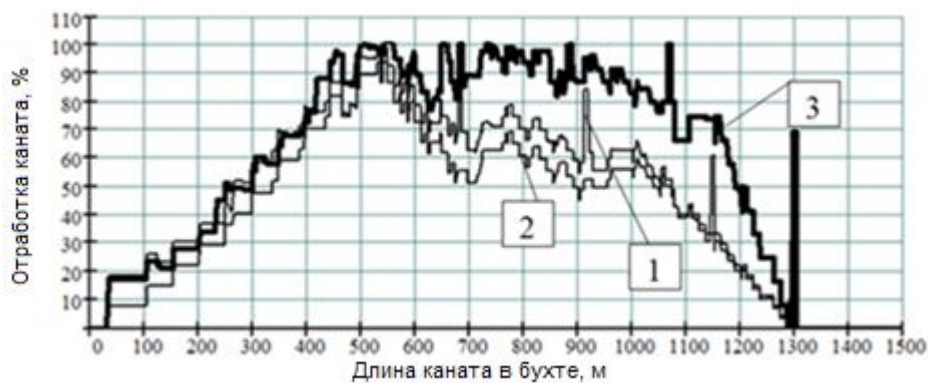


Рис. 10. Суммарные наработки каната при отработке по различным методикам: 1 – по уточненной; 2 – по известной (прежней); 3 – по уточненной с учетом рациональной отработки

На основе промысловых исследований по оценке технического состояния талевых канатов на Ванкорском месторождении, проведен контроль канатов инструментом неразрушающего контроля (дефектоскопом). Зная из проведенных замеров данные по количеству оборванных проволок и местам

обнаруженных дефектов, а также зная зависимость относительной наработки каната от числа оборванных проволок (см. рис. 3), на местах обнаруженных дефектов вычислена наработка каната в относительных единицах (процентах). На рис. 11 и 12 точками показаны относительные наработки каната, полученные путем измерения дефектоскопом числа оборванных проволок на опытном испытываемом талевом канате.

Для данных условий смоделирована работа каната в оснастке, и проверена адекватность разработанной модели. Полученная модель расходования ресурса каната в оснастке, построенная в относительных единицах (наработке в процентах), представлена на рис. 11 и сравнена с фактической отработкой, локально измеренной в некоторых участках каната с помощью дефектоскопа. На рис. 12 представлена предыдущая известная модель загрузки каната числами изгибов при СПО.



Рис. 11. Точки фактической отработки и разработанная модель расходования ресурса каната



Рис. 12. Точки фактической отработки и предыдущая известная модель расходования ресурса каната

На основе вычисления общих погрешностей показано, что разработанная модель расходования ресурса каната с учтенными нами факторами является более адекватной (погрешность в фактической и

расчетной относительных наработках составила менее 10%), предыдущая же модель – менее адекватной (указанная погрешность составила около 50%).

В **Приложениях** приведены статистические и опытные данные отработки талевых канатов, пример построения модели распределения числа изгибов каната по длине в оснастке с любой величиной высоты подъема талевого блока, исходя из отдельного влияния каждого тела огибания на участок каната, нахождение аналитической зависимости числа изгибов каната от длины в оснастке талевой системы, отчеты по семинарам «Рациональная отработка талевых канатов», письма с предприятий об использовании программного обеспечения «Автоперепуск».

Заключение

Общие выводы исследования:

1. Разработана математическая модель работы канатов в талевой системе буровых установок, учитывающая такие факторы, как:

- уточненное влияние соотношения диаметра шкивов и диаметра навивки каната на барабан лебедки, особенностей укладки каната на барабан (слои, радиусы перехода);
- изменение высоты подъема талевого блока и его нижнего положения при различных операциях в процессе проводки скважины;
- уточненное влияние вибрации в талевой системе;
- наличие отводных шкивов для тяговой и неподвижной струн, причем указанные факторы являются основными (существенными). Это позволило обеспечить эффективную работу талевых канатов.

2. Уточнены показатели долговечности талевого каната (k и m), учитывающие влияние соотношения диаметра тела огибания к диаметру каната (показатель долговечности k) и влияние растягивающего усилия в канате (показатель долговечности m). Указанные показатели зависят от глубины скважины и имеют оценочные значения: $k=2,4$; $m=1,2$ при глубине бурения до 2000 м; $k=2,6$; $m=1,6$ при глубине бурения от 2000 м до 3500 м; и $k=2,8$; $m=2,0$ при глубине бурения более 3500 м.

Установлено, что при различии в 20% диаметра шкива и диаметра навивки каната на барабан лебедки расходование технического ресурса каната за один изгиб на барабане больше расходования технического ресурса за один изгиб на шкиве примерно в 2 раза. Показано, что учет изменения высоты подъема талевого блока при различных операциях в процессе проводки скважины имеет погрешность менее 10% с фактической наработкой каната, а неизменная высота подъема талевого блока имеет указанную погрешность около 50%. Показано, что вибрационные нагрузки в талевой системе приводят к усталостному износу каната в зоне невращающегося шкива кронблока, и влияние вибрации и заделки неподвижной струны в этой зоне сопоставимо с влиянием изгибных факторов на шкивах и барабане лебедки. Показано также, что наличие отводных шкивов для тяговой и неподвижной струн вносит дополнительные изгибные факторы в работу каната.

3. При сравнении разработанной математической модели с фактической работой каната в оснастке погрешность в фактической и расчетной относительных наработках составила менее 10%.

4. Основные рекомендации по работе канатов в талевой системе буровых установок предусматривают: учет изгибных факторов и факторов растягивающих напряжений с уточненными показателями k и m ; учет конструктивных факторов, включая наличие отводных шкивов, разность диаметров барабана лебедки и шкивов талевой системы, особенности укладки каната на барабан, различную высоту подъема талевого блока и его начальное положение; расчет КПД талевой системы по предложенной уточненной формуле, который находится как среднее геометрическое двух КПД – при подъеме и при спуске, с учетом возможных отводных шкивов для тяговой струны; учет уточненного влияния вибрации талевой системы; использование программного комплекса «Автоперепуск», включающего разработанную математическую модель работы талевого каната.

Соблюдение указанных рекомендаций позволяет обеспечить эффективную работу талевых канатов на буровой установке и увеличить технический ресурс талевого каната на 30-45%, повысить безопасность ведения работ, увеличить производительное время работы буровых бригад за счет снижения времени, затрачиваемого на обработку талевого каната, а также

сформировать правильное представление о загруженности талевого каната в оснастке, что позволит знать наиболее загруженные (опасные) участки талевой системы, прогнозировать возможные локальные места обрыва проволок талевого каната, и более уверенно чувствовать себя находящимися под многотонным талевым блоком буровой установки, висящем на талевом канате.

Перспективами дальнейшей разработки темы исследования являются: учет провала вышележащего витка в нижний слой каната при его многослойной навивке на барабан; экспертная оценка влияния вибрации в талевой системе; моделирование работы талевых канатов нетрадиционной конструкции (с восьмью прядями, с пластическим обжатием прядей и др.).

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

В периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Ефимченко С.И., Лысков А.А. Разработка программного обеспечения расчета регламентов рациональной отработки талевых канатов // НТЖ ВНИИОЭНГ. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2009. №3. С. 24–26.
2. Лысков А.А. Факторы, вызывающие закрутку и отклонение талевого блока // НТЖ ВНИИОЭНГ. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2013. №2. С.6–13.
3. Лысков А.А. Обтяжка талевых канатов // НТЖ ВНИИОЭНГ. Оборудование и технологии. 2013. №1. С.8–15.
4. Лысков А.А. Влияние вибрации и заделки неподвижной струны при СПО и бурении на расходование ресурса талевого каната по длине в оснастке талевой системы // НТЖ Территория Нефтегаз. 2012. №12. С.12–16.

В остальных изданиях:

5. Ефимченко С.И., Лысков А.А. Рациональная отработка талевых канатов: учебное пособие. М.: ООО «Издательство «НЕФТЬ и ГАЗ», 2008. 110 с.
6. Ефимченко С.И., Лысков А.А., Прыгаев А.К. Расчёт и конструирование машин и оборудования нефтяных и газовых промыслов. Часть 2. Расчёт, конструирование и эксплуатация талевых систем буровых установок: учебник для вузов. М.: ООО «Издательский дом Недра», 2010. 390 с.

7. Ефимченко С.И., Лысков А.А., Силкин А.П. Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ №2010612146 «АВТОПЕРЕПУСК-1» от 23.03.2010.
8. Ефимченко С.И., Лысков А.А., Силкин А.П. Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ №2010612147 «АВТОПЕРЕПУСК-2» от 23.03.2010.
9. Лысков А.А. Разработка алгоритма и программного обеспечения расчета регламентов оптимальной отработки талевых канатов при бурении скважин // Тезисы докладов 61-ой Студенческой научной конференции «Нефть и газ – 2007». Секция «Инженерная и прикладная механика нефтегазового комплекса». 10-13 апреля 2007 г. – М., 2007. С.34.
10. Лысков А.А. Разработка установки по предварительной вытяжке талевых канатов, применяемых при бурении скважин // Тезисы докладов 62-ой Студенческой научной конференции «Нефть и газ – 2008». Секция «Инженерная и прикладная механика нефтегазового комплекса». 8-11 апреля 2008 г. – М., 2008. С.38.
11. Лысков А.А. Анализ причин, вызывающих закрутку талевой системы буровых установок при СПО // Тезисы докладов 63-ей Студенческой научной конференции «Нефть и газ – 2009». Секция «Инженерная и прикладная механика нефтегазового комплекса». 13-16 апреля 2009 г. – М., 2009. С.40.
12. Лысков А.А., Ефимченко С.И. Пути повышения надежности и эффективности работы талевых канатов // Тезисы докладов VIII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России». Часть II. Секции 5-10. 1-3 февраля 2010 г. – М., 2010. С.12.
13. Лысков А.А. Анализ методов перепусков талевого каната на буровой установке // Тезисы докладов IX Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России». Часть II. Секции 5-10. 30 января – 1 февраля 2012 г. – М., 2012. С.32.