

На правах рукописи



МУХАМЕТГАЛИЕВ ИЛЬМИР ДАМИРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЕКТНОЙ
ТРАЕКТОРИИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ ПРИ БУРЕНИИ
В ПРОДУКТИВНОМ ГОРИЗОНТЕ**

Специальность 2.8.2. – «Технология бурения и
освоения скважин» (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа 2026

Работа выполнена на кафедре «Бурение нефтяных и газовых скважин» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Аглиуллин Ахтям Халимович

Официальные оппоненты: **Гарри Сергеевич Оганов**
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени
И. М. Губкина», кафедра «Бурение нефтяных
и газовых скважин» / и.о. заведующего
кафедрой
Мелехин Александр Александрович
кандидат технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет», кафедра «Нефтегазовые
технологии» / доцент

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет» (г. Самара)

Защита диссертации состоится «18» июня 2026 года в 16:00 на заседании диссертационного совета 24.2.428.03 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте <https://rusoil.net/>.

Автореферат диссертации разослан «____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ташбулатов Радмир Расулевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В современных условиях строительства скважин требуется разработка и применение наиболее эффективных и экономически выгодных решений для добычи нефти и природного газа. Буровые компании нуждаются в сокращении издержек и повышении качества строительства скважин, особенно наклонно-направленных и с горизонтальным окончанием. Горизонтальное бурение скважины осуществляется в основном в продуктивном горизонте по запроектированной траектории, призванной обеспечить максимальную длину по продуктивному пласту и качество его вскрытия. Точность выполнения запроектированной траектории оказывает большое влияние, как на продолжительность освоения скважины, так и на ее последующую продуктивность. Точность бурения горизонтального участка скважины достигается путем исключения отклонения ее траектории за пределы продуктивного пласта во время бурения за счет подбора изгибной жесткости немагнитной утяжеленной трубы (НУБТ), осевой нагрузки на долото, отклоняющего усилия на лопатках роторной управляемой системы (РУС) и длины активного участка компоновки низа бурильной колонны (КНБК). Под термином "длина активного участка КНБК" следует понимать интервал КНБК с определенной поперечной жесткостью ее элементов от долота до первой точки касания НУБТ стенки скважины под воздействием осевой нагрузки на долото, что согласуется с исследованиями Б.З. Султанова, М.Р. Мавлютова, А.Г. Калинина и Р.Х. Санникова. Эта задача частично решается применением РУС в сопровождении немагнитных утяжеленных бурильных труб и забойных телеметрических систем. Перечисленные решения не в полной мере удовлетворяют требованиям по точности бурения ствола скважины по заданной траектории.

Для повышения точности бурения наклонно-направленных скважин и скважин с горизонтальным окончанием по проектной траектории необходима разработка новых типов программ, в том числе программ-тренажеров, для проектирования КНБК и сопровождения бурения.

Таким образом, совершенствование методологии подбора параметров

элементов КНБК для ориентированного бурения позволит повысить точность проводки скважины по заданной траектории, что является актуальной задачей при бурении горизонтальных скважин.

Степень разработанности темы

Исследование и разработку новых методов проектирования КНБК на основе отклоняющей силы на долоте проводят для точного и качественного выполнения проектного профиля скважины. Анализ известных исследований показал, что данные работы были выполнены для КНБК, в которой забойный двигатель помимо основного назначения выполнял функцию изменения профиля скважины. В настоящее время в практике бурения широко используются РУС, основной задачей которых является оперативное управление траекторией скважины. Вопросы подбора элементов КНБК совместно с РУС для контроля и управления траекторией горизонтальной скважины недостаточно изучены и не обеспечивают требуемой точности проводки скважины по проектной траектории. В связи с этим данная работа направлена на изучение особенностей управления траекторией скважин в продуктивном горизонте.

Работа выполнена при содействии Минобрнауки России в рамках соглашения № 075-15-2020-900 по программе развития Научного центра мирового уровня (НЦМУ) УГНТУ.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема работы и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 2.8.2. – «Технология бурения и освоения скважин»: «2. Конструкции скважин. Профиль и технология проводки вертикальных, наклонных, а также горизонтальных скважин, в том числе с разветвлёнными стволами. Геонавигация в процессе бурения», пункту» и «10. Моделирование, автоматизация и роботизация процессов бурения и освоения скважин, включая ремонтно-восстановительные работы, предупреждение и ликвидацию осложнений».

Цель работы

Разработка технико-технологических решений повышения точности проводки горизонтальных участков скважин по продуктивному горизонту в

соответствии с проектной траекторией.

Основные задачи исследования

1 Провести системный анализ технико-технологических факторов и горно-геологических условий, определяющих точность управления траекторией ствола горизонтальных скважин.

2 Выполнить аналитические исследования влияния вылета лопаток роторной управляемой системы, осевой нагрузки на долото на величину отклоняющей силы на долоте и лопатках РУС.

3 Разработать математическую модель процесса искривления траектории скважины с учётом работы роторной управляемой системы и предела текучести горной породы, позволяющую повысить точность управления искривлением ствола при бурении в продуктивном горизонте.

4 Разработать технико-технологические решения с реализацией в программном инструменте (виртуальный тренажёр) по повышению точности проводки скважин в продуктивном горизонте с минимизацией отклонения ствола от проектной траектории.

Научная новизна

1 Аналитически установлено, что при регулировании осевой нагрузки на долото в диапазоне от 58 до 137 кН за счет подбора изгибной жесткости немагнитных утяжеленных бурильных труб и регулирования вылета лопаток (push the bit) роторной управляемой системы соотношение отклоняющих сил на долоте и на роторной управляемой системе увеличивается в 4 раза в пропорции от 11,6/46,4 кН до 69,9/67,1 кН соответственно.

2 Разработана математическая модель процесса искривления ствола скважины при бурении с использованием роторной управляемой системы с учетом предела текучести горной породы, что позволило, например, повысить точность проводки ствола горизонтальной скважины от 81 до 92 % в пластах толщиной 1,0 м.

Теоретическая значимость

Теоретическая значимость работы заключается в результатах аналитических исследований математических моделей для вычислений

интенсивности искривления ствола скважины по данным о технических характеристиках КНБК с РУС, механических свойств горных пород и режимно-технологических параметров бурения, а также в экспериментальном обосновании метода расчета параметров активного участка низа бурильной колонны для РУС, позволяющего повысить точность вскрытия и проводки скважины по продуктивному пласту до 92 %.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы заключается в разработке программы-тренажера для подбора геометрических параметров КНБК с РУС, учитывающего характер изменения изгибающего момента вдоль активного участка ее компоновки применительно к улучшению управляемости инструментом и контроля соответствия положения ствола его проектной траектории. Программа внедрена автором и использовалась для проектирования компоновки низа бурильной колонны и контроля ствола при бурении 125 направленных скважин на месторождениях Западной Сибири. Виртуальная программа-тренажер прошла регистрацию программ для ЭВМ №2015618263, 2020613187 и внедрена в Автономной некоммерческой организации дополнительного профессионального образования «Октябрьский центр многопрофильного обучения», ООО «Интеллектуальные системы», Государственном бюджетном профессиональном образовательном учреждении «Пермский нефтяной колледж».

Разработаны и внедрены: П2-10 М-0005 ЮЛ-279 «Недопущение пересечения скважин», П2-10 РГБП-0004 ЮЛ-279-4 «Контроль за скважинными работами», П2-10-РГБП-0005-ЮЛ-279 «Оказание услуг по ННБ на объектах Заказчика», П2-10 ТИ-0014 ЮЛ-279-6 «Эксплуатация элементов КНБК», П2-10 ТИ-0019 ЮЛ-279-3 «По работе с ВЗД», П2-10 ТИ-0024 ЮЛ-279 «Технологические срезки», П2-10 ТИ-0025 ЮЛ-279 «Руководство по бурению».

Методология и методы исследования

Исследования и решения поставленных в работе задач основаны на опыте проводки скважин с горизонтальным окончанием, статистической обработке данных промысловых данных с использованием современных методик и приборов. Для расчета напряжений в бурильной колонне применено числовое

моделирование и лицензированное программное обеспечение. Для решения дифференциальных уравнений численными методами применен программный комплекс MathCad. Имитационное моделирование различных вариаций прогибов элементов КНБК и, как следствие, генерирование отклоняющей силы на долоте проводились на разработанном программе-тренажере «Слайд Мастер 1.18».

Положения, выносимые на защиту

1 Теоретическое обоснование проектирования КНБК с РУС и технология сопровождения проводки наклонно-направленных скважин, обеспечивающих повышение точности выполнения проектной траектории скважины.

2 Методология управления КНБК по данным забойной телеметрической системы работой РУС при корректировке траектории горизонтальной скважины при бурении в продуктивном горизонте.

3 Научно обоснованная методика подбора геометрических параметров КНБК с РУС, реализованная в программе-тренажере, позволяющей подбирать рациональную компоновку низа бурильной колонны с РУС для управления траекторией ствола скважины с учетом технико-технологических условий разбуривания месторождений Западной Сибири.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность научных результатов, полученных в работе, основана на применении широко апробированных методик проектирования КНБК с РУС, выполненных на компьютерных программных продуктах, прошедших государственную сертификацию, и на статистическом анализе представительного объема промысловых данных бурения наклонно-направленных скважин и скважин с горизонтальным окончанием, в т.ч. по продуктивному горизонту.

Основные положения и результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, докладывались и обсуждались на: Международном семинаре, посвященной памяти профессора Г.В. Рассохина (УГТУ, г. Ухта, 4-5 февраля 2016 г.); 71-ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (г. Уфа, 2020 г.); Международной отраслевой

научной конференции, посвящённой проблемам бурения и освоения нефтяных и газовых скважин, им. профессора Л.А. Алексеева (УГНТУ, г. Уфа, 28 ноября 2025 г.).

Публикации

Материалы диссертационной работы опубликованы в 13 научных трудах, в том числе в 2 монографиях, 4 статьях в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, в 1 статье в журналах, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science, в 3 работах в сборниках Международных и Всероссийских конференций. Получен 1 патент РФ и 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка использованной литературы, включающего 159 наименований. Работа изложена на 163 страницах машинописного текста, содержит 64 рисунков, 17 таблиц.

Благодарности

Автор выражает благодарность профессору, доктору технических наук, профессору кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин» Р.А. Исмакову, кандидату технических наук, профессору Л.М. Левинсону и кандидату технических наук, доценту Д.И. Чистову за консультации и помощь в подготовке работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и основные задачи, обозначены основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В **первой** главе проведен анализ существующих методик проектирования ориентируемых КНБК, которыми занимались многие ученые: Акбулатов Т.О., Балденко Д.Ф., Бугаев Х.И., Гулизаде М.П., Двойников М.В., Иоаннесян Р.А., Ишбаев Г.Г., Ишемгужин Е.И., Левинсон Л.М., Лягов А.В., Овчинников В.П.,

Оганов А.С., Оганов С.А., Повалихин А.С., Санников Р.Х., Сароян А.Е., Солодкий К.М., Султанов Б.З., Шатровский А.Г., Федоров А.Ф., Янтурин А.Ш. и многие другие.

Активные исследования в этой области ведутся и за рубежом учеными: Lubinsky A., Radzimovsky E.J., Millheim K., Callas N.P., Callas R.L., Walker B.H., Vuds G., Rapold K., Shower G.L., Sometron W.H., Willcox M.G и другие.

Анализ выполненных исследований показал, что:

1) затруднено применение кинематических моделей управления кривизной ствола скважины, описанных Калининым А.Г., Никитиным Б.А., Солодким К.М., Султановым Б.З. в связи со сложностью количественной оценки факторов, влияющих на искривление скважины;

2) впервые примененный Федоровым Л.Ф., Солодким К.М., Калининым А.Г., Повалихиным А.С. критерий, где отклоняющая сила на долоте и прогиб КНБК равны нулю, может соответствовать только КНБК со значительным расстоянием между долотом и первым опорно-центрирующим элементом (ОЦЭ);

3) устойчивость КНБК (А.С. Оганов, А.С. Повалихин) зависит от изменения следующих параметров: диаметра скважины, зенитного угла скважины, диаметра ОЦЭ и радиального люфта забойного двигателя.

С целью анализа причин отклонения траектории скважины от заданной было проведено исследование 872 скважин Западной Сибири при использовании в КНБК немагнитных утяжеленных труб различной изгибной жесткости, которые представлены в Таблице 1. Рассмотрены 6 вариантов НУБТ с учетом их технических характеристик в составе с РУС.

Таблица 1 – Параметры используемой изгибной жесткости НУБТ

Тип НУБТ	$\varnothing_{\text{долота}} = 220,7 \text{ мм}; \varnothing_{\text{РУС}} = 178 \text{ мм.}$					Диапазон изменения $\varnothing_{\text{стаб}}$, мм
	$\varnothing_{\text{нар}}$, мм	$\varnothing_{\text{корп}}$, мм	$\varnothing_{\text{внут}}$, мм	$L_{\text{НУБТ}}$, мм	$EI_{\text{НУБТ}}$, кН*м ²	
1	172	127	83	8300	3535	203, 210, 220
2	168	127	76	8300	3598	
3	165	127	60	8300	3623	
4	165	127	57	8300	4371	
5	184	140	105	8300	4508	
6	184	140	102	8300	4637	

Выявлены причины отклонения траектории скважины от заданной при применении КНБК с РУС.

Причинами отклонения ствола скважины от заданного «коридора» стали: низкая интенсивность кривизны (70 %) при управлении РУС, ошибка персонала (10 %), особенности горно-геологического расположения пласта (15 %), нарушение параметров бурения (5 %). В Таблице 2 представлена доля осложненных скважин в зависимости от толщины продуктивного пласта и типа НУБТ по отношению к общему количеству осложненных скважин.

Таблица 2 – Количество горизонтальных скважин, в которых наблюдался вылет ствола за пределы толщины продуктивного горизонта

Толщина продуктивного пласта, м	Количество скважин всего, шт	Скважины без отклонений от проектной траектории, %	Тип НУБТ, количество осложненных скважин, шт
0,25	225	68%	НУБТ №1, 4
			НУБТ №2, 9
			НУБТ №3, 8
			НУБТ №4, 15
			НУБТ №5, 18
			НУБТ №6, 18
0,50	170	67%	НУБТ №1, 6
			НУБТ №2, 7
			НУБТ №3, 7
			НУБТ №4, 10
			НУБТ №5, 13
			НУБТ №6, 13
1,00	182	68%	НУБТ №1, 3
			НУБТ №2, 11
			НУБТ №3, 10
			НУБТ №4, 13
			НУБТ №5, 10
			НУБТ №6, 12
1,50	161	89%	НУБТ №1, 0
			НУБТ №2, 3
			НУБТ №3, 1
			НУБТ №4, 3
			НУБТ №5, 6
			НУБТ №6, 5
2,00	134	94%	НУБТ №1, 0
			НУБТ №2, 0
			НУБТ №3, 0
			НУБТ №4, 1
			НУБТ №5, 3
			НУБТ №6, 5
Итого	872	75%	214

Исследование точности проводки траектории проводилось с целью установления влияния толщины продуктивного участка и изгибной жесткости НУБТ. Анализ показал, что точность проходки в горизонтальном участке скважины снижается не только по мере уменьшения толщины продуктивного пласта с 94 % до 68 %, но и при повышении изгибной жесткости используемого НУБТ.

Во второй главе решены дифференциальные уравнения упругой линии КНБК на каждом из участков скважин при зенитном угле скважины $\alpha \leq 90^\circ$ и $\alpha > 90^\circ$, определены технические параметры элементов КНБК и технологические условия для использования в решении дифференциальных уравнений, проведено сравнение величин усилия на долоте и усилия на лопатках РУС при различных значениях осевой нагрузки на долото.

Исследования выполнены для роторных управляемых систем, отклоняющий модуль которых представлен отклоняющими лопатками (push the bit). Для проведения расчетов и моделирования были приняты в качестве аргументов технические и технологические параметры, приведенные в Таблице 3.

Таблица 3 – Принятые для расчета технические и технологические параметры

Параметры	Значения параметров					
Осевая нагрузка на долото Р, кН	59 – 78		78 – 98	98 – 117	117 – 137	
Зенитный угол θ , град	30 – 60		60 – 89		90 – 93	
Диаметр лопаток РУС $\varnothing$, мм	203		210		220	
Изгибная жесткость НУБТ EI, кН*м ²	3535	3598	3623	4371	4508	4637

Расчетная модель КНБК включает: модуль выдвижных лопаток, гибкий патрубок, модуль телеметрии, размещенный в НУБТ (Рисунок 1). Параметры используемых в расчетах НУБТ представлены в Таблице 1.

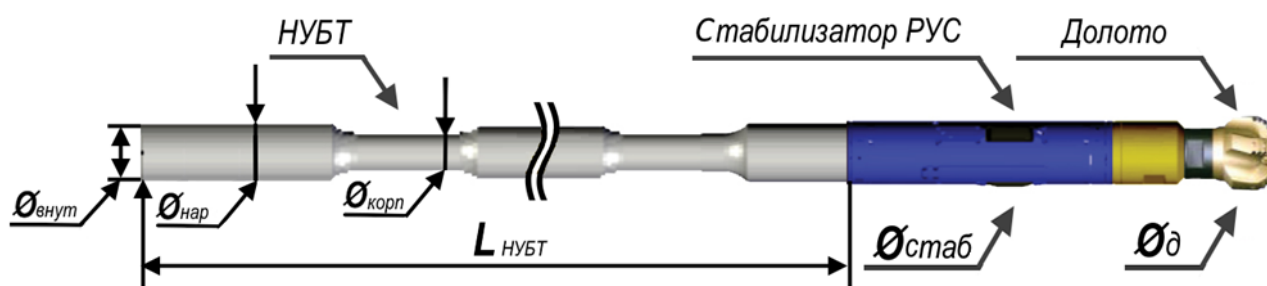


Рисунок 1 – Общий вид КНБК с РУС с применением НУБТ

В расчетной схеме КНБК с РУС в работе приняты следующие допущения:

- форма изгиба оси КНБК плоская;
- ось ствола скважины прямолинейная или является дугой окружности;
- КНБК нагружена продольными и поперечными силами;
- долото является шарнирной опорой,
- опора лопаток стабилизатора РУС точечная;
- каждая секция КНБК характеризуется жесткостью на изгиб, диаметром и весом единицы длины;
- веса элементов КНБК определены в жидкости плотностью равной 1000 кг/м³;
- зенитный угол скважины для расчетных моделей 1 и 2 составляет $\alpha \leq 90^\circ$ и $\alpha > 90^\circ$ соответственно.

На Рисунке 2 представлена расчетная схема, разработанная научной школой УГНТУ и смодернизированная автором с учетом использования в КНБК невращающегося стабилизатора РУС с отклоняющимися лопатками. Подбор технологических параметров процесса проводки скважины показал, что динамические составляющие рассмотренных усилий намного меньше своих соответствующих статических значений. Несмотря на то, что динамические составляющие оказывают влияние на мгновенные значения отклоняющей силы на долоте Q и поперечной реакции R_1 на лопатках стабилизатора РУС, в работе учитывались только статические составляющие сил P , Q , R_1 . Аналитические расчеты по определению деформации, вызванной крутящим моментом по методике авторов Султанова Б.З., Ишемгужина Е.И. показали, что КНБК с НУБТ из немагнитной стали марки RSNM140 (модуль упругости 200кПа) испытывает угловую деформацию в пределах $0,65^\circ$.

Установлено что возникаемый на участке КНБК крутящий момент создает угловую деформацию не более $0,4-0,65^\circ$ при частоте его вращения 60-100 об/мин и осевой нагрузке на долото в 58-137кН. Для практических расчетов столь малые величины угловой деформации значимого эффекта не оказывают, поэтому его решено не учитывать её и в настоящей работе.

Проведено численное решение дифференциальных уравнений упругой

линии КНБК с РУС и модулем телеметрии. Геометрические параметры каждого из элементов КНБК были получены из их технических паспортов, руководств по эксплуатации, схем КНБК, технических отчетов.

Построена модель с расчетной схемой для КНБК с РУС (Рисунок 2). Решались уравнения упругой линии КНБК с зенитным углом скважины $\alpha \leq 90^\circ$ и $\alpha > 90^\circ$. При $\alpha > 90^\circ$ лопатки РУС касаются верхней стенки ствола скважины.

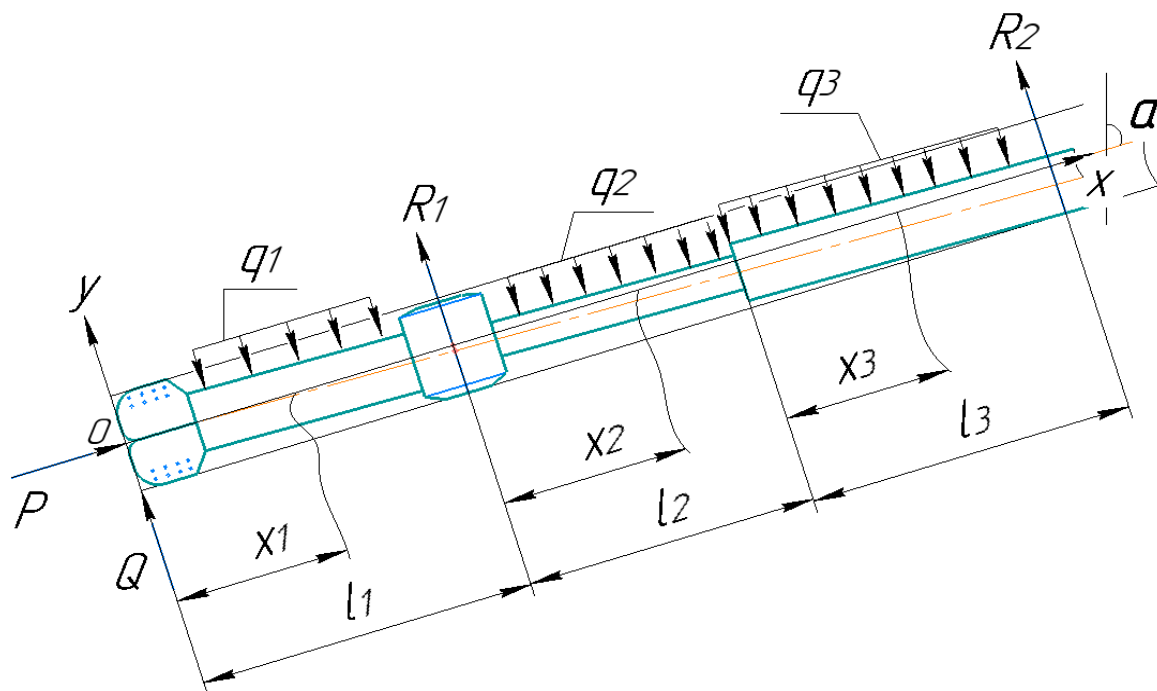


Рисунок 2 – Расчетная схема для решения дифференциального уравнения упругой линии КНБК

Дифференциальное уравнение упругой линии КНБК с зенитным углом скважины менее 90° :

$$E \cdot I_1 \cdot \frac{d^2 y_1}{dx_1^2} = -P \cdot y_1 + Q \cdot x_1 + \frac{q_1 \cdot x_1^2}{2}; \quad (1)$$

$$E \cdot I_2 \cdot \frac{d^2 y_2}{dx_2^2} = -P \cdot y_2 + Q \cdot (l_1 + x_2) - R_1 \cdot x_2 + \frac{q_2 \cdot x_2^2}{2} + \frac{q_1 \cdot l_1^2}{2} + q_1 \cdot l_1 \cdot x_1; \quad (2)$$

$$E \cdot I_3 \cdot \frac{d^2 y_3}{dx_3^2} = -P \cdot y_3 + Q \cdot (l_1 + l_2 + x_3) - R_1 \cdot (l_2 + x_3) + \frac{q_1 \cdot l_1^2}{2} + q_1 \cdot l_1 \cdot x_1 \times \\ \times l_2 + q_1 \cdot l_1 \cdot x_3 + \frac{q_2 \cdot l_2^2}{2} + q_2 \cdot l_2 \cdot x_3 + \frac{q_3 \cdot x_3^2}{2}. \quad (3)$$

Дифференциальное уравнение упругой линии КНБК с зенитным углом скважины более 90° :

$$E \cdot I_2 \cdot \frac{d^2 y_1}{dx_1^2} = P \cdot y_1 - Q \cdot x_1 + \frac{q_1 \cdot x_1^2}{2}; \quad (4)$$

$$E \cdot I_2 \cdot \frac{d^2 y_2}{dx_2^2} = P \cdot y_2 - Q \cdot (l_1 + x_2) + R_2 \cdot x_2 + \frac{q_2 \cdot x_2^2}{2} + \frac{q_1 \cdot l_1^2}{2} + q_1 \cdot l_1 \cdot x_2; \quad (5)$$

$$E \cdot I_3 \cdot \frac{d^2 y_3}{dx_3^2} = P \cdot y_3 - Q \cdot (l_1 + l_2 + x_3) + R_1 \cdot (l_2 + x_3) + \frac{q_1 \cdot l_1^2}{2} + q_1 \cdot l_1 \cdot l_2 + \\ + q_1 \cdot l_1 \cdot x_3 + \frac{q_2 \cdot l_2^2}{2} + q_2 \cdot l_2 \cdot x_3 + \frac{q_3 \cdot x_3^2}{2}. \quad (6)$$

Граничные условия для каждой секции КНБК имеют вид:

- при $x_1 = 0$ и $y_1 = 0$ $\frac{d^2 y_1}{dx_1^2} = 0$;
- при $x_1 = l_1$ и $x_2 = 0$ $y_1 = \Delta_1, y_2 = \Delta_1, \frac{dy_1}{dx_1} = \frac{dy_2}{dx_2}$;
- при $x_2 = l_2$ и $x_3 = 0$ $y_2 = y_3, \frac{dy_2}{dx_2} = \frac{dy_3}{dx_3}$;
- при $x_3 = l_3$ и $y_3 = \Delta_2$ $\frac{dy_3}{dx_3} = 0, \frac{d^2 y_3}{dx_3^2} = 0$.

В уравнениях (1)–(6) приняты следующие обозначения: $E \cdot I_1, E \cdot I_2, E \cdot I_3$ – жесткость на изгиб секций КНБК, кН*м²; P – осевая нагрузка на долоте, кН; Q – отклоняющая сила на долоте, кН; q_1, q_2, q_3 – вес 1 м секций КНБК с учетом текущего значения зенитного угла скважины, кН/м; $y_1, x_1, y_2, x_2, y_3, x_3$ – текущие координаты упругой линии на участках l_1, l_2, l_3 ; R_1, R_2 – реакции на опорах, кН.

Каждая из системы уравнений решается относительно неизвестных опорных реакций и длины активного участка КНБК.

С помощью описанных моделей в диссертационной работе определены отклоняющие силы на долоте, реакции на лопатках РУС в зависимости от вылета лопаток стабилизатора РУС и зенитного угла скважины.

Проведенные расчеты показали, что в горизонтальном участке скважины положение точки контакта НУБТ со стенкой скважины меняется в зависимости от вылета лопаток РУС в разной градации, но установлено, что диаметры рассматриваемых НУБТ влияния не оказывают. На Рисунке 3 показано влияние вылета лопаток РУС и прогиба от оси КНБК на ее длину активного участка.

Проведено сравнение величин усилия на долоте и усилия на лопатках РУС с различной осевой нагрузкой на долото при бурении участка скважины с зенитным углом равным 90°. Результаты расчетов показывают, что на

горизонтальном участке скважины при увеличении осевой нагрузки на долото от 58 до 137 кН отклоняющее усилие на лопатки РУС к осевой нагрузке на долото меняется с 46,4 до 69,9 кН, то есть с ростом осевой нагрузки на долото интенсивность кривизны ствола скважины увеличивается незначительно.

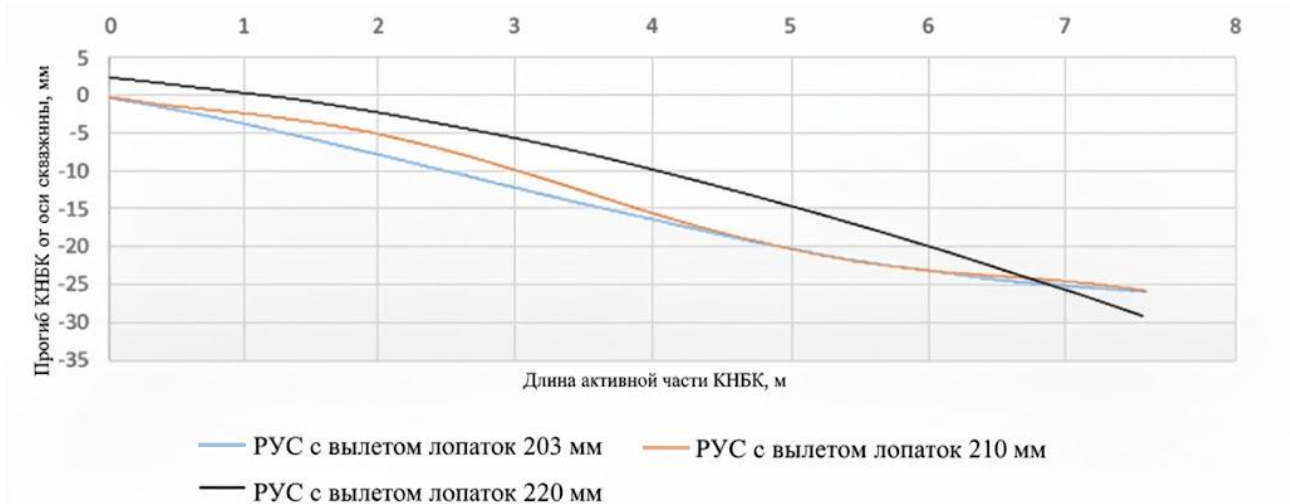


Рисунок 3 – Длины активного участка КНБК при нагрузке на долото 137 кН

С увеличением осевой нагрузки на долото от 58 до 137 кН на горизонтальном участке скважины осевая нагрузка меняется с 11,6 до 67,1 кН при изменении вылета лопатки РУС с 203 мм до 220 мм. Данные наблюдения позволяют сделать вывод о разном характере набора кривизны скважины на горизонтальном участке и участке с зенитным углом 90°.

Получены результаты расчетов, которые показывают, что при осевой нагрузке на долото 58 кН и вылета лопаток РУС 203 мм на участке скважины с зенитным углом 90° величина усилия на лопатках РУС составляет 46,4 кН, при этом отклоняющее усилие на долото равно 11,6 кН, соответственно, то есть отклоняющее усилие на лопатках РУС в 4 раза больше (Рисунок 4). Также анализ выполненных расчетов, результаты которых представлены на Рисунке 4 показывает, что при регулировании осевой нагрузки на долото в диапазоне от 58 до 137 кН за счет подбора изгибной жесткости немагнитных утяжеленных бурильных труб и регулирования вылета лопаток (push the bit) роторной управляемой системы соотношение отклоняющих сил на долоте и на роторной управляемой системе увеличивается в 4 раза в пропорции от 11,6/46,4 кН до 69,9/67,1 кН соответственно.



Рисунок 4 – Характер распределения осевой нагрузки на долото на участке ствола скважины с зенитным углом равным 90°

Используя РУС важно планировать параметры бурения на длинные участки ствола скважины, которые могут составлять более 4 тыс. м., в том числе для скважин с двухколонной конструкцией. Анализ зависимости отклоняющей силы на долоте от вылета лопаток РУС по полученной модели показал (Рисунок 5), что при бурении горизонтального участка скважины размер НУБТ и вылет лопаток РУС не оказывает значимого эффекта на изменение отклоняющей силы на долоте при осевом усилии на долото до 58 кН.

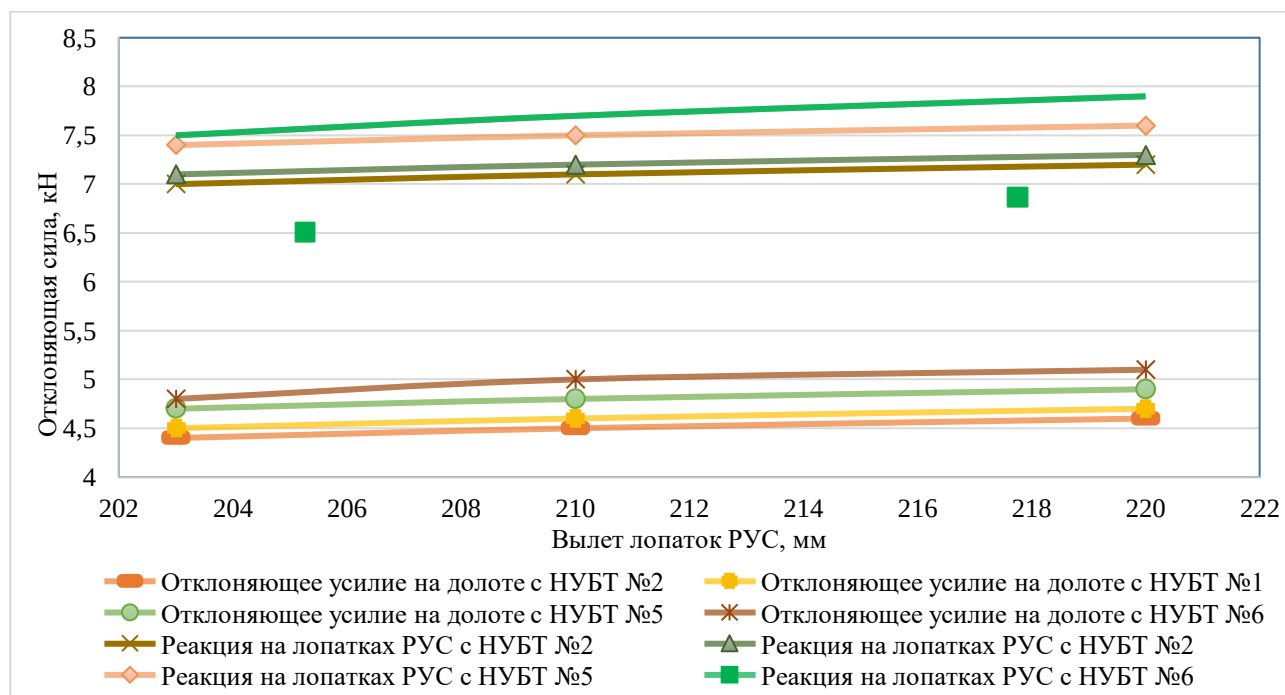


Рисунок 5 – Расчетные зависимости усилия прижатия лопаток РУС к стенке ствола скважины и отклоняющей силы на долоте от вылета лопатки РУС (зенитный угол участка скважины 90° , осевая нагрузка на долото 137 кН)

Увеличение осевой нагрузки на долото до 78 кН, то есть на 25 % ведет к росту отклоняющей силы на долоте на 13 % с НУБТ №1 и №3, 12 % с НУБТ №2 и лишь 9,7 % с НУБТ №4 для РУС с вылетом лопаток 220 мм. Равномерная градация отклоняющей силы на долоте наблюдается при любом вылете лопаток РУС и также наблюдается влияние конструкции НУБТ.

Подбор изгибной жесткости НУБТ для КНБК с РУС согласно методике автора позволяет сократить непроизводительное время на подъем и смену НУБТ и уменьшить риск отклонения ствола скважины от плановой траектории из-за низкой интенсивности кривизны. Методика автора внедрена в нормативных документах ООО «Интеллектуальные системы»: П2-10 М-0005 ЮЛ-279, П2-10 РГБП-0004 ЮЛ-279-4, П2-10-РГБП-0005-ЮЛ-279, П2-10 ТИ-0014 ЮЛ-279-6, П2-10 ТИ-0019, ЮЛ-279-3, П2-10 ТИ-0024 ЮЛ-279, П2-10 ТИ-0025 ЮЛ-279.

В **третьей** главе изложены результаты разработки технико-технологических решений по повышению точности вскрытия и проводки скважины по продуктивному пласту с минимизацией отклонения от проектной траектории.

Выполнен анализ интенсивности искривления ствола скважины при различных величинах её зенитного угла и применении обозначенных НУБТ и вылета выдвижных лопаток РУС, что позволяет проектировать КНБК и рассчитать оптимальную осевую нагрузку на долото (Рисунок 6).

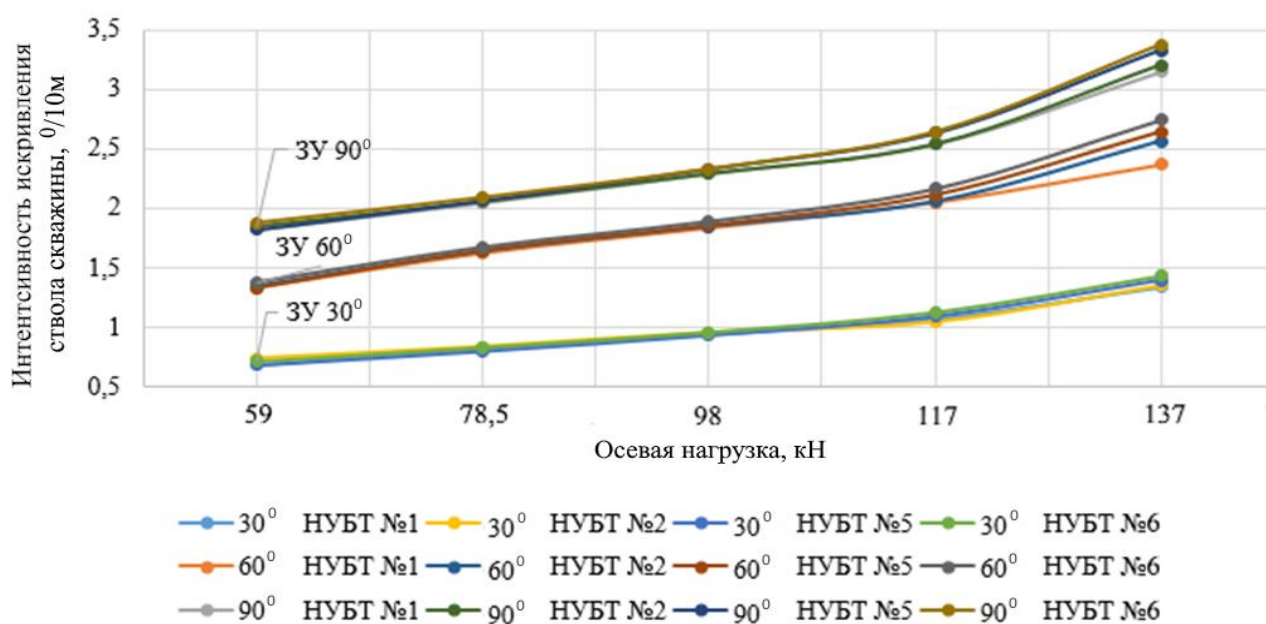


Рисунок 6 – Расчетные интенсивности искривления ствола скважины на различных его участках при вариации нагрузки на долото и поперечной жесткости НУБТ

Из Рисунка 6 видно, что с увеличением осевой нагрузки на долото увеличивается интенсивность искривления ствола скважины, укорачивается длина бурильных труб и сильнее отклоняется ось КНБК от оси скважины.

Для применения на практике полученных результатов проведенных вычислительных исследований поставлена задача математического моделирования процесса искривления ствола скважины. Для этого в качестве ближайшего аналога принята модель профессора Грозненского нефтяного института Федорова В.С. Усовершенствование данной модели позволило провести комбинированный расчет интенсивности кривизны скважины $\Delta\theta_k$, что в свою очередь дало возможность построить алгоритм расчета на базе прикладного программного обеспечения. Модель учитывает влияние на величину $\Delta\theta_k$ (1/м) осевой силы на долото P в диапазоне от 58 до 137 кН, диаметра долота D типа PDC (220,7 мм) с учетом его фрезерующей способности, зенитного угла участка скважины θ от 60 до 93°, изгибной жесткости КНБК (3535 – 4637 кН*м²) и предела текучести горных пород по Штампу. Учитывание среднего и максимального предела текучести горных пород по Штампу позволило нам разработать математическую модель расчета интенсивности искривления ствола скважины при роторном бурении с учетом предела текучести горных пород.

$$\Delta\theta_k = \frac{P \cdot D \cdot \cos\theta}{EI} * \left(\frac{p_{шт.ср}}{p_{шт.м}} \right) \quad (7)$$

где, $p_{шт.ср}$ - средний предел текучести горной породы по Штампу; $p_{шт.м}$ - максимальный предел текучести горной породы по Штампу для месторождения.

С целью проведения сравнительного анализа усовершенствованной математической модели автора проведены численные решения известных формул для расчета интенсивности искривления ствола скважины. Используются наиболее подходящие к решению задачи диссертации методики, к которым отнесены работы Акбулатова Т.О. и др. с учетом радиального смещения долота; Григоряна Н.А. с приращением искривления ствола скважины при бурении эксцентричным ниппелем с забойным двигателем (ЗД) и НУБТ; Повалихина А.С. и др. для расчета минимального значения радиуса кривизны ствола скважины при использовании ЗД с одним и двумя центраторами; Федорова В.С. и др. с учетом осевой нагрузки на долото и, для наглядного сравнения теоретических результатов вычисления искривления ствола скважины с фактическим, приведена интенсивность искривления ствола скважины во время бурения 125 скважин. По результатам

анализа диаграммы на Рисунке 7 установлено, что точность расчета интенсивности искривления ствола скважины по отношению к реальной скважине по формулам, предложенным Повалихиным А.С. и др. составила 60 %, Акбулатовым Т.О. и др. – 64 %, Федоровым В.С. – 80 %. Разработанная автором математическая модель процесса искривления ствола скважины позволила достичь его точности 94 %. На Рисунке 7 приведено сравнение полученных промысловых данных об интенсивности кривизны по различным используемым известным методикам.

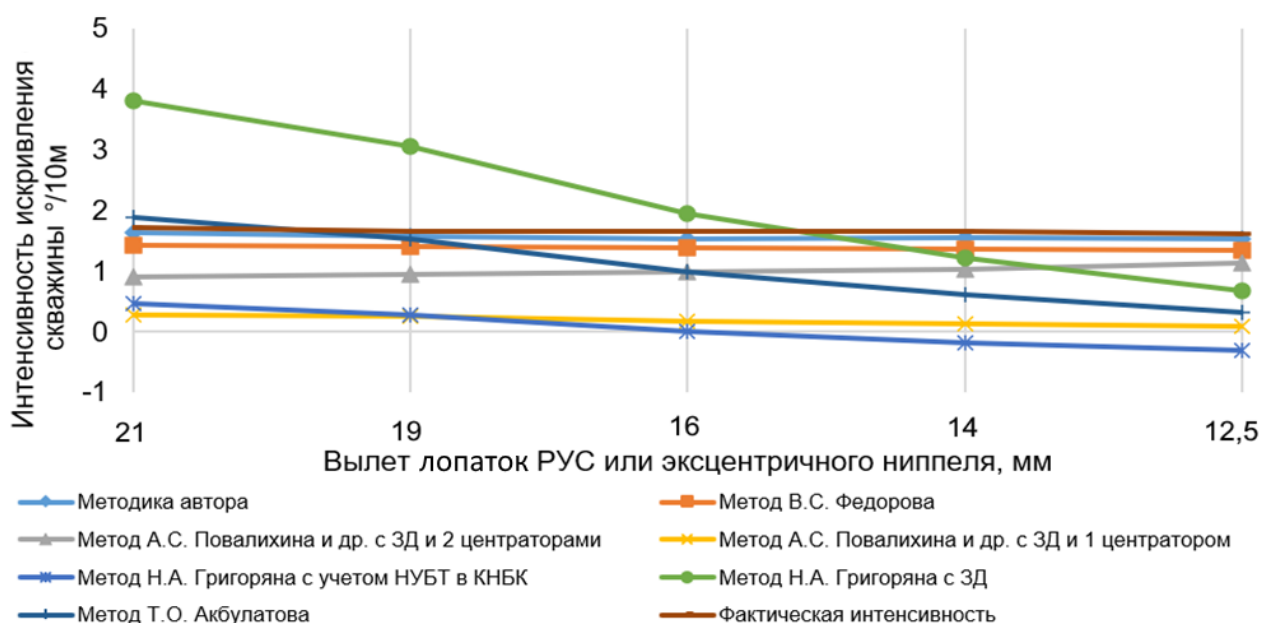


Рисунок 7 – Сравнение интенсивности искривления ствола скважины, рассчитанной по различным формулам

Разработанная математическая модель процесса искривления ствола скважины при бурении с использованием роторной управляемой системы легла в основу научно обоснованной методики подбора геометрических параметров КНБК с РУС, реализованной на базе созданной автором виртуальной программы тренажера, которая способна дать рекомендации по подбору НУБТ при использовании заранее подготовленной траектории скважины. Получаемые в режиме реального времени данные со скважинной телеметрии затем используются для подготовки рекомендаций об изменении вылета выдвижных лопаток РУС и осевой нагрузки на долото. Схематично работа прикладного программного обеспечения представлена на Рисунке 8. Для работы в программном обеспечении требуется внести в него плановую инклинометрию, координаты геологической

цели, изгибную жесткость НУБТ, установить локальную сеть с компьютером, который получает данные о осевой нагрузке на долото, зенитным углом скважины, глубине бурения от датчиков.

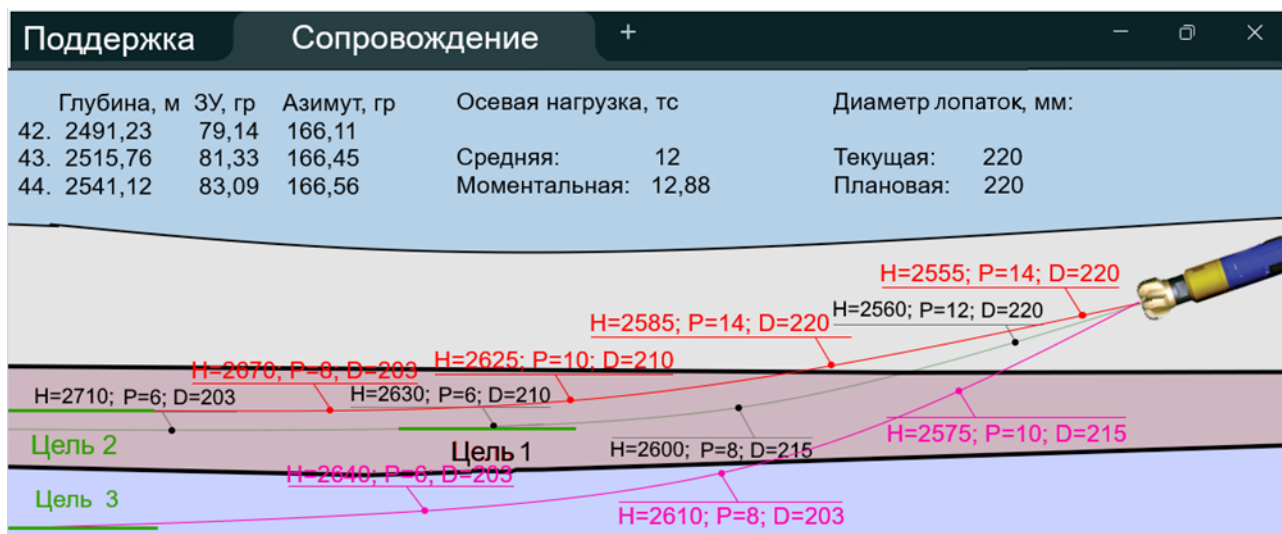


Рисунок 8 – Диалоговое окно интерфейса виртуальной программы-тренажера

Во время бурения программное обеспечение получает перечисленные параметры и выдает рекомендации о необходимости изменения вылета выдвижных лопаток РУС, осевой нагрузки на долото в зависимости от расположения геологической цели. Необходимо учитывать, что при бурении с использованием забойной телеметрической системы в продуктивном пласте, траектория ствола скважины корректируется в соответствии с получаемыми в процессе бурения данными каротажа (LWD) для вскрытия наиболее продуктивной части горизонта, которая может отличаться от проектной траектории.

Данные о промысловых значениях интенсивности искривления скважины получены от ЗТС при применении импортного РУС при бурении 125 скважин. Сравнение проведено для КНБК с РУС с различными НУБТ в интервале бурения горизонтального участка с зенитным углом 60-61° с нагрузкой на долото 59 - 137 кН. Сравнение показало, что достоверность расчета составляет в среднем 94,1 %. Технология использована в П2-10 М-0005 ЮЛ-279 «Недопущение пересечения скважин»; П2-10 РГБП-0004 ЮЛ-279-4 «Контроль за скважинными работами», П2-10-РГБП-0005-ЮЛ-279 «Оказание услуг по ННБ на объектах Заказчика», П2-10 ТИ-0014 ЮЛ-279-6 «Эксплуатация элементов КНБК»; П2-10 ТИ-0019 ЮЛ-279-3 «По работе с ВЗД»; П2-10 ТИ-0024 ЮЛ-279 «Технологические срезки»; П2-10 ТИ-0025 ЮЛ-279 «Руководство по бурению».

Программа-тренажер использована автором для моделирования типоразмера НУБТ для РУС в Западной Сибири при строительстве горизонтальных участков в 125 скважинах, пробуренных компанией с 2019 по 2023 гг. с использованием КНБК с РУС и с подбором НУБТ в ООО «Интеллектуальные системы».

Приведен расчет ожидаемого экономического эффекта от внедрения усовершенствованной технологии подбора НУБТ для бурения горизонтальных участков на базе программы-тренажера, который в целом составил до 42.000.000 рублей в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 В результате выполненного системного анализа установлено, что ключевое влияние на точность проводки горизонтальной скважины оказывают изгибная жёсткость элементов компоновки низа бурильной колонны, осевая нагрузка на долото и вылет лопаток роторной управляемой системы. На основе анализа промысловых данных 872 горизонтальных и наклонно-направленных скважин Западной Сибири установлено, что при одновременно высокой изгибной жёсткости НУБТ и осевой нагрузке на долото снижается точность проводки горизонтального участка до 68 %.

2 Установлено, что регулирование вылета отклоняющих лопаток РУС и осевой нагрузки на долото является эффективным инструментом управления интенсивностью искривления скважины. Так, при увеличении осевой нагрузки с 58 до 137 кН и лопаток РУС с 203 до 220 мм соотношение отклоняющих сил на долоте и на РУС возрастает более чем в четыре раза с 11,6/46,4 кН до 69,9/67,1 кН соответственно, что обеспечивает повышение, например, точности проводки ствола горизонтальной скважины от 81 до 92 % а пластах толщиной 1,0 м.

3 Разработана математическая модель процесса искривления ствола скважины при бурении с использованием роторных управляемых систем с учетом в расчетах предела текучести горной породы по Штампу. Модель учитывает взаимодействие бурильного инструмента с породой при различных величинах зенитного угла, осевой нагрузки на долото и изгибной жёсткости немагнитной утяжелённой бурильной трубы. Сравнение расчётной интенсивности искривления ствола скважины на основе разработанной математической модели и промысловых данных при бурении 125 горизонтальных скважин показало повышение точности его прогнозирования с 80 % до 94 %.

4 На основании спроектированной автором практической системы поддержки принятия решений разработана научно обоснованная методика подбора геометрических параметров КНБК с РУС, реализованная в виде виртуальной программы-тренажёра, позволяющей подбирать рациональную компоновку низа бурильной колонны с РУС для управления траекторией ствола скважины. Программный продукт обеспечивает моделирование и прогнозирование траектории ствола скважины в зависимости от вылета лопаток РУС, осевой нагрузки на долото и свойств разбуриваемых пород. В процессе бурения программа-тренажер в режиме реального времени анализирует поступающие с забойной телеметрии данные, формирует рекомендации по корректировке диаметра вылета лопаток РУС и осевой нагрузки на долото для поддержания проектной траектории. Внедрение разработанных решений в производственную практику позволило повысить точность проводки скважин по продуктивному пласту до 94,1 % и обеспечить экономический эффект до 42 млн рублей в год. Программа-тренажер зарегистрирована в Роспатенте (№ 2015618263, № 2020613187) и внедрена в образовательных и производственных организациях нефтегазового профиля.

По теме диссертационного исследования опубликованы 13 научных работ:

- статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ:

1 Мухаметгалиев, И.Д. Совершенствование методики прогнозирования искривления нефтяных скважин при бурении с использованием роторных управляемых систем / И.Д. Мухаметгалиев, А.Х. Аглиуллин // Нефтяная провинция. – 2024. – № 3. – С. 316-332.

2 Мухаметгалиев И.Д., Аналитические исследования взаимодействия компоновки низа бурильной колонны со стенками скважины с горизонтальным окончанием / И.Д. Мухаметгалиев, А.Х. Аглиуллин, Д.И. Чистов, А.Р. Яхин // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2023. – № 6. – С. 29-39.

3 Мухаметгалиев, И.Д. Разработка программы-тренажера по наклонно-направленному бурению / И.Д. Мухаметгалиев, Р.А. Исмаков, Р.М. Тимиров, А.Р. Нургалиев // Вестник Ассоциации Буровых подрядчиков. – 2020. – № 3. – С. 34–39.

4 Агзамов, З.В. Система поддержки принятия решений по формированию компоновки низа бурильной колонны для управления направленным бурением скважин / З.В. Агзамов, И.Д. Мухаметгалиев // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2019. – № 6. – С. 9-20.

- монографии:

5 Мухаметгалиев, И.Д. Технология бурения сложнопрофильных скважин / И. Д. Мухаметгалиев. – Москва ; Вологда: Издательство «Инфра-Инженерия» 2024. – 116 с.

6 Мухаметгалиев, И.Д. Развитие технологий и технических средств бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин / И. Д. Мухаметгалиев. – Москва ; Вологда: Издательство «Инфра-Инженерия» 2024. – 108 с.

- статьи в изданиях, индексируемых Scopus:

7 Мухаметгалиев, И.Д. Развитие моделирования параметров КНБК для наклонно-направленного бурения / И.Д. Мухаметгалиев, А.Х. Аглиуллин, Р.А. Исмаков, М.Е. Логинава, А.Р. Яхин // SOCAR Proceedings. – 2020. – № 4. – С. 15–23.

- патенты РФ:

8 Патент № RU 143548 Российская Федерация. Клиновой отклонитель для забуривания боковых стволов из скважины. Мухаметгалиев И.Д., Исмаков Р.А., Габсалихов А.Г. Заявка № 2014107115/03 от 25.02.2014, опублик. 27.07.2014.

- свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

9 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2020613187 Российская Федерация. Имитационное моделирование процесса строительства скважины : № 2020612371 : заявл. 04.03.2020 : опублик. 11.03.2020 / И.Д. Мухаметгалиев, А.Х. Аглиуллин, Р.А. Исмаков, Р.Д. Мухаметгалиев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

10 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2015618263 Российская Федерация. Слайд Мастер 1.18 : № 2015614740 : заявл. 04.06.2015 : опублик. 04.08.2015 / И.Д. Мухаметгалиев, Р.А. Исмаков, С.С. Чиглинцев ; заявитель И.Д. Мухаметгалиев.

- материалы различных научно-технических конференций и семинаров:

11 Мухаметгалиев, И.Д. Применение виртуальной программы-тренажера для ЭВМ «СЛАЙД МАСТЕР 1.18» для обучения практическим навыкам бурения нефтяных и газовых скважин / И.Д. Мухаметгалиев, С.С. Чиглинцев, Р.А. Исмаков // Международный семинар, посвященный памяти профессора Г.В. Рассохина : материалы международн. семинара УГТУ. / УГТУ. – Ухта, 2016. – С. 56 – 60.

12 Мухаметгалиев, И.Д. Математические модели механической скорости проходки для условий Западно-Сибирской нефтегазовой провинции / И.Д. Мухаметгалиев, А.Р. Нургалиев, И.А. Мустафин // Сб. науч. тр. 71-й науч.-тех. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. / УГНТУ. – Уфа, 2020. – С. 98.

13 Мухаметгалиев, И.Д. Сравнительный анализ методов расчета интенсивности искривления наклонно-направленных скважин/ И.Д. Мухаметгалиев, А.Х. Аглиуллин, // Международная отраслевая научной конференции имени профессора Л. А. Алексеева, посвященная проблемам бурения и освоения нефтяных и газовых скважин / УГНТУ. – Уфа, 2025. – С. 21-22.