

На правах рукописи



МУХАМЕТГАЛИЕВ ИЛЬМИР ДАМИРОВИЧ

**РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
БУРЕНИЯ НАКЛОННО-НАПРАВЛЕННЫХ
И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН**

5.6.6. История науки и техники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа 2022

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: **Беляева Альбина Сагитовна**
доктор технических наук, доцент,
акционерное общество
Научно-производственная фирма «Геофизика» /
заведующая отделом аспирантуры

Бакиров Данияр Лябипович
кандидат технических наук, доцент,
филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»
«КогалымНИПИнефть» в г. Тюмени /
заместитель директора по научной работе
в области строительства скважин

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Удмуртский государственный университет», г. Ижевск

Защита диссертации состоится «20» мая 2022 г. в 12³⁰ на заседании диссертационного совета 24.2.428.01 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 [http: // www.rusoil.net](http://www.rusoil.net).

Автореферат диссертации разослан « ____ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Удалова Елена Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Начало XXI века ознаменовалось усилением глобальной конкуренции на мировом нефтяном рынке между Россией и ведущими западными странами, следствием чего стала санкционная война этих держав против России. Стало понятно, что без создания новых и укрепления действующих отечественных производственных мощностей в топливно-энергетическом комплексе России на базе отечественных технологий будет невозможно выдержать эту конкуренцию. В 2013 г. об импортозамещении и независимости от импорта заговорили как о реальном средстве, способном вывести страну из стагнации и обеспечить экономический рост. Мероприятия, утвержденные Приказом Министерства промышленности и торговли РФ от 31.03.2015 №645, предполагали переход от импортного оборудования к отечественному внутри всего топливно-энергетического комплекса. Для индустрии наклонно-направленного бурения (ННБ) вопрос стал еще более актуальным, поскольку на тот момент привлекались десятки международных фирм, занимающихся не только производственным процессом, но и задействованных в смежных областях: снабжение программным обеспечением, обучение специалистов и т.д. Согласно Приказу Минпромторга России к 2020 г. максимальная доля потребления импортного оборудования в виде роторно-управляемых систем, приборов телеметрии и геофизического каротажа в процессе бурения должна была снизиться с 83 до 60 %, а доля программного обеспечения для моделирования процессов бурения нефтегазовых скважин – с 95 до 70 %. Однако несмотря на активный процесс разработки отечественных роторно-управляемых систем, приборов каротажа и программных продуктов показатели эффективности работы российских компаний в данном сегменте топливно-энергетического комплекса остаются недостаточно удовлетворительными. Дополнительным решением вопроса импортозамещения в области повышения эффективности техники и технологий в бурении нефтяных и газовых скважин является глубокий и всесторонний анализ этапов развития технических средств

и технологических способов для ННБ с целью их перепроектирования с учетом современного прогресса и мировых достижений в науке и технике.

В связи с этим, исторический анализ развития технических средств и технологий бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин (ННГС), позволивших осуществить бурение многозабойных, горизонтально-направленных скважин, в том числе с большим отходом от вертикали для увеличения дебита нефтегазовых скважин, является актуальной задачей и может способствовать дальнейшему интенсивному развитию технологии бурения скважин в России и в мире.

Степень разработанности выбранной темы

Практические и научные основы технологии бурения наклонно-направленных скважин заложены в 1850-х гг. горными инженерами в трудах: «Курсь горнаго искусства» и учебник по добыче каменной соли «Роспись, как зачать делать новую трубу на новом месте» в журнале «Известия императорского археологического общества».

Технологические приемы наклонно-направленного бурения изначально применяют для бурения вертикальных скважин, но с 1930-х гг. по мере развития технического прогресса совершенствуются и средства для наклонного бурения: разрабатываются новые виды устьевого и скважинного бурового оборудования для управления траекторией скважины. В течение последних 15 лет ведущими отечественными и зарубежными учеными изучены некоторые аспекты истории развития наклонно-направленного бурения. Однако заявленная в настоящей диссертации тема исследования зарождения и развития технологии и технических средств бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин до настоящего времени никем не исследовалась, поэтому результаты работы автора, которые легли в основу данной диссертации, являются новыми.

Цель диссертационной работы – на основании исторического анализа становления технологий и технических средств бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин исследовать этапы развития техники и технологии наклонно-направленного бурения и предложить методологию проектирования скважинного оборудования.

Основные задачи исследования

1 Выявить хронологические этапы развития технических решений в области бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин, начиная со времени первых упоминаний о бурении скважин для добычи нефти, и до наших дней с целью анализа их соответствия законам развития технологий.

2 Проанализировать эволюцию технологических методов наклонно-направленного бурения и их влияние на развитие науки и техники в этой области.

3 Исторически обосновать необходимость внедрения новых подходов к проектированию бурильной колонны.

4 Разработать новое компьютерное программное обеспечение для расчетов и проектирования современных бурильных колонн для наклонно-направленного бурения.

Методология и методы исследования

Перечисленные задачи решались путем анализа и обобщения исторических научных и промысловых данных, содержащихся в архивах, научной литературе и патентах российских и зарубежных ученых, а также проведения теоретических исследований с применением математических инструментов и вычислительных алгоритмов для анализа фактических и проектных данных по бурению, накопленной информации о результативности мероприятий.

Научная новизна

1 Представлены историко-техническая картина становления и развития способов бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин и анализ недостатков в цепи его эволюции.

2 Впервые обобщены и систематизированы исторические материалы об этапах развития техники и технологии наклонно-направленного бурения, направленных на увеличение объема добычи нефти.

3 На основе эмпирического метода исторического исследования проведен анализ развития методов расчета и моделирования бурильных колонн для бурения наклонно-направленных скважин.

4 На основании анализа истории разработки и развития математических моделей управления бурением скважин впервые предложен способ компьютерно-программного моделирования на базе расчета отклоняющих сил на долоте.

Теоретическая значимость работы

Результаты, полученные автором в ходе исследования, дополняют и развивают имеющиеся теоретические представления о развитии технологий и технических средств бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин и их применении в современной нефтегазовой индустрии

Практическая значимость работы

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при создании обобщающих историко-технических трудов, посвященных развитию технологий и технических средств бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин.

Материалы диссертационного исследования используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «УГНТУ» при подготовке бакалавров и магистров, обучающихся по направлению подготовки 131000 «Нефтегазовое дело» по дисциплине «Навигационные системы при бурении сложнопрофильных скважин», а также при подготовке научных работников в деле изучения исторических аспектов наклонно-направленного бурения.

Разработанная программа-тренажер применяется компанией ООО «ТНГ-Групп» для проверки компетенции персонала и имитационного моделирования при проектировании компоновки низа бурильной колонны для ориентированного бурения, что в совокупности позволило улучшить производственные показатели и сократить издержки компании.

Усовершенствован и обновлен курс повышения квалификации для инженеров по бурению наклонно-направленных и горизонтальных скважин в ФГБОУ ВО «УГНТУ», ССП УГНТУ «ИДПО», АНО ДПО «ОЦМО», ГБПОУ «ПНК».

Положения, выносимые на защиту

1 Систематизация исторических материалов о развитии наклонно-направленного бурения по трем фундаментальным направлениям с целью увеличения объема добычи нефти.

2 Историко-технический анализ развития техники и технологии наклонно-направленного бурения с установлением недостатков в цепи его эволюции.

3 Исторически обоснованный новый метод моделирования параметров бурильной колонны на базе разработанной автором компьютерной программы-тренажера, который способен выполнить имитационное моделирование процесса бурения скважины с учетом отклоняющей силы на долоте, и, тем самым, установить влияние жесткости скважинного оборудования на самоискривление скважины.

4 Обоснование практической значимости и перспектив использования полученных в диссертации результатов для их внедрения на производственных предприятиях, оказывающих технико-технологический сервис по бурению наклонно-направленных скважин в России и в мире, на новом технологическом уровне в условиях импортозамещения.

Степень достоверности и апробация результатов

Степень достоверности исторических сведений подтверждается ссылками на архивные и литературные источники. Достоверность технических результатов, полученных в работе, обоснована анализом промысловых данных бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин, а также применением широко апробированных и оригинальных методов и методик проектирования бурильных колонн, выполненных в компьютерных программных продуктах, прошедших государственную сертификацию.

Основные положения и результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, докладывались и обсуждались на II научно-технической конференции «Сервисные услуги в добыче нефти» (г. Уфа, 14 мая 2015 г.); Международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика А.Х. Мирзаджанзаде (г. Уфа, 16-18 ноября 2016 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений высоковязких нефтей и битумов» (г. Ухта, 2-3 ноября 2016 г.); Международной научно-практической конференции «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли» (г. Альметьевск, 28-29 октября 2016 г.); Всероссийском конкурсе НИОКР «УМНИК–НЕФТЕГАЗ-2019»; 71-ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (г. Уфа, 2020 г.); научно-техническом форуме ООО «СамараНИПИнефть» (г. Самара, 9-11 декабря 2020 г.).

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 21 научном труде, в том числе 5 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, 3 статьи в журналах, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science, 7 работ в материалах международных и всероссийских конференций, получено 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка использованной литературы, включающего 113 наименований. Работа изложена на 130 страницах машинописного текста, содержит 52 рисунка, 7 таблиц.

Благодарности

Автор выражает благодарность доктору технических наук, профессору Р.А. Исмакову и кандидату технических наук, профессору Л.М. Левинсону 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** исследовано появление технологий бурения на суше и в море, описаны этапы возникновения горизонтально-направленного бурения (ГНБ), приведен анализ этапов внедрения наклонного бурения в морской нефтедобыче, предпосылок развития кустового бурения с морских платформ. Бурением в 1846 г. нефтяной 21-метровой скважины ручным вращательным способом для разведки на Апшеронском полуострове в селении Биби-Эйбат Россия установила первенство в мире в строительстве скважин для промышленного применения. Нефтяная скважина для добычи нефти в России пробурена в 1864 г. глубиной 55 м механическим ударно-канатным методом на

Кубани на берегу реки Кудако под руководством полковника А.Н. Новосильцева. На американском континенте первая скважина глубиной 22 м пробурена в 1859 г. в районе г. Тайтесвилл, штат Пенсильвания. Спустя 11 лет после бурения первой нефтяной скважины в г. Баку в 1857 г. первая нефтяная скважина пробурена в Румынии к северо-востоку от г. Бухареста, на румынской стороне Карпат, в Канаде – в 1858 г. в Ойл-Спрингс в провинции Онтарио, в Венесуэлле – в 1863 г.

С начала XIX века Апшеронский полуостров стал полигоном для тестирования и испытания различных технических изобретений в нефтяной промышленности, в 1906 г. в районе Биби-Эйбатской бухты началась разработка шельфа Каспийского моря, морских нефтяных горизонтов, где, согласно идее инженера П.Н. Потоцкого, предусматривалось сооружение наклонных скважин под дно Каспийского моря.

В России первая скважина на море пробурена в 1925 г. в бухте Ильича (сейчас – Баил Лиманы) на искусственно созданном островке, в США – в 1897 г. неподалеку от острова Сомерленд, штат Калифорния, в Тихом океане. Сильный толчок развитию морского бурения с плавучих платформ дало применение метода кустового бурения, который осуществлялся путем наклонно-направленного бурения. В 1934 г. Н.С. Тимофеевым на острове Артема в Каспийском море осуществлено кустовое бурение, при котором несколько скважин (более 20) бурились с общей площадки. Впоследствии этот метод стал широко применяться при бурении в условиях ограниченного пространства (среди болот, с морских буровых платформ и т.д.). Кустовое бурение снижает затраты на строительство оснований морских платформ, приэстакадных площадок и на прокладку трубопроводов. К примеру, на месторождении Нефтяные Камни объем кустового ННБ составляет более 90% в общем объеме бурения.

Существенному прогрессу способствовало развитие технологии горизонтального и многозабойного бурения. Исторический анализ развития морской нефтедобычи в мире, описанный учеными Э.М. Мовсумзаде, Б.Н. Мастобаевым и др. в научных изданиях серии «Морская нефть», содержит описание основных тенденций в развитии технологий и технических средств на всех временных этапах. В 1953 г. под руководством А.М. Григоряна пробурена

первая в мире многозабойная скважина 66/45 на Карташевском месторождении в Башкирии, при этом 10 пробуренных боковых стволов увеличили стоимость всех работ всего в 1,5 раза, а объем добычи составил в 17 раз больше, чем на других скважинах месторождения (Рисунок 1). Технология кустового бурения позволяет варьировать способы размещения устьев скважин при морском бурении. К примеру, при расположении двуствольных скважин на платформах с расстояниями между рядами 1,2–1,5 м интервал между скважинами составит 8 м (Рисунок 2).

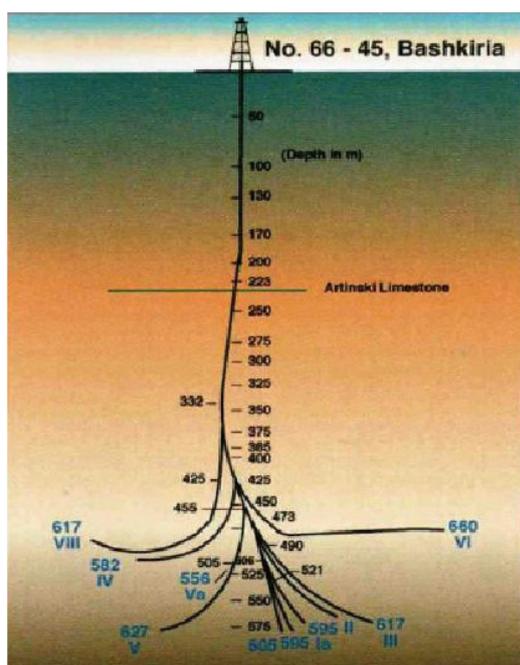


Рисунок 1 – Профиль многозабойной скважины 66/45 на Карташевском месторождении в Башкирии

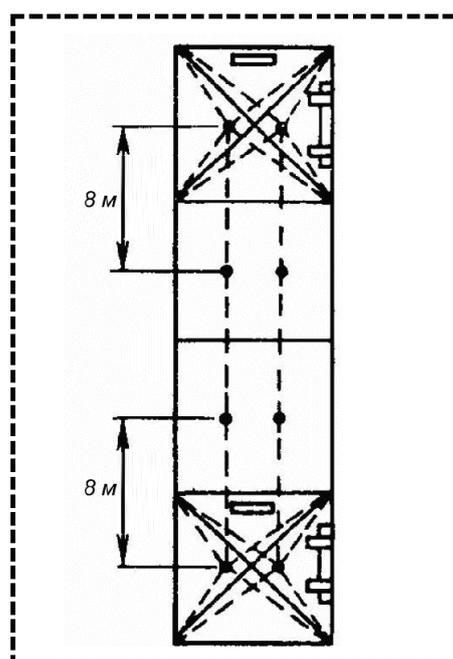


Рисунок 2 – Схема расположения двуствольных скважин на платформах при кустовом бурении

Технология ГНБ получила распространение в 1972 г. благодаря американскому инженеру М. Черрингтону. С конца 1970-х – начала 1980-х гг. применение ГНБ в США и Европе становится повсеместным. К 1992 г. около 90% речных переходов в США строятся с использованием метода ГНБ. В России методом ГНБ начали разрабатывать месторождения с 2010 г. для добычи малъта и природных битумов, история технологии добычи которых отражена в работе отечественных ученых: Д.Л. Бакирова, И.Ф. Чупрова, С.Г. Зубаирова, Г.П. Каюковой и т.д.

Во **второй главе** исследованы причины возникновения и развития ННГС. Первые исторические сведения о проявлении и изучении искривления скважин для добычи полезных ископаемых найдены в учебнике по разведке и добыче каменной соли «Роспись, как зачать делать новую трубу на новом месте» (1868 г.). Идея о целенаправленном искривлении при бурении скважин изначально зародилась в России в XIX в. В 1843 г. русский инженер А.И. Узатис в труде «Курсъ горнаго искусства» рассуждал о типах профилей. В 1894 г. горный инженер С.Г. Войслав недалеко от г. Брянск в условиях неблагоприятного рельефа пробурил наклонную скважину с применением ударно-штангового метода бурения, который пришел на замену ударно-канатному (Рисунок 3).

По данным горного инженера Г.С. Юзбашева и профессора Горного института А.К. Болдырева, реализацию мер по борьбе с самоискривлением скважин при бурении вращением американские буровые инженеры начали в 1872 г., а в России – в январе 1913 г. на скважине №14 Меднорудянского рудника на Урале с помощью стеклянного сосуда с плавиковой кислотой, использующего принцип горизонтальности уровня жидкости (Рисунок 4).

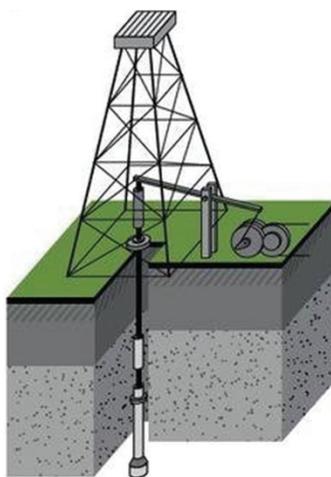


Рисунок 3 – Схема бурения ударно-штанговым способом

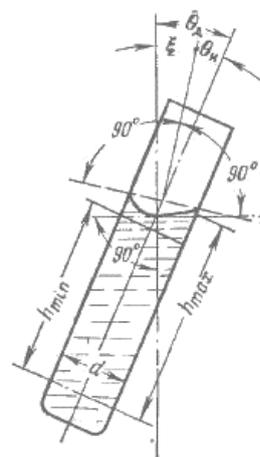


Рисунок 4 – Схема измерения зенитного угла скважины в 1870 г.

Клинья-отклонители (уипстоки) в качестве отклоняющего устройства бурильной колонны впервые начали применяться в американской нефтяной промышленности с 1897 г. для ликвидации естественного искривления.

Бурение вращательным способом в мировой практике было освоено на американском континенте в 1921 г. В России первая наклонная скважина пробурена в 1934 г. в северной части острова Артем (современное название острова Пираллахи), где в качестве отклоняющего устройства применялся уипсток. Первая в мире наклонно-направленная скважина с применением гидравлического забойного двигателя пробурена А.М. Григоряном в 1941 г.

В 1945–1946 гг. горные инженеры А.Н. Шаньгин и Х.И. Бугаев применяют жесткий кривой переводник в сочетании с утяжеленными бурильными трубами (УБТ). В те же годы применение «кривого переводника» позволило П.И. Галюте и А.С. Сквирскому разработать методику визированного спуска отклонителя с применением специального шаблона.

Результаты систематизации исторических материалов об этапах развития техники и технологии ННБ в России и мире представлены в Таблицах 1, 2.

Таблица 1 – Развитие технологических методов ННБ

Период	Метод бурения	Метод измерения	Метод искривления
1870–1900	Бурение наклонных скважин ударно-штанговым методом.	Применение прибора Моаса (плавиковой кислоты).	Клиновые отклонители для ликвидации искривления.
1901–1935	Разработан метод бурения односекционным турбобуром.	Электромагнитный скважинный инклинометр для измерения.	Клиновые отклонители для искривления траектории скважин.
1936–1950	Бурение горизонтальных скважин.	Визированный спуск бурового оборудования с отклонителем.	Бурение наклонных скважин турбинным способом с кривым переводником.
1951–1970	Развитие технологии многозабойного бурения.	Ориентирование отклоняющего устройства бурильной колонны с помощью кабеля.	Многозаходные винтовые двигатели с отклоняющим устройством.
1971–1990	Применяются маятниковые бурильные колонны для наклонного бурения.	Скважинная телеметрия на основе гидравлического канала связи.	Применяют отклоняющую силу бурильной колонны.
1991–2010	Внедрение верхних силовых приводов для интенсивного вращения бурильной колонны.	Применяют скважинные бескабельные телеметрические системы.	Создана технология бурения наклонных скважин с роторно-управляемыми системами (РУС).
2011–2020	Моторизованная управляемая система, соединяющая в себе забойный двигатель и телесистему.	Производится каротаж во время бурения для выявления и оценки нефти и газа.	Гидравлические забойные двигатели с регулируемым углом кривого переводника.

Таблица 2 – Развитие методов повышения эффективности ННБ

Период	Методы повышения эффективности технологии ННБ			
	снижение времени бурения скважин	уменьшение аварийности	удешевление бурения	рост добычи нефти и газа
1870–1900	Клиновые отклонители применяли для недопущения удлинения скважин.	Сохранение вертикальности траектории.	–	–
1901–1935	Механизированное оборудование позволило увеличить скорость бурения.	Повышается оперативность и точность измерения пространственного положения скважины.	Развивается кустовое бурение, упрощается монтаж буровых.	Растут объемы добычи нефти за счет увеличения объемов бурения.
1936–1950	Модернизируются турбобуры, наращивают скорость промывки раствора.	Растет количество добываемых скважин в соотношении с сухими.	–	Более точное ориентирование бурильной колонны, достижение геологических целей.
1951–1970	Совершенствуются конструкции турбобуров и винтовых двигателей.	В производстве применяется более надежное забойное оборудование.	–	Увеличивается объем добычи нефти из расчета на единицу скважины.
1971–1990	Маятниковые бурильные колонны позволили сократить время на его ориентирование.	Изучение процессов бурения геофизическими приборами.	Оптимизация за счет развитых геофизических исследований.	Снижение времени бурения привело к увеличению объемов бурения скважин.
1991–2010	Совершенствуется технология бурения, применяют автоматизированную буровую технику.	Применяют программные обеспечения при проектировании и моделировании технологии ННБ с целью его улучшения, создаются предиктивные технологии на базе прогностических моделей.		Формируются центры геологического и геонавигационного сопровождения бурения скважин.
2011–2020	Высокопрочная буровая техника позволяет достигать рекордные темпы бурения скважин.	Системы постоянного мониторинга бурения, внедряются алгоритмы оповещения.	Оптимизируются затраты на ННБ путем внедрения отечественных технологий.	Увеличивается длина бурения в нефтеносном пласте за счет системы тяжелого каротажа.

Анализ показал, что на заре развития ННБ горные инженеры ставили задачу снижения времени бурения и рисков возникновения аварий. С начала XX века приоритетной задачей развития технологии ННБ является увеличение добычи полезных ископаемых, при этом задача снижения затрат на строительство ННГС решалась частично.

В 1965 г. Г.М. Малюга, Г.М. Ромм и Г.Н. Строчкий внедрили в производство забойный инклинометр ЗИ-1. К 1978 г. в США создана серийная модель телеметрической системы с гидравлическим каналом передачи данных. В СССР в 1980 г. внедрена в производство телеметрическая система ЗИС-1 с электромагнитным каналом связи. С 1991 г. модернизированные забойные телесистемы с беспроводным электромагнитным каналом связи типа ЗИС-4 используются для проводки горизонтальных скважин.

В начале XXI века в ННБ внедряются новые технологии и происходит технический скачок, что приводит:

- к запуску центров мониторинга и оперативной техподдержки;
- к интеграции программ для контроля траектории, анализа рисков;
- к формированию учебных центров для специалистов узкого профиля;
- к совершенствованию комплексов геофизического каротажа;
- к возникновению модернизированных (наддолотный модуль, колонный ретранслятор) и концептуально новых типов скважинного оборудования (роторно-управляемые системы, моторизированные управляемые системы) для ориентированного бурения.

Анализ становления и развития способов бурения (Рисунок 5) показал очевидные недостатки в цепи эволюции технологии и оборудования для бурения ННГС. К началу 1980-х гг. заметно увеличилось количество научных институтов нефтегазового профиля, проведено достаточно исследований скважинных процессов учеными, подготовлено множество теоретических научных работ по развитию математических моделей, описывающих процессы бурения ННС. Однако доля реализованных в производстве бурения ННС теоретических научных трудов крайне мала. Данный анализ показывает, что необходимым условием для дальнейшего успешного развития способов бурения ННГС является тесный контакт производителей с научными школами, способными исследовать технологические процессы в скважине методами математических расчетов, бесспорными преимуществами которых являются как дешевизна проведения исследований, так и множество их вариантов, выполняемых достаточно высокими темпами. Это позволит инженерам-буровикам быстрее выявлять возможные нарушения технологии ННБ и устранять их до применения в реальных скважинных условиях.

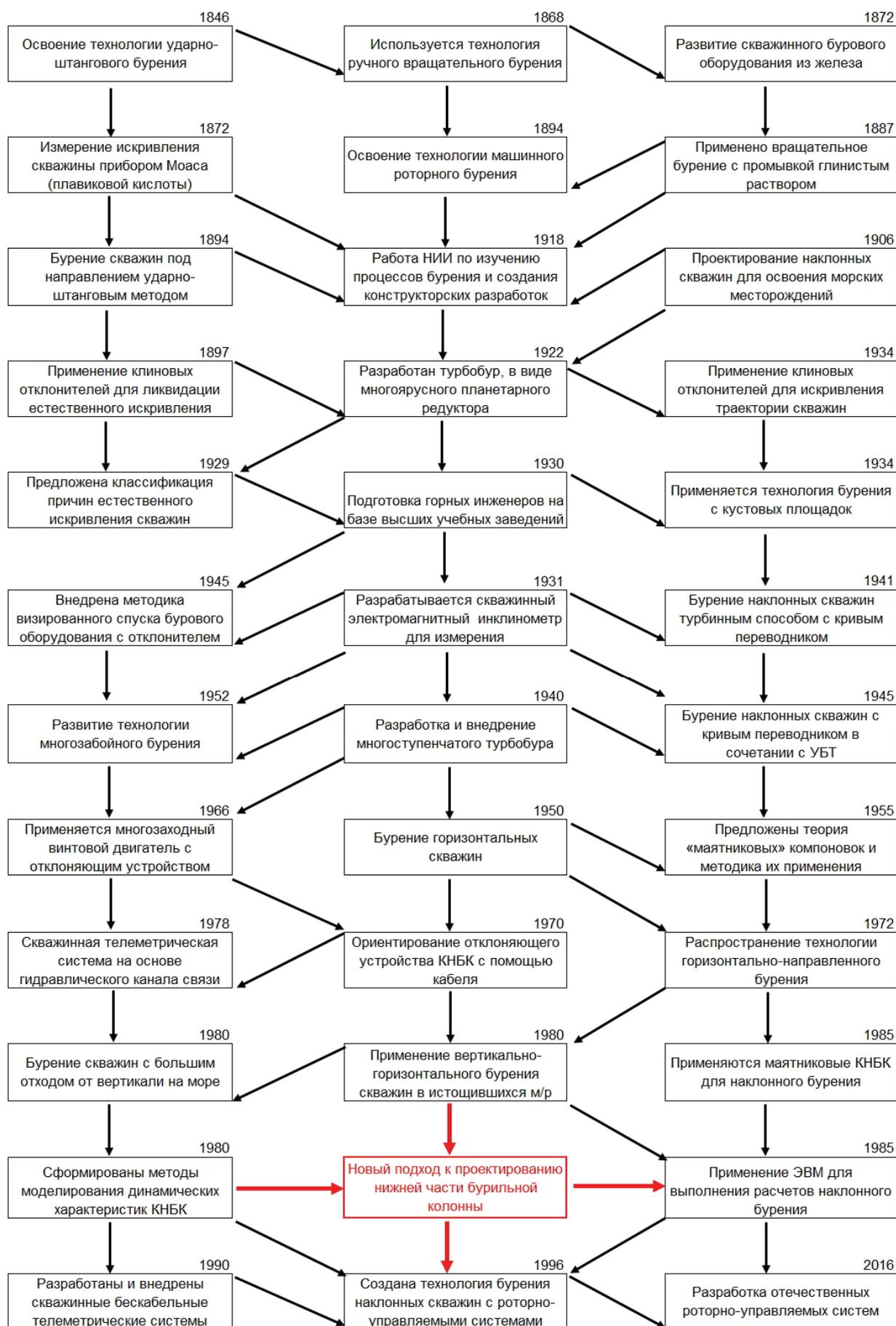


Рисунок 5 – Становление и развитие способов бурения ННГС

В третьей главе приведен анализ этапов механизации забойного оборудования, описаны морские платформы и мировые достижения в бурении скважин с БОВ (Рисунок 6).

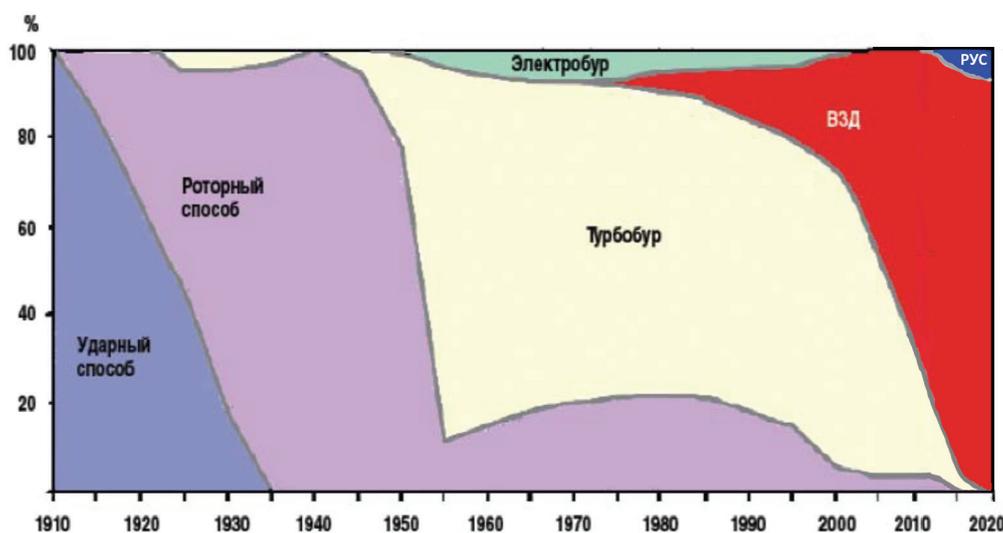


Рисунок 6 – Развитие способов бурения в мировой практике

Технология ННБ нефтяных и газовых скважин применяется не только на суше, но и при освоении морских месторождений. Так, с 1891 г. в США начали продавать морские участки, на дне которых были обнаружены запасы углеводородного сырья. Приблизительно в эти годы на побережье Калифорнии началось бурение наклонных скважин, которые достигали нефтяных залежей на расстоянии 200 м от берега. Там же в 1930 г. пробурена первая наклонная скважина с берега под морское дно.

В начале 1980-х гг. горизонтальное смещение морских скважин составляло не более 1500 м. Развитие технологий и технических средств наклонно-направленного бурения позволило в январе 1993 г. на платформе «Statfjord C» Северного моря Норвегии на скважине «С2» установить рекорд по горизонтальному смещению в 7 853 м при общей глубине скважины 9 327 м.

В Таблице 3 представлена краткая информация о скважинах с наибольшими горизонтальными отклонениями, пробуренных с шельфа и моря.

Существенный прорыв в бурении скважин с БОВ произошел после разработки интеллектуальных роторных забойных телеметрических систем в 1996 г. компанией «Бейкер Хьюз».

Таблица 3 – Современные достижения в бурении скважины с БОВ

Горизонтальное отклонение забоя, м	Общая длина ствола, м	Страна, район	Дата
14 129	15 000	Россия, Сахалин	Октябрь 2017 г.
12 033	13 500	Россия, Сахалин	Апрель 2015 г.
11 475	12 345	Россия, Сахалин	Январь 2011 г.
10 902	12 289	Катар, Персидский залив	Май 2008 г.
10 728	11 278	Англия, округ Дорсет	–

Роторная управляемая система (РУС) «AutoTrak» запрограммирована на автономную работу по контролю процесса бурения ствола скважины с использованием алгоритмов управления траекторией скважины. На Рисунке 7 представлена схема, описывающая развитие технологий направленного бурения, в том числе на шельфе и в море.



Рисунок 7 – Хронология развития технологий направленного бурения

В четвертой главе проводится исторический анализ методик моделирования параметров бурильной колонны для управления траекторией при бурении наклонных скважин, выполняется компьютерное моделирование для расчета отклоняющей силы и реакции долота методом начальных параметров.

В XX в. методика проектирования бурильных колонн для неориентируемого способа бурения впервые была предложена А.М. Григоряном в 1944 г. Советский ученый Р.А. Иоаннесян в 1953 г. применил дифференциальное уравнение упругой линии балки к расчету бурильной колонны с турбобуром.

Американские ученые Г. Вудс и А. Лубински в 1960 г. опубликовали работу «Искавление скважин при бурении». Они предложили наиболее

полную модель плоского изгиба бурильной колонны в наклонной скважине, что позволило вычислить критическую осевую нагрузку на долото, при которой происходит продольный изгиб бурильной колонны.

В 1974 г. школой академика М.П. Гулизаде предложена методика расчета компоновки «долото – секционный турбобур с центратором – утяжеленная бурильная труба» с учетом влияния УБТ и криволинейности ствола скважины. В 1979–1980 гг. американские ученые Н. Келас и К. Милхейм подошли к вопросу проектирования бурильных колонн с более практической стороны и решили проблему стабилизации зенитного угла путем применения в составе бурильной колонны одного центратора, которое действует по принципу рычага.

Современные достижения в области ННБ во многом стали возможными благодаря разработанным гидравлическим забойным двигателям. При планировании эксплуатации такого механизированного оборудования требовалось выполнение расчетов отклоняющей силы бурильной колонны. Такой расчет позволял выполнять прогноз искривления скважин при применении бурильных колонн для бурения неориентируемым способом.

С конца 1970-х и в 1980-е гг. советские инженеры решали задачу строительства наклонно-направленных скважин путем моделирования продольной жесткости турбобуров и УБТ, разработки новых методик визированного спуска бурильной колонны. В работах Л.Я. Сушона, П.В. Емельянова, Р.Т. Муллагалиева (1980-е гг.) утверждается, что чем меньше угол между осями долота и скважины, тем меньше влияние оказывает осевая нагрузка на напряженно-деформированное состояние бурильной колонны.

Результаты некоторых вышеописанных исследований нашли свою практическую реализацию в более поздний срок. Большинство все же остались на уровне гипотез на страницах опубликованных научных трудов. На Рисунке 5 приведена впервые разработанная автором историко-техническая схема, которая помогла установить недостаток в цепи развития технологии ННБ. Согласно этому анализу, в конце прошлого века наблюдается усложнение взаимодействия между учеными и производственниками. Приведем несколько примеров разрыва связи производства и науки в наклонно-направленном бурении. Предложенные учеными модели и методы расчета параметров бурильных колонн для

неориентируемого и ориентируемого бурения реализованы только спустя десятилетия, и то в виде прикладных программных продуктов. Так, например, расчеты, связанные с проектированием бурильных колонн, в число которых вошли методы на основе тригонометрических функций, с использованием уравнений трех моментов, конечных разностей и конечных элементов, начали выполняться относительно недавно. Метод начальных параметров, разработанный в первой половине XX в. для проектирования бурильных колонн, также не применяется современными инженерами-буровиками несмотря на то, что этот метод способен дать относительно точный прогноз степени искривления траектории скважины путем расчета отклоняющей силы и реакции долота.

Выбор автором расчета отклоняющей силы и реакции долота методом начальных параметров обусловлен тем, что данная методика позволяет задавать граничные условия на бурильной колонне, например известные величины прогибов балки в виде УБТ, равные радиальному зазору между бурильной колонной и стенкой скважины.

Анализ разработанных ранее математических моделей позволил воссоздать процесс ННБ путем моделирования отклоняющей силы и реакции долота на базе авторской компьютерной программы-тренажера и получить доступ к динамическим показателям процессов ННБ, проведенных в 1970–1980-х гг.

Компьютерная реконструкция позволяет достаточно подробно изучить технико-технологические условия бурения. В частности, компьютерное моделирование путем оперирования прогибами балки в скважине в виде УБТ или турбобура позволило провести анализ режимов и параметров бурения.

В компьютерную программу-тренажер вводятся: типоразмер забойного оборудования, последовательность установки элементов бурильной колонны и режимы его эксплуатации. Основными факторами, определяющими выбор параметров элементов бурильной колонны, стали: плановые интенсивности искривления траектории скважины, диаметр бурящейся секции и эмпирическая информация о плотности залегания горных пород, полученная при бурении соседних скважин куста и пр. Исходными данными моделирования стали: фактическая траектория скважины, напряжения внутри колонны бурильных труб, критические режимы эксплуатации устьевого оборудования и т.д.

По итогам моделирования получены данные о параметрах бурового оборудования, влияющих на самоискривление скважины: по долоту – тип, номинальный диаметр и количество лопастей; по калибратору со спиральными лопастями – номинальный диаметр, длина, их количество в составе бурильной колонны (1, 2 или 3) и размещение в бурильной колонне; по забойному двигателю – угол кривого переводника и его расстояние от долота, его номинальный диаметр, толщина стенки корпуса; по УБТ – длина и номинальный диаметр; по толстостенной бурильной трубе – длина и номинальный диаметр.

Инструментальная панель компьютерной программы-тренажера для формирования эскиза бурильной колонны представлена на Рисунке 8.

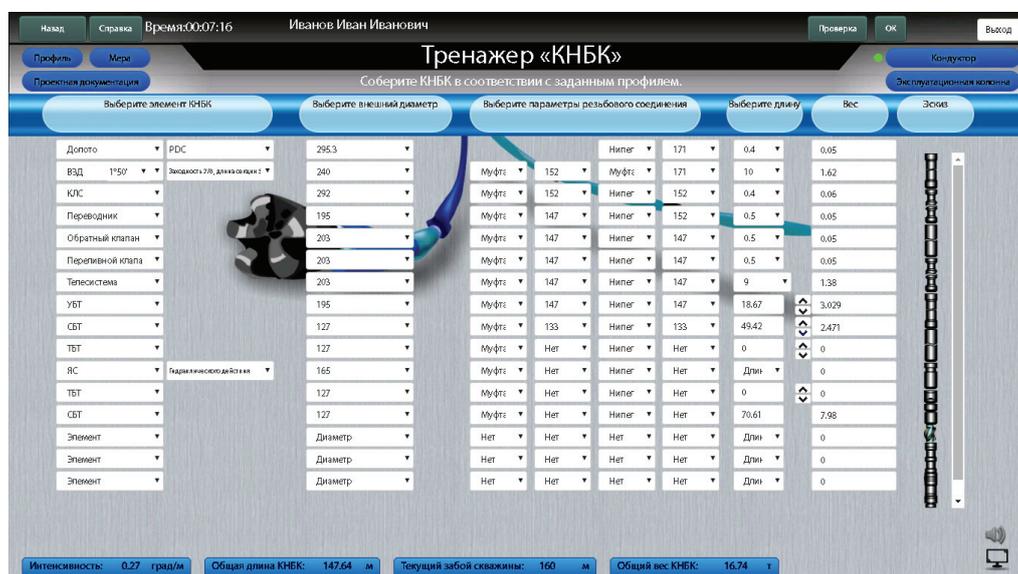


Рисунок 8 – Интерфейс компьютерной программы- тренажера

Последовательность операций при компьютерном моделировании:

- 1 формирование справочной базы параметров забойных двигателей;
- 2 ввод в программу-тренажер данных о типоразмерах забойного оборудования, последовательности установки в бурильную колонну, режиме эксплуатации;
- 3 имитация процесса ориентированного и вращательного режима бурения в интервале глубин от 810 до 2800 м;
- 4 на пяти произвольных глубинах (820, 1211, 1533, 2100, 2770 м) выполнение измерений следующих зависимостей:
 - длины направляющего участка от поперечной силы на турбобур;

- угла поворота оси долота относительно оси скважины от воздействия внешних сил на турбобур;
- зависимости отклоняющей силы на долоте от зенитного угла скважины.

5 анализ полученных данных.

Интерфейс компьютерной программы-тренажера в режиме формирования отчета показан на Рисунке 9.

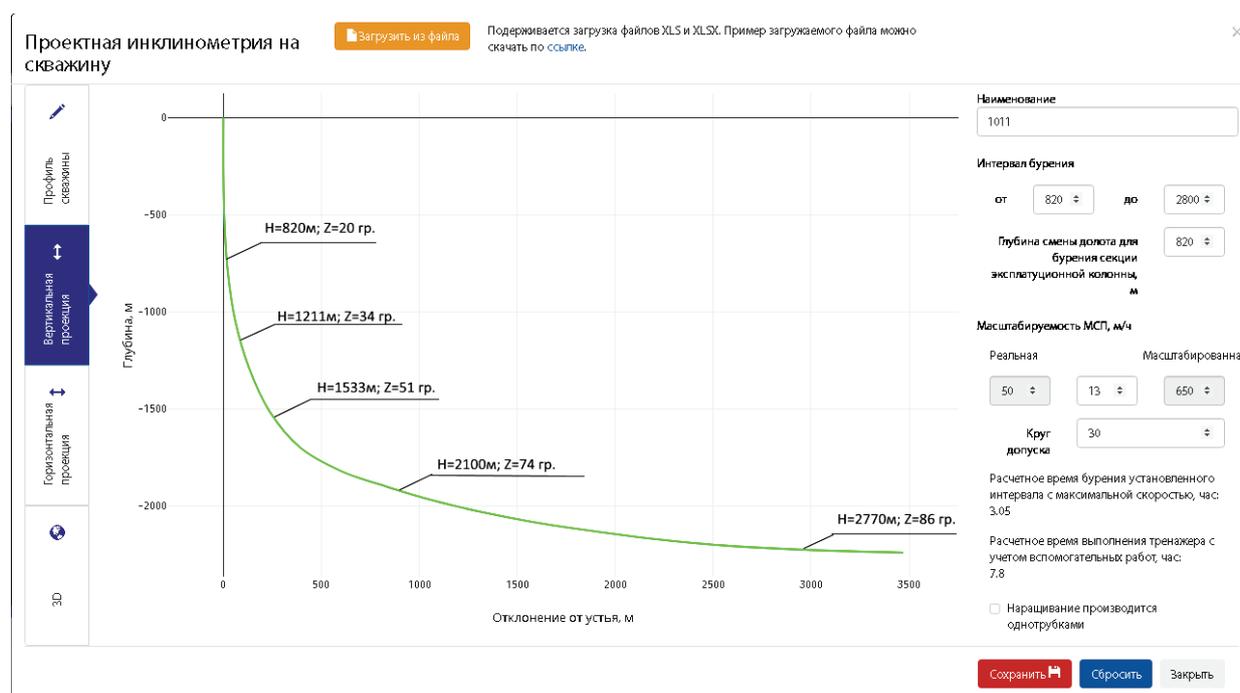


Рисунок 9 – Рапорт в графическом виде программы-тренажера

Результаты компьютерного моделирования (Таблица 4) показывают значения ряда параметров напряженного состояния бурильной колонны, а именно: отклоняющей силы на долоте R_d , угла поворота оси долота относительно оси скважины U_{gd} , длины направляющего участка L в зависимости от зенитного угла скважины. Определение этих параметров с помощью компьютерного моделирования позволяет прогнозировать изменение напряженного состояния в ту или иную сторону.

Моделирование на базе компьютерной программы-тренажера позволило воспроизвести имитационное моделирование процесса бурения скважины с учетом отклоняющей силы на долоте и, тем самым, установить влияние жесткости скважинного оборудования на самоискривление скважины.

Таблица 4 – Результаты моделирования на базе программы-тренажера

H , м	№ L	ΣY , град	Rd , кН	U_{gd} , рад	L , м	EI , кНм
820	$L1$	20	2,36	0,00432	10,16	9408
1211	$L2$	34	3,42	0,00489	8,99	
1533	$L3$	51	4,37	0,00530	8,28	
2100	$L4$	74	5,13	0,00559	7,85	
2770	$L5$	86	5,23	0,00563	7,79	

Таким образом, совершенствование методик проектирования бурильной колонны для бурения ННГС как одного из важных способов увеличения объемов добычи полезных ископаемых во всем мире не теряет своей актуальности, а предложенный способ проектирования бурильной колонны на основе метода начальных параметров возможно применять при планировании бурения ННГС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Исследование истории становления и развития способов бурения ННГС на основе разработанной историко-технической схемы и включающей события, начиная с времен первых упоминаний о бурении скважин для добычи нефти и до наших дней, показало несовершенство методик расчета и проектирования бурильных колонн.

2 Выполнена систематизация этапов развития техники и технологии по бурению ННГС, а также их влияния на повышение эффективности ННБ, позволившая установить, что глобальной целью развития технологии ННБ является увеличение добычи полезных ископаемых. При этом разработчики технологии ННБ локально стремились снизить время на бурение и уменьшить аварийность в производстве, однако решение задачи снижения затрат на строительство ННГС осуществлялось частично.

3 На основе эмпирического метода исторического исследования развития методик расчета параметров бурильной колонны получено, что среди разработанных в XX веке методов моделирования продольной жесткости гидравлических забойных двигателей и УБТ наиболее подходящим для расчета параметров бурильной колонны является метод начальных параметров.

4 На основании научного исследования зарождения и развития техники и технологии ННБ, исторического анализа технических проблем развития ННБ и в целях их решения разработана компьютерная программа-тренажер для моделирования имитации основных процессов бурения ННГС на основе метода начальных параметров. На разработанную программу-тренажер получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015618263.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих научных изданиях:

- 5 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК Министерства науки и высшего образования РФ:

1. 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.– 2021.– №1.– С.76–81.
2. Мухаметгалиев, И.Д. История и особенности развития техники и технологии наклонно-направленного бурения нефтегазовых скважин в XX веке / И.Д. Мухаметгалиев, А.Х. Аглиуллин, Р.А. Исмаков, Ч.Т. Мухаметгалиева // История науки и техники.– 2020.– №8.– С.39–50.
3. Мухаметгалиев, И.Д. Зарождение и развитие наклонно-направленного бурения скважин для добычи полезных ископаемых / И.Д. Мухаметгалиев, А.Х. Аглиуллин, Р.А. Исмаков, М. Х. Аль-Сухили // История науки и техники.– 2020. – №1. – С.53–59.
4. Мухаметгалиев, И.Д. Разработка человеко-машинного интерфейса тренажера наклонно-направленного бурения / И.Д. Мухаметгалиев, З.В. Агзамов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов.– 2020. – Вып.1 (123).– С.38–55.
5. Мухаметгалиев, И.Д. Анализ работы имитационных тренажерных комплексов для обучения практическим навыкам бурения / И.Д. Мухаметгалиев, Р.А. Исмаков, А.Р. Хафизов, С.Г. Гуменников, М.Р. Галлямов // Нефтегазовое дело.– 2016.– Т.14, №4.– С.9–13.

- 3 статьи в рецензируемом журнале, включенном в базу данных Scopus:

6. Попов, А. Н. Теоретические предпосылки к вопросу моделирования устойчивости стенок скважины и прогнозирования гидроразрыва / А.Н. Попов, Р.А. Исмаков, Ф.Н. Янгиров, А.Р. Яхин, Абусал Юсеф, И.Д. Мухаметгалиев, Г.Л. Гаймалетдинова // SOCAR Proceedings.– 2021.– №1.– С.41–49.
7. Попов, А. Н. Некоторые вопросы обеспечения устойчивости стенок наклонно-направленных скважин и предупреждения поглощений технологических жидкостей / А.Н. Попов, Р.А. Исмаков, А.Р. Яхин, И.Д. Мухаметгалиев // SOCAR Proceedings.– 2021.– №1.– С.60–67.
8. Мухаметгалиев, И. Д. Развитие моделирования параметров КНБК для наклонно-направленного бурения / И.Д. Мухаметгалиев, А.Х. Аглиуллин, Р.А. Исмаков, М.Е. Логинова, А.Р. Яхин // SOCAR Proceedings.– 2020.– №4.– С.013–021.

- 6 Свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020613186. Имитационное моделирование процесса проектирования компоновки низа буровой колонны / Мухаметгалиев И.Д., Аглиуллин А.Х., Исмаков Р.А., Мухаметгалиев Р.Д.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «УГНТУ».– 2020612369; заявл. 04.03.2020; опубл. 11.03.2020.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020613187. Имитационное моделирование процесса строительства скважины / Мухаметгалиев И.Д., Аглиуллин А.Х., Исмаков Р.А., Мухаметгалиев Р.Д.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «УГНТУ».– 2020612371; заявл. 04.03.2020; опубл. 11.03.2020.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017663673. Программа для работы с ликвидацией газонефтеводопроявления (ГНВП) / Мухаметгалиев И.Д., Янгиров Ф.Н., Яхин А.Р.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «УГНТУ». – 2017660657; заявл. 23.10.2017; опубл. 08.12.2017.
 12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017663672. Программа для работы с забойным буровым оборудованием КНБК / Мухаметгалиев И.Д., Янгиров Ф.Н., Яхин А.Р.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «УГНТУ». – 2017660656; заявл. 23.10.2017; опубл. 08.12.2017.
 13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015618263. Слайд Мастер 1.18 / Мухаметгалиев И.Д., Исмаков Р.А., Чиглинцев С.С.; заявитель и правообладатель Мухаметгалиев И.Д. – 2015614740; заявл. 04.06.2015; опубл. 04.08.2015.
 14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612134. Компьютерный тренажер «Буровой Инжиниринг v 2.15» / Мухаметгалиев И.Д., Исмаков Р.А., Конев Р.М., Чиглинцев С.С.; заявитель и правообладатель Мухаметгалиев И.Д. – 2014663103; заявл. 16.12.2014; опубл. 13.02.2015.
- 7 работ в материалах международных и всероссийских конференций:*
15. Мухаметгалиев, И. Д. Особенности разработки человеко-машинного интерфейса для программного обеспечения наклонно-направленного бурения / И.Д. Мухаметгалиев, З.В. Агзамов // Сб. тез. докл. науч.-техн. форума ООО «СамараНИПИнефть». – Самара, 2020. – С.130–131.
 16. Мухаметгалиев, И. Д. Разработка имитационной модели технологического процесса механического бурения нефтяных скважин на структурном уровне / И.Д. Мухаметгалиев, З.В. Агзамов // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. IV Междунар. науч.-техн. конф. – Уфа: УГНТУ, 2019. – С.167–173.
 17. Мухаметгалиев, И. Д. Аттестация, обучение, переквалификация инженерно-технического персонала с применением виртуальной программы-тренажера для ЭВМ «СЛАЙД МАСТЕР 1.18» / И.Д. Мухаметгалиев, Р.А. Исмаков, Д.В. Рахматуллин // Сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф., посвященной памяти академика А.Х. Миржадзанзаде. – Уфа: УГНТУ, 2016. – С.305–309.
 18. Мухаметгалиев, И. Д. Квалификационный отбор инженерно-технического персонала в сфере наклонно-направленного бурения с применением инженерного тренажера «СЛАЙД МАСТЕР 1.18» / И.Д. Мухаметгалиев, Р.А. Исмаков, Д.В. Рахматуллин, Д.С. Щелков, А.М. Мухаметшин // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. – Альметьевск: АГНИ, 2016. – С.262–267.
 19. Мухаметгалиев, И. Д. Аккредитация кадров и рационализация набора полевого персонала объектов бурения НГС на должность инженеров по бурению, а также обучение студентов УОУ путем симуляции процесса бурения с использованием программы ЭВМ «СЛАЙД МАСТЕР 1.18» / И.Д. Мухаметгалиев, Р.А. Исмаков, С.С. Чиглинцев // Сервисные услуги в добыче нефти : сб. науч. тр. науч.-техн. конф. – Уфа: УГНТУ, 2015. – С.148–154.
 20. Мухаметгалиев, И. Д. Экспертная система формирования компоновки низа бурительной колонны для управления направленным бурением скважин / И.Д. Мухаметгалиев, З.В. Агзамов // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. тр. VI Всерос. науч.-практ. конф. – Уфа: УГНТУ, 2017. – С.134-140.
 21. Мухаметгалиев, И. Д. Применение виртуальной программы тренажера для ЭВМ «СЛАЙД МАСТЕР 1.18» для обучения практическим навыкам бурения нефтяных и газовых скважин с использованием забойных телеметрических систем / И. Д. Мухаметгалиев, Р. А. Исмаков, Д. В. Рахматуллин // Современные технологии извлечения нефти и газа. Перспективы развития минерально-сырьевого комплекса (российский и мировой опыт): сб. науч. тр. Всерос. науч.-практ. конф. – Ижевск: УдГУ, 2016. – С.93-102.