

СЕРГАЛИЕВ АЛМАЗ СЕРИКОВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ И СТОХАСТИЧЕСКОЙ
ДИНАМИКИ БУРОВЫХ ШТАНГ НЕГЛУБИННОГО БУРЕНИЯ**

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени
доктора философии (PhD) по специальности
6D070500 – «Математическое и компьютерное моделирование»

Актуальность темы исследования. Среди основных энергоносителей в современном мире нефть занимает особое место, оставаясь при этом еще стратегически важным продуктом, оказывающим значительное влияние на мировую экономику. Наращивание объемов добычи нефти, их интенсивность, эффективность и безопасность напрямую зависят от уровня развития оборудования, применяемого в нефтегазодобывающей промышленности и режимов его эксплуатации.

По энерго и трудоемкости среди основных этапов в добыче нефти можно выделить этап бурение скважин. Он связан с большими затратами труда, времени и средств. На технико-экономические показатели буровых работ влияют такие факторы, как совершенство буровых машин и инструментов, организация их режимов нагружения и работы, влияние окружающей среды на движения бурового инструмента и др. При этом из практики буровых работ известно, что до 30% пробуренных скважин бракуются по причине их искривления или поломки буровых штанг. Происходит это по причине сложных колебательных процессов и явлений в работе буровых штанг, обусловленных техническими, технологическими и геологическими факторами – большие пространственные перемещения буровых штанг в результате сложного взаимодействия их начальной кривизны, действия нелинейных инерционных сил, переменности осевых нагрузок, действующих на буровую штангу, переменности крутящего момента и, как следствие, потеря динамической устойчивости штанги; влияние сил контактного взаимодействия бура с разрушаемой породой, буровой штанги со стенками скважины, которые, как правило, носят случайный характер; действие сил контактного трения и другие осложняющие факторы. Все они требуют тщательного исследования влияния указанных факторов на динамику бурильных штанг с целью обеспечения их устойчивости и безопасности режимов бурения скважин.

Современное состояние указанных проблем мало изучено. В основном исследования производятся при наложении тех или иных ограничений, допущений, приводящих к линейности математической модели движения буровой штанги, что существенно сужает круг рассматриваемых проблем и дает лишь их первое приближение. При этом протяженность буровой штанги ведет к геометрической нелинейности происходящих в ней деформационных

процессов, а внесение фактора случайности в контактные задачи более реалистично отражает происходящие физические явления, усложняя при этом математическую сторону их решения. Имеющиеся математические модели, как правило, не допускают всестороннего качественного и количественного анализа буровых колонн. Необходимы разработки современных математических моделей движения буровых штанг с позиций теории нелинейных деформируемых сред, применение современных математических методов их решения с применением высокопроизводительных вычислительных комплексов и пакетов визуализации для анализа динамики бурильных штанг на ранних этапах проектирования с целью обеспечения безаварийных работ по бурению скважин.

Таким образом, **актуальность темы исследования** не вызывает сомнений, представляет научный и практический интерес.

Цель работы: моделирование нелинейной и стохастической динамики буровых штанг неглубинного бурения в нефтегазодобывающей отрасли с учетом осложняющих факторов и окружающей среды, их анализ.

В связи с поставленной целью вытекают **следующие задачи исследования:**

– Разработка модели движения сжато-скрученной буровой штанги при малых деформациях и ее многопараметрический асимптотический анализ, как первое приближение.

– Разработка нелинейной модели движения сжато-скрученной буровой штанги при конечных деформациях для изгибно-крутильных колебаний различной топологии, ее численный анализ.

– Разработка нелинейных моделей движения буровой штанги, осложненных ее начальной кривизной и действием факторов окружающей среды (сил трения штанги о стенки скважины, с учетом особенностей низа буровой колонны) и их численный анализ.

– Исследование стохастических колебаний буровых штанг при действии осложняющих факторов случайного характера (случайной начальной кривизны буровой штанги, случайной силы трения штанги о стенки скважины).

Объект исследования. Объектом исследования являются буровые штанги, применяемые в нефтегазодобывающей промышленности для бурения неглубинных скважин, находящаяся под влиянием внешних сил и окружающей среды.

Предмет исследования. Предметом исследования являются нелинейные и стохастические колебания преднапряжённых буровых штанг с учетом осложняющих факторов при конечных деформациях.

Методы исследований: апробированные фундаментальные методы теоретической механики; современные методы нелинейной механики деформируемых сред и теории колебаний; вариационные методы; современные численные методы; пакеты символьных вычислений для численного моделирования и визуализации технологических процессов.

Для многопараметрического анализа низкочастотных колебаний буровой штанги использован метод многих масштабов. Для аналитического решения линейной модели движения буровой штанги применен метод обобщенных функций. Разработка нелинейной модели движения сжато-скрученных буровых штанг с учетом осложняющих факторов основана на применении вариационного принципа Остроградского-Гамильтона в рамках теории конечных деформаций В.В. Новожилова. Ввиду сложности полученной модели ее прямое интегрирование не представляется возможным. Поэтому система нелинейных уравнений движения с распределенными параметрами методом Бубнова-Галеркина приведена к системе обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), которая численно реализована в пакете символьных вычислений Wolfram Mathematica. При исследовании влияния случайных сил трения на динамику бурильных штанг дна основе метода сосредоточенных масс строилась дискретная стохастическая модель.

Научная новизна работы состоит в разработке новых нелинейных динамических моделей деформируемых систем с учетом конечности деформаций, в условиях действия осложняющих факторов случайного характера применительно к решению широко класса задач нелинейной и стохастической динамики бурового оборудования на новом качественном уровне, применяя современные методы математического моделирования и компьютерной визуализации полученных результатов.

Научные положения, выносимые на защиту:

– многопараметрический анализ классических линейных случаев плоских и пространственных изгибных колебаний буровой штанги, основанный на соотношениях между крутящим моментом и продольной силой, частотой и длиной волны, а также наличием вращения, который позволяет установить общую классификацию изгибных колебаний сжато-скрученной вращающейся буровой штанги и для выбранных диапазонов параметров построить дисперсионные кривые приближенного решения;

– применение аппарата теории обобщенных функций для анализа плоских изгибных колебаний буровой штанги, решение которых дает возможность определять напряженное состояние стержневых конструкций при разнообразии их геометрических и физических параметров, на всем диапазоне частот колебаний, воздействии на буровую штангу сосредоточенных силовых источников, что эффективно для решения обратных и полу-обратных задач;

– новые нелинейные математические модели изгибно-крутильных колебаний сжато-скрученной буровой штанги различной топологии и их динамический анализ;

– новые модели нелинейной динамики буровых штанг с учетом осложняющих факторов: начальная кривизна штанги, трение буровой штанги о стенки скважины, особенность низа бурильной колонны, их численный анализ;

- стохастические колебания буровых штанг и их анализ.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и результатов диссертационной работы подтверждается использованием основных фундаментальных законов и соотношений механики деформируемого твердого тела при построении математических моделей; сопоставлением и удовлетворительным согласованием полученных моделей и результатов исследования с результатами работ других авторов.

Теоретическая и практическая значимость исследования.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке новых математических моделей движения буровых штанг, применяемых в нефтегазодобывающей промышленности, в развитии методов их решения и анализа, обобщении результатов исследований для бурового оборудования в других отраслях промышленности.

Практическая значимость диссертационных исследований состоит в том, что применение современных методов математического моделирования и компьютерных технологий максимально приближает полученные результаты к реальным процессам, позволяет с высокой точностью прогнозировать поведение бурового оборудования, обеспечивая эффективность и надежность бурения скважин в нефтегазодобывающей отрасли.

Связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами. Данная работа выполнена в рамках проектов программы грантового финансирования фундаментальных исследований в области естественных наук «Разработка математических моделей нелинейных деформируемых сред для решения задач физических процессов в добывающей промышленности» (2012-2014 гг., №ГР 0112РК01496), «Разработка нелинейных динамических моделей деформируемых сред и их практическое применение для решения задач бурения в нефтегазодобывающей отрасли с учетом неопределенностей, осложняющих факторов и влияния окружающей среды» (2015-2017 гг., №ГР 0115РК00755).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих мероприятиях:

- Международная конференция «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения» (ИМАШ РАН, Москва, Россия, апрель 2013 г.);
- V Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (ИМЕТ им. Байкова РАН, Москва, Россия, 2013 г.);
- VIII Казахстанско-Российская Международная научно-практическая конференция «Математическое моделирование в научно-технологических и экологических проблемах нефтегазовой отрасли» (Атырау, 20-21 июня 2014 г.);
- International Conference on Application of Materials Science and Environmental Materials (Yichang, China, July 4-6, 2014);

- The 5th International Conference on Mechanics, Simulation and Control (St. Petersburg, Russian Federation, June 14-15, 2015);
- 10th International Conference on Vibration Engineering and Technology of Machinery (The University of Manchester, Manchester, England, September 9-11, 2015);
- XII International Conference on the Theory of Machines and Mechanisms (Liberec, Czech Republic, September 6-8, 2016);
- VII Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы урановой промышленности» (Астана, 3-5 августа 2017 г.);
- IX Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы урановой промышленности» (Алматы, 7-9 ноября 2019 г.);
- научные семинары механико-математического факультета КазНУ им. аль-Фараби (2013-2019 гг., Алматы);
- научные семинары кафедры математического и компьютерного моделирования КазНУ им. аль-Фараби (2013-2019 гг., Алматы).

Публикации.

По теме диссертации автором было опубликовано 16 работ, в том числе 4 публикации в научных изданиях, входящих в перечень рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК для публикации основных результатов научной деятельности; 6 публикации в научных журналах и трудах международных конференций, индексируемых базой данных Scopus, среди которых 1 публикация с ненулевым импакт-фактором (IF 9.052); 9 публикаций в трудах зарубежных и отечественных научных конференций, среди которых 3 публикации в материалах зарубежных конференций, 3 публикации в трудах всероссийских научных конференций, 3 публикации в материалах отечественной.

Личный вклад автора.

Основные результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из титульного листа, содержания, обозначений и сокращений, введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников из 139. Общий объем диссертации составляет 140 страниц, включая 72 иллюстрации и 1 таблицу.

Основное содержание диссертации.

Во введении отражены следующие моменты: актуальность темы диссертационного исследования, основная цель работы, объект, предмет и методы исследования, научная новизна, научно-практическое значение диссертационной работы, степень ее разработанности.

В первом разделе описывается современное состояние исследуемой проблемы, проводится обзор существующих работ в области исследования динамики бурильных колонн.

Во втором разделе разработаны модели движения сжато-скрученных буровых штанг при малых и конечных деформациях. Приводятся основные положения и соотношения нелинейной теории упругости В.В. Новожилова. В случае малых деформаций был проведен многопараметрический анализ системы, для случая плоских изгибных колебаний был применен аппарат теории обобщенных функций. Для нелинейной модели был проведен численный анализ для случаев плоских и пространственных колебаний.

Третий раздел связан с разработкой нелинейных математических моделей динамики колебаний буровых колонн с учетом таких осложняющих факторов как: начальная кривизна буровой колонны, контакт колонны со стенкой скважины, собственный вес и т.д. Проводится численный анализ моделей и изучается влияние параметров системы на колебания колонны.

В четвертом разделе исследуются разработанные ранее нелинейные математические модели колебаний буровых колонн при условии случайности одного из факторов. Рассмотрены случайная начальная кривизна колонны и случайный коэффициент трения. Проведены несколько симуляций Монте-Карло.

В заключении приводятся основные результаты и выводы, полученные в диссертационной работе.