САБИРОВА ЮЛИЯ ФАРХАТОВНА
«Моделирование динамики и виброзащиты нелинейных деформируемых систем»
АННОТАЦИЯ
диссертации на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе «8D06104 – Математическое и компьютерное моделирование»

Общая характеристика работы. Данная работа посвящена моделированию нелинейной динамики деформируемых систем, развитию методов их анализа применительно к решению проблем бурового оборудования нефтегазодобывающей отрасли. Исследовано влияние нелинейности параметров материала и слоистости структуры на функционирование средств виброзащиты.

Актуальность темы исследования. Современные исследования направлены на решение нелинейных проблем деформируемых систем. Нелинейность последних обусловлена снятием ограничений на величины деформаций, физической нелинейностью материала конструкций, нелинейной инерционностью динамических систем и др., что сопряжено с необходимостью развития и разработки новых математических моделей и методов их анализа, вычислительных алгоритмов и программного обеспечения. Все это позволит решать прикладные задачи на новом качественном уровне.

Особую актуальность данные исследования приобретают в контексте развития систем виброзащиты бурового оборудования, применяемого в нефтегазодобывающей отрасли для предотвращения нежелательных колебаний и преждевременного износа элементов. Интерес представляет область влияния физически нелинейных свойств конструктивных элементов типа демпферов на нелинейную динамику бурильных колонн. Развитие современного материаловедения стимулирует переход к использованию сложных многослойных композитных структур в качестве высокоэффективных демпферов. Широкое использование подобных многофункциональных высококонтрастных композитов в гражданском, промышленном, аэрокосмическом и автомобильном машиностроении требует уточнения имеющейся фундаментальной теории, разработанной для однородных и/или слабонеоднородных структур, поскольку практически важные краевые эффекты, наблюдаемые в высококонтрастных ламинатах, требуют дополнительного исследования.

Цель работы: развитие методов математического моделирования нелинейной динамики деформируемых систем, включая стержневые элементы бурильных колонн и тонкостенные слоистые демпфирующие муфты, для повышения эффективности средств виброзащиты.

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

– разработка обобщенных нелинейных моделей динамики стержневых систем с учетом средств виброзащиты;

– создание программно-вычислительного комплекса для численной реализации разработанных моделей, обеспечивающий высокую точность анализа динамических характеристик неоднородных структур;

– верификация разработанного программно-вычислительного комплекса путем сравнения с результатами, известными в литературе;

– проведение многопараметрического анализа нелинейной динамики бурильных колонн с учетом влияния внешних факторов; выявление закономерностей работы виброзащитных устройств в различных режимах эксплуатации;

– асимптотический анализ краевых антиплоских задач высококонстрастных слоистых пластин и пластин на податливом нелинейном основании типа Винклера.

Объектом исследования диссертационной работы являются нелинейные деформируемые системы, в частности стержневые элементы бурового оборудования и упругие слоистные пластины.

Предметом исследования является математическое моделирование задач механики деформируемого тела, возникающих при разработке методов виброзащиты бурового оборудования.

Методы исследований. В работе использован комплексный подход, базирующийся на фундаментальных принципах механики (вариационный принцип Остроградского-Гамильтона для вывода уравнений движения и соотношения нелинейной теории деформирования В.В. Новожилова), современных методах математического моделирования сред и материалов (применение упругого потенциала Трелоара для описания физически нелинейных элементов, теории тонких упругих пластин и стержней), аналитических методах (методы асимптотического анализа, метод Фурье для решения эллиптических уравнений и нахождения условий затухания), численных и дискретных методах (метод сосредоточенных параметров, метод Рунге-Кутты), методах компьютерного моделирования (C++, Python, OpenMP).

Научная новизна работы заключается в построении уточненных нелинейных моделей динамики стержневых систем, впервые учитывающих сопряжение перемещений стержня с собственной кинематикой демпфирующих элементов, моделируемых как геометрически и физически нелинейные сплошные деформируемые тела. Разработан оригинальный алгоритмический и программный комплекс на языке C++ с применением параллельных вычислений, адаптированный для анализа пространственных движений бурильных колонн при сложном нагружении (кручение, осевое сжатие, потоки сред). Впервые на основе асимптотического метода получены уточненные краевые условия (принцип Сен-Венана) для задач антиплоского сдвига в высококонтрастных слоистых пластинах и пластинах на нелинейно-упругом основании Винклера.

Научные положения, выносимые на защиту:

– комплекс нелинейных математических моделей стержневых систем, учитывающий переменную структуру и сопряжение с демпфирующими континуальными элементами. Обосновано, что учет собственной кинематики виброзащитных устройств позволяет выявить динамические эффекты, не описываемые в рамках традиционных дискретных моделей;

– алгоритмическая реализация и программный комплекс на базе метода сосредоточенных параметров с применением технологий параллельного программирования. Разработанная архитектура обеспечивает эффективное решение задач большой размерности для систем со сложным нагружением (вращение, потоки сред, нелинейные связи) с высокой вычислительной устойчивостью;

– результаты многопараметрического анализа динамики бурильных колонн, установившие зависимости между геометрическими параметрами стабилизаторов, характеристиками нелинейных муфт и динамическими характеристиками системы. Доказана эффективность применения резинокордных элементов для гашения поперечных колебаний в условиях сверхзвукового обтекания и осевого сжатия;

– обобщение принципа Сен-Венана в случае антиплоского сдвига применительно к трехслойным высококонтрастным пластинам и однородным пластинам, опирающимся на податливое нелинейное основание типа Винклера.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и результатов диссертационной работы обусловлена использованием известных фундаментальных законов механики сплошных сред, математические модели разрабатывались в соответствии с методикой, широко применимой на практике, разработанный программный комплекс верифицирован на тестовых задачах, результатах, известных в литературе, параметрический анализ, энергетические графики показывают физически обоснованные результаты.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Создание новых и обобщение существующих математических моделей нелинейных деформируемых систем расширит существующие знания о природе колебаний, а также дополнит теоретические

знания в области деформации твердых тел. Разработка единой методики исследования позволит уточнить инженерные расчеты и расширит класс решаемых задач механики деформируемых сред. Результаты данного исследования имеют широкое прикладное применение в исследовании динамики машин и механизмов.

Связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами. Диссертационная работа выполнялась в рамках трех научных проектов программы ГФ МНВО РК (п. 1-3), а также в рамках британского проекта Keele University & German Aerospace Center (DLR) (п. 4).

1) «Развитие математических моделей и методов анализа механических деформируемых систем со сложными нелинейными свойствами и переменной структуры в динамике машин» (2020-2022 гг., AP08857255-ОТ-22);

2) «Разработка нелинейных математических моделей и программных модулей для решения задач бурения скважин в добывающей промышленности» (2021-2023 гг., AP09261135-ОТ-23).

3) «Моделирование динамики нелинейно деформируемых систем и гетерогенных наноструктур в осложняющих условиях для решения проблем добывающей промышленности» (2024-2026 гг., AP23490543)

4) Asymptotic analysis of boundary value problems for strongly inhomogeneous multi-layered elastic plates (2024-2026, EP/Y021983/1)

Апробация работы. Результаты работы апробировались в рамках докладов на следующих мероприятиях:

– 58-й Международная научная студенческая конференция «МНСК-2020» (Новосибирск, Россия, 2020г.);

– XLVIII Международная летняя школа-конференция «Advanced Problems in Mechanics» (Санкт-Петербург, Россия, 2020г.);

– 16 Международная конфереция «Dynamical Systems – Theory and Applications» (Лодзь, Польша, 2021г.);

– III Международная студенческая научно-практическая конференция «Youth Digital Forum YDF-2022» (Алматы, 2022г.);

– VIII Международная научно-практическая конференция «Informatics and Applied Mathematics», посвященная памяти д.т.н., профессора Р.Г. Бияшева (Алматы, 2023г.);

– Международная конференция, посвященной 90-летию КазНУ имени аль-Фараби и 75-летию академика Ш. С. Смагулова "Computational and Information Technologies in Science, Engineering and Education" (Алматы, 2024г.);

– V Международная конференция по нелинейной динамике NODYCON 2026 (Рим, Италия, 2026);

– научные семинары механико-математического факультета КазНУ им. аль-Фараби (2020-2026 гг., Алматы);

– научные семинары кафедры математического и компьютерного моделирования КазНУ им. аль-Фараби (2020-2026 гг., Алматы).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе трех публикаций, индексируемые в базах данных Scopus и WOS в журналах Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik (SJR=0.806, CiteScore percentile=81, Q1) [1], Applied Mathematical Modelling (SJR=1.126, CiteScore percentile=97, Q1) [3], Symmetry (SJR= 0.467, CiteScore percentile=93, Q2) [4], одна публикация в издании, индексируемом в базах данных Scopus, WOS и входящем в перечень рекомендованных (КОКНВО) ККСОН [5], а также семи публикаций в материалах международных конференций [2, 6-11], в том числе четырех зарубежных [2, 8-11].

1. Kaplunov J., Prikazchikova L., **Sabirova Yu.,** Erbaş B. A refined decay condition for a high-contrast sandwich plate subject to antiplane shear // Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik. – 2026. – Vol. 77. – No 10. – Art. 281.

2. **Sabirova Yu.**, Khajiyeva L., Sabirova R. Impact of a Continuous Damping Sleeve on Nonlinear Drill String Dynamics in Fluid Flow // NODYCON 2026: Fifth International Nonlinear Dynamics Conference: Book of Abstracts. – Rome, Italy : Sapienza University of Rome, 2026. – P. 156.
3. Khajiyeva L., **Sabirova Yu.,** Kudaibergenov Askar, Kudaibergenov Askat. Application of the lumped-parameter method for modeling nonlinear vibrations of drill strings with stabilizers in a supersonic gas flow // Applied Mathematical Modelling. – 2022. – Vol. 110. – P. 748–766.
4. Khajiyeva L., Andrianov I., **Sabirova Yu.,** Kudaibergenov A. Analysis of Drill String Nonlinear Dynamics Using the Lumped-Parameter Method // Symmetry. – 2022. – Vol.14. – No 7. – Art. 1495.
5. Khajiyeva L., **Sabirova Yu.,** Sabirova R. Modelling of horizontal drill string motion by the lumped-parameter method // Вестник КазНУ. Серия математика, механика, информатика. – 2022. – Т. 115. – № 3. – С. 132-142.
6. **Sabirova Yu.,** Prikazchikova L. Decay conditions for antiplane shear of a high-contrast sandwich plate // Proc. Int. Conf. “Computational and Information Technologies in Science, Engineering and Education”. – Almaty, 2024. – P. 215.
7. **Sabirova Yu.,** Sabirova R. Development of a numerical model of a drill string in a fluid flow by the lumped-parameter method // Proc. VIII Int. Sci.-Pract. Conf. “Informatics and Applied Mathematics”. – Almaty, 2024. – P. 101-106.
8. **Sabirova Yu.** Mathematical modeling and computer visualization of drill string dynamics using OpenGL // Proc. III Int. Student Sci.-Pract. Conf. “Youth Digital Forum YDF-2022 (YDF-2022)”. – Almaty, 2022. – P. 263-264 (in Russian).
9. Khajiyeva L., Kudaibergenov A., **Sabirova Yu.** Application of the lumped parameter method for modelling nonlinear vibrations of drill strings with complicating factors // Abstracts 16th Int. Conf. “Dynamical Systems – Theory and Applications (DSTA 2021)”. – Lodz, Poland, 2021. – P. 751-752 (online).
10. Khajiyeva L., Kudaibergenov A., **Sabirova Yu.** Modeling of dynamics of a drill string with variable structure by the lumped parameters method // Abstracts XLVIII Int. Summer School-Conf. “Advanced Problems in Mechanics”. – St. Petersburg, Russia, 2020. – P. 57-58 (online).
11. **Sabirova Yu.** Numerical modeling of dynamic systems with variable structure by the lumped-parameter method // Proc. 58th Int. Sci. Conf. – Novosibirsk, Russia, 2020. – P. 99 (in Russian).

Личный вклад автора. Все результаты диссертационной работы получены соискателем самостоятельно под руководством научных консультантов. Личный вклад автора заключается в создании и верификации нового программного комплекса, разработке обобщенных моделей раздела III, асимптотическом анализе задач раздела IV, динамическом и многопараметрическом анализе, построении и анализе графиков задач всех разделов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из титульного листа, содержания, нормативных ссылок, обозначений и сокращений, введения, четырех разделов, заключения, списка использованной литературы из 128 работ и трех приложений. Работа составляет 183 страницы, содержит 90 иллюстрации и 18 таблиц.

Основное содержание диссертации. Во введении изложены общая характеристика работы, цель и задачи исследования, применяемые методы, теоретическая и практическая значимость, публикации, проекты, в рамках которых выполнялось исследование, перечень мероприятий, в рамках которых работа апробировалась.

В первом разделе представлен аналитический обзор современного состояния исследований в области нелинейной динамики деформируемых систем. Обоснована необходимость совершенствования математических моделей бурильных колонн, учитывающих влияние виброзащитных элементов. Также показана актуальность

исследования низкочастотных колебаний в высококонтрастных композитах, что обусловлено недостаточной изученностью волновых процессов в структурах с существенно различающимися параметрами слоев. Приведена постановка задач.

Второй раздел посвящен созданию вычислительного комплекса на языке C++, реализующего моделирование плоских и пространственных нелинейных перемещений бурильных колонн как систем с сосредоточенными параметрами. Проведена верификация программного комплекса на известных моделях.

Третий раздел посвящен исследованию нелинейной динамики бурильных колонн при сложном динамическом нагружении с учетом виброзащитных элементов (опорных стабилизаторов и демпфирующих муфт). Сложное нагружение включает в себя осевое сжатие, кручение, собственный вес, воздействие потока газа на вращающийся стержень. Особенностью исследования является учет собственной кинематики муфты, моделируемой как геометрически и физически нелинейное сплошное тело.

Четвертый раздел посвящен исследованию локальных динамических процессов в зонах контакта элементов виброзащиты с основными конструкциями. Методами асимптотического анализа для уточненной краевой теории решается задача об антиплоском сдвиге высококонтрастных слоистых пластин. Для учета взаимодействия демпфирующих элементов с нелинейно-упругой средой (резинокордные слои, основание скважины), задача обобщена на случай полубесконечной пластины на нелинейном основании Винклера.

В заключении изложены основные результаты работы, оценка полноты достижения поставленных задач и рекомендации по практическому применению полученных результатов.