**Краткая информация о проекте**

| | |
|---|---|
| Наименование | AP23490543 Моделирование динамики нелинейно деформируемых систем и гетерогенных наноструктур в осложняющих условиях для решения проблем добывающей промышленности |
| Актуальность | Актуальность исследований обусловлена требованиями в обеспечении безопасного и эффективного функционирования деформируемых систем и наноструктур, применяемых в добывающей промышленности, путем разработки нелинейных моделей их движения в условиях действия потоков газа, сейсмических волн, температурного поля и различных сценариев нагружения, а также создания программных модулей и комплексов с использованием новейших информационных и вычислительных технологий. |
| Цель | Разработка новых математических моделей деформируемых структур с нелинейностью различной природы в задачах динамики упругих стержневых систем бурового оборудования, подземных структур и наноструктур балочного типа в осложняющих условиях окружающей среды; развитие методов их многопараметрического и структурного анализа; разработка программных модулей определения динамических характеристик исследуемых объектов, их надежности, динамической устойчивости. |
| Задачи | 1. Развитие 3-D модели упругого деформирования физически нелинейных сред на основе известных упругих потенциалов. Переход от обобщенной модели к стержневым системам с различными типами деформирования. Учет конечных деформаций.<br>2. Численное моделирование и анализ разработанных моделей движения физически и геометрически нелинейных стержневых структур. Анализ влияния типов нелинейности на динамику стержневых систем.<br>3. Развитие разработанных математических моделей стержневых структур применительно к вращающимся стержневым элементам промышленного оборудования с неоднородными свойствами в условиях влияния окружающей среды (обтекание потоком газа) и применения физически нелинейных элементов как виброзашитных средств. Развитие методов их численного анализа.<br>4. Моделирование динамики подземных структур трубопроводных систем с нелинейными характеристиками при действии статических и динамических нагрузок.<br>5. Моделирование динамических процессов и напряженного-деформированного состояния подземных структур при воздействии трехкомпонентной сейсмической волны. |

| | |
|---|---|
| | 6. Моделирование виброзащиты бурильных колонн при действии сейсмических волн за счет переменности свойств стержневой структуры путем включения в кинематическую цепь стабилизаторов.<br>7. Разработка математических моделей движения нелинейно деформируемых бурильных колонн в температурном поле с учетом начальных напряжений. Численный анализ моделей.<br>8. Моделирование резонансных колебаний нелинейно деформируемых бурильных колонн по основной и высшим частотам. Построение их амплитудно-частотных характеристик (АЧХ). Определение зон неустойчивости движения.<br>9. Моделирование неустойчивости движения нелинейно деформируемых бурильных колонн в различных сценариях нагружения. Определение зон неустойчивости для каждого случая.<br>10. Разработка программного модуля распространения поверхностной сейсмической волны Рэлея. Оценка ее воздействия на динамику бурильных колонн.<br>Создание программного комплекса для моделирования динамических процессов в разветвленных пространственно-расположенных конструкциях при воздействии трехкомпонентных сейсмических волн с графическим и анимационным представлением результатов.<br>11. Разработка модели движения стержневых структур с нано-механическими свойствами с учетом нелинейности различной природы. Численный анализ модели.<br>12. Разработка модели движения нелинейных стержневых гетерогенных наноструктур в условиях влияния окружающей среды. Исследование влияния гетерогенных свойств наноструктур на их динамику. |
| Ожидаемые и достигнутые результаты | **Ожидаемые результаты:** будет проведено развитие 3-D модели упругого деформирования физически нелинейных сред, осуществлен переход от обобщенной модели к стержневым системам с различными типами деформирования; проведено численное моделирование и анализ разработанных моделей, анализ влияния типов нелинейности на динамику стержневых систем; осуществлено развитие разработанных моделей и методов их численного анализа применительно к стержневым элементам промышленного оборудования с неоднородными свойствами под влиянием окружающей среды и виброзашитных средств; осуществлено моделирование динамики подземных структур трубопроводных систем с нелинейными характеристиками при действии статических и динамических нагрузок; проведено моделирование динамических процессов и НДС подземных структур |

| | |
|---|---|
| | при воздействии трехкомпонентной сейсмической волны; проведено моделирование виброзащиты бурильных колонн при действии сейсмических волн за счет переменности свойств стержневой структуры; проведена разработка и численный анализ моделей в температурном поле с учетом начальных напряжений; проведено моделирование резонансных колебаний нелинейно деформируемых бурильных колонн, построены их АЧХ; проведено моделирование неустойчивости движения бурильных колонн в различных сценариях нагружения; разработан программный модуль распространения сейсмической волны с оценкой воздействия на бурильные колонны; создан программный комплекс для моделирования динамических процессов в подземных конструкциях при воздействии трехкомпонентных сейсмических волн; осуществлена разработка и численный анализ модели движения стержневых структур с нано-механическими свойствами с учетом нелинейности; разработана модель движения нелинейных стержневых гетерогенных наноструктур в условиях влияния окружающей среды.<br>**Достигнутые результаты:**<br>1. Выполнены работы по развитию 3D-модели упругого деформирования физически нелинейных сред на основе известных упругих потенциалов. Проведен переход от обобщённой модели к стержневым системам с различными типами деформирования, с учетом конечных деформаций.<br>2. Выполнена разработка математических моделей физически и геометрически нелинейных стержневых структур. Рассмотрены частные случаи колебаний стержневых элементов, включая плоский и пространственный изгиб, как наиболее характерные типы их деформирования. Проведен анализ влияния геометрической и физической нелинейности на динамическое поведение стержневых систем.<br>3. Осуществлено дальнейшее развитие разработанных математических моделей стержневых структур применительно к вращающимся стержневым элементам промышленного оборудования с неоднородными физико-механическими свойствами, функционирующим в условиях воздействия окружающей среды (обтекание потоком газа), а также с учетом применения физически нелинейных элементов в качестве виброзащитных средств. Для численного анализа разработанной обобщённой модели использовался метод сосредоточенных параметров, на основе которого выполнено дальнейшее развитие методов численного анализа.<br>4. Выполнено моделирование динамики подземных структур трубопроводных систем. С использованием метода конечных элементов построены дискретные |

| | |
|---|---|
| | модели пространственно-расположенных трубопроводных систем. Решение полученной системы обыкновенных дифференциальных уравнений осуществлялось с применением неявной схемы Ньюмарка, уточнённым вариантом которой является метод Бате.<br>5. Проведено моделирование динамических процессов и напряженного-деформированного состояния подземных структур при воздействии трехкомпонентной сейсмической волны. Представлено развитие нелинейной математической модели пространственного деформирования движущихся буровых колонн применительно к условиям воздействия трёхкомпонентной сейсмической волны (с продольной, поперечной и вертикальной составляющими). Разработаны модели их упругого взаимодействия. Построена нелинейная модель пространственного движения бурильной колонны с учетом ее конечных деформаций. Проведено моделирование динамики системы при различных параметрах сейсмического воздействия. В результате анализа выявлены качественные и количественные особенности поведения бурильных колонн, включая возникновение биений, обусловленных нелинейным взаимодействием с трёхкомпонентным сейсмическим полем. Также выполнена оценка напряжённо-деформированного состояния элементов бурового оборудования, позволяющая судить о потенциальных зонах концентрации напряжений и рисках развития аварийных режимов.<br>6. Проведено моделирование виброзащиты бурильных колонн при действии сейсмических волн за счет переменности свойств стержневой структуры путем включения в кинематическую цепь стабилизаторов. Также учтен вклад нелинейного потока газа, обтекающего буровую колонну, как фактора окружающей среды. Для этого разработана динамическая модель муфты из физически нелинейных материалов резинокордного типа, используемая для описания демпфирующего стабилизатора. На основе метода сосредоточенных параметров разработана численная модель виброзащиты бурильных колонн при воздействии сейсмических волн. Проведен параметрический анализ влияния включенных в кинематическую цепь стабилизаторов на возникающие колебания бурильной колонны в условиях влияния сейсмики. Найдены оптимальные характеристики и расположение стабилизаторов для достижения максимального эффекта виброзащиты.<br>7. Проведена разработка математических моделей движения нелинейно деформируемых бурильных |

| | |
|---|---|
| | колонн в температурном поле с учетом начальных напряжений. Осуществлен численный анализ моделей. Проведен обзор и анализ литературы по предмету исследования. Рассмотрены подходы моделирования температурных режимов в добывающей промышленности. Проведен анализ линейных и нелинейных моделей. Разработана нелинейная математическая модель колебаний буровой колонны с начальной кривизной в потоке жидкости и температурного поля. Проведено численное моделирования влияние температуры и других динамических факторов внешнего возбуждения на вибрационные характеристики бурильных колонн. Выявлено, что повышение температуры ведёт к снижению жёсткости и увеличению амплитуд вынужденных колебаний колонны.<br>8. Проведено моделирование резонансных колебаний нелинейно деформируемых бурильных колонн по основной и высшим частотам. Осуществлено построение их амплитудно-частотных характеристик (АЧХ). Определены зоны неустойчивости движения бурильных колонн на основе критерия Раусса-Гурвица. Рассмотрены случаи начальной кривизны буровой колонны и действия на нее сил трения. Установлено, что резонансы по высшим частотам (второй и третьей) внесли поправки и качественные изменения в АЧХ резонанса по основной частоте. Наблюдаются бифуркации АЧХ в зонах высших частот, что говорит о возможности появления скрытых резонансных колебаний.<br>9. Проведено моделирование неустойчивости движения нелинейно деформируемых бурильных колонн при различных сценариях нагружения. Определены зоны неустойчивости для каждого случая. Выявлено влияние основных параметров бурильной системы на зоны неустойчивости.<br>10. Начата разработка программного модуля распространения поверхностной сейсмической волны Рэлея для оценки ее воздействия на динамику бурильных колонн. Разрабатывается программный комплекс для моделирования динамических процессов в разветвленных пространственно-расположенных подземных конструкциях при воздействии трехкомпонентных сейсмических волн с графическим и анимационным представлением результатов. |
| Имена и фамилии членов исследовательской группы с их идентификаторами (Scopus Author ID, Researcher ID, ORCID, при наличии) и ссылками на соответствующие профили | 1. Хаджиева Леля Азретовна, руководитель проекта, д.ф.-м.н., профессор, индекс Хирша = 7; Researcher ID N-4382-2014, ORCID 0000-0002-2565-3409, Scopus Author ID 55779888800.<br>2. Кыдырбекулы Алматбек Балгабекович, д.т.н., и.о. профессора, индекс Хирша = 3; Researcher ID HKP- |

| | |
|---|---|
| | 0150-2023, ORCID 0000-0002-8345-7334, Scopus Author ID 55779558700.<br>3. Андрианов Игорь Васильевич, DSc, профессор, индекс Хирша = 26; Researcher ID G-8772-2016, ORCID 0000-0002-2762-8565, Scopus Author ID 7004511057.<br>4. Кудайбергенов Аскар Канатович, PhD, индекс Хирша = 6; Researcher ID R-1820-2019, ORCID 0000-0001-9154-9653, Scopus Author ID 57202688443.<br>5. Кудайбергенов Аскат Канатович, PhD, индекс Хирша = 4; Researcher ID AAR-2337-2020, ORCID 0000-0003-4773-0580, Scopus Author ID 56479154600.<br>6. Сабирова Роза Фархатовна, магистр технических наук, индекс Хирша = 2; Researcher ID ORI-6021-2025, ORCID 0000-0001-8733-6153, Scopus Author ID 57226890520.<br>7. Сабирова Юлия Фархатовна, магистр технических наук, индекс Хирша = 2; Researcher ID LTZ-1234-2024, ORCID 0000-0002-3497-0940, Scopus Author ID 57758916300.<br>8. Гайсин Амир Тахирович, PhD-докторант, индекс Хирша = 1; Researcher ID LPE-6331-2024, ORCID 0000-0001-9114-3143, Scopus Author ID 59385161100.<br>9. Эфендиев Саид Хабибулаевич, PhD-докторант, ORCID 0000-0001-9114-3143, Scopus Author ID 59692642400.<br>10. Джантасова Малика, магистрант.<br>11. Мардонов Батиржан, д.ф.-м.н., профессор, индекс Хирша = 6; Researcher ID FKH-2103-2022, Scopus Author ID 6507558443.<br>12. Мирзаев Илхомжон, д.ф.-м.н., профессор, индекс Хирша = 8; ORCID 0000-0002-8616-9717, Scopus Author ID 7801461898. |
| Использование | Результаты проекта окажут положительное влияние на развитие методики анализа нелинейно деформируемых систем и наноструктур для образцов техники добывающей промышленности, расширят класс решаемых задач в приборо- и машиностроении, физике и математическом моделировании. |
| Приоритет в сравнении с реальными аналогами | Математические нелинейные модели, разрабатываемые в проекте, являются обобщением известных в литературе. Учет различного рода нелинейностей, влияния сейсмических волн, температурного воздействия, неоднородностей, начальных напряжений при анализе динамики деформируемых систем и наноструктур, применяемых в добывающей промышленности, значительно расширит класс исследуемых задач данной области и позволит проводить исследования на качественно новом уровне. |
| Список публикаций со ссылками на них | 1. L.A. Khajiyeva, A.T. Gaisin, R.F. Sabirova. Modelling of a drill string motion under seismic impact // Вестник КазНУ им. аль-Фараби. Серия мат., мех., инф. |

| | |
|---|---|
| | – 2024. – Vol. 123(3). – P. 135–146 (https://doi.org/10.26577/JMMCS2024-v123-i3-11, рекомендован КОКСНВО, процентиль по CiteScore=18).<br>2. Igor V. Andrianov, Lelya A. Khajiyeva, Askar K. Kudaibergenov, Galina A. Starushenko. On aspects of continualization of 2D lattices antiplane dynamical problem // Mechanics Research Communications. – 2025. – Vol. 148. – P. 1-7 (104480) (https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2025.104480, Q3, процентиль по CiteScore=65).<br>3. Askat K. Kudaibergenov, Askar K. Kudaibergenov, L. A. Khajiyeva. The effect of a supersonic gas flow on resonance regimes of drill string nonlinear vibrations // WSEAS Transactions on Fluid Mechanics. – 2025. – Vol. 20. – P. 10-19 (https://doi.org/10.37394/232013.2025.20.2, процентиль по CiteScore=37).<br>4. L.A. Khajiyeva, S.Kh. Efendiyev, A.K. Kudaibergenov, Sh.M. Gabayev. Stability analysis of drill strings with initial curvature in a fluid flow under environmental uncertainty // WSEAS Transactions on Fluid Mechanics. – 2025. – Vol. 20. – P. 63-72 (https://doi.org/10.37394/232013.2025.20.7, процентиль по CiteScore=37).<br>5. Askar K. Kudaibergenov, Askat K. Kudaibergenov, T.B. Tileuberdi. Prediction of drill string vibrations using machine learning tools. // Вестник КазНУ им. аль-Фараби. Серия мат., мех., инф. – 2025. – Vol. 126, No. 2. – P. 151-163 (https://doi.org/10.26577/JMMCS20251262012, рекомендован КОКСНВО, процентиль по CiteScore=18).<br>6. S.Kh. Efendiyev, L.A. Khajiyeva, A.K. Kudaibergenov. Stability of drill string nonlinear vibrations in fluid flow and temperature field // WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. – 2025. – Vol. 20. – P. 184-194 (https://doi.org/10.37394/232011.2025.20.21, процентиль по CiteScore=39).<br>7. L.A. Khajiyeva A.K., Kudaibergenov, Y.Y. Tleukhabylova. Stability analysis of drill string nonlinear vibrations at higher harmonics // WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. – 2025. – Vol. 20. – P. 208-216 (https://doi.org/10.37394/232011.2025.20.23, (процентиль по CiteScore=39).<br>8. F. Gomez-Silva, I. Andrianov. Finite element implementation of novel low-order continuum models for the dynamics of a mass-in-mass lattice with long-range interactions: A discrete-continuum-discrete approach // Journal of Sound and Vibration. – 2026. – Vol. 630. – P. |

| | |
|---|---|
| | 1-22 (119696) (https://doi.org/10.1016/j.jsv.2026.119696, Q1, процентиль по CiteScore=90).<br>9. I.V. Andrianov, L.A. Khajiyeva, S.G. Koblik, A.K. Kudaibergenov. Influence of axial inertia on the behavior of electrically actuated beam on elastic foundation // Continuum Mechanics and Thermodynamics (на рецензировании).<br>10. I.V. Andrianov, L.A. Khajiyeva, A.K. Kudaibergenov, G.A. Starushenko. Beam model of MEMS/NEMS accounting for axial inertia and nonlinear curvature. In: Altenbach, H., Mikhlin, Yu., Pierre, C., Avramov, K. (eds.) Nonlinear Vibrations of Engineering Structures and Their Absorption. Advanced Structured Materials (в печати). |
| Информация о патентах | нет |
| | |