

ИБРАЕВ ГУЛАМА-ГАРИП АЛИШЕР ЕРИКЖАНОВИЧ

ДИНАМИКА ВЕРТИКАЛЬНЫХ РОТОРНЫХ СИСТЕМ

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени
доктора философии (PhD) по специальности
6D060300 – «Механика»

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день существуют многочисленные работы по исследованию нелинейной динамики роторных систем. Но несмотря на широкое распространение таких систем, их динамика недостаточно изучена ввиду трудностей, сопряженных с необходимостью учитывать совместное действие факторов, как влияние жидкости при частичном заполнении, внешние неконсервативные силы, линейные и угловые неуравновешенности.

В конструкции роторных машин одним из наиболее важных механических компонентов, описываемых нелинейными моделями, определяющий работоспособность и надежность системы являются упругие опоры, в нашем случае в качестве упругих опор выступают подшипники качения. Игнорирование нелинейных свойств подшипников ухудшает результаты как качественного, так и количественного анализа роторных систем. Это объясняется тем, что при анализе линейных роторных систем с подшипниками качения наиболее часто используется приближенная оценка жесткостных и демпфирующих свойств подшипников, когда как в реальности жесткость подшипника существенным образом зависит от нагружения, т.е. от режима работы роторной системы, от геометрии и величины зазоров в подшипнике, от величины посадок внутреннего и внешнего кольца в подшипнике.

В большом многообразии роторных машин значительную часть занимают роторные системы с полостями, содержащими жидкость (валы турбомашин с жидкостным охлаждением, жидкостные гироскопы, центрифуги, сепараторы и др.). Роторы с полостями, частично заполненными жидкостью, относятся к неконсервативным системам. Причиной неконсервативности системы и возникновения в ней автоколебаний является жидкость, частично заполняющая полость ротора. Влияние силы реакции жидкости на движение системы во многом аналогично поведению силы внутреннего трения, то есть она за критической скоростью ротора превращает энергию вращения вала в энергию его колебаний, то есть способствует возникновению неустойчивости. При определенных условиях жидкость, находящаяся в полости ротора, является основным источником возникновения неустойчивых режимов движения системы. Физической причиной этого является нарушение состояния равновесия между центробежным ускорением

частиц жидкости и градиентом давления, действующем в противоположном направлении.

При проектировании и оценке вибрационных характеристик роторных машин необходимо учитывать колебания корпуса, т.е. рассматривать динамическую систему «ротор-жидкость-фундамент» в целом. Во многих теоретических и практических исследованиях по динамике роторных систем, содержащих жидкость, рассматриваются только колебания ротора с жидкостью и при этом фундамент считается неподвижным. Такое допущение приводит к существенным погрешностям при оценке динамических и кинематических характеристик роторной системы в целом.

Здесь исследуется динамика ротора с полостью, частично заполненной жидкостью, установленного вертикально на упругом фундаменте, вращающегося на подшипниках качения. В связи с повышенными требованиями к точности вращения и увеличением скоростей вращения роторов, возникает необходимость учёта упругих свойств подшипников качения. Наиболее существенным фактором оказывающим влияние на динамику ротора здесь приняты нелинейные жёсткостные свойства подшипника качения, когда, в частности, радиальная податливость возникает за счёт деформаций тел качения на дорожках качения в местах контакта.

Новые тенденции, появившиеся в центробежной технике, привели к появлению различных конструкций центрифуг, некоторые из которых трудно оценить количественно и качественно по известным методам. На эту тему есть множество научных работ, патентов и авторских свидетельств, где предложены методы механического отделения твердых частиц от жидкостей центрифугированием.

В настоящей работе исследуется пространственное движение частицы и время ее осаждения в вертикальной центрифуге, для полной оценки процесса отделения твердых частиц от жидкости учитывается, что величина угловой скорости вращения ротора, стаканов и угол их наклона являются переменными величинами в зависимости от времени, что также усложняет поиск общего решения дифференциальных уравнений частиц и механической системы. На основе нескольких ранее опубликованных работ и публикаций разработана методика аналитических исследовательских и оценочных работ, используемая для описания процессов сепарации и седиментации для роторной установки, используемой для обработки суспензии.

Цель работы: разработка обобщённых динамических моделей нелинейных роторных систем, учитывающих взаимосвязанные колебания системы «ротор-жидкость-фундамент» а также исследование процесса сепарации твердых частиц в вертикальных роторных системах. В работе решаются следующие задачи:

– создание и исследование обобщённой динамической модели системы «ротор-жидкость-фундамент», позволяющую исследовать динамику взаимосвязанных движений вертикальных роторов с жидкостью при наличии нелинейности и фундаментом установки;

– разработка аналитической методики расчёта амплитуд собственных и вынужденных нелинейных колебаний, а также критических и резонансных частот вертикальных роторных систем с полостями, частично заполненными жидкостью;

– разработка методики расчёта основных характеристик процесса сепарации твердых частиц в вертикальных роторных системах.

Методы исследований:

– основные фундаментальные законы теоретической механики и механики сплошных сред;

– методы теории линейных и нелинейных колебаний;

– классические высокоточные численные методы для решения нелинейных дифференциальных уравнений.

Научная новизна работы. В данной работе приведено комплексное решение роторной системы с полостью частично заполненной жидкостью, установленного на упругом фундаменте, вращающихся в подшипниках качения с нелинейной характеристикой. Методом эллиптических функций Якоби находятся решения нелинейных роторных систем, характеризующихся уравнением Дуффинга, исследуются собственные и вынужденные колебания системы. Определяются частоты собственных, вынужденных и автоколебаний. Разработана обобщенная динамическая модель системы «Ротор-жидкость-фундамент», позволяющая исследовать взаимосвязанные колебания вертикальных роторов с жидкостью, при учете движения фундамента и нелинейности опор. Впервые разработана аналитическая методика расчета амплитуд, критических и резонансных частот собственных и вынужденных нелинейных колебаний вертикальных роторных систем, полости которых частично заполнены жидкостью. Впервые разработана методика расчета основных характеристик процесса сепарации твердых частиц в вертикальных роторных системах.

Научные положения, выносимые на защиту:

– обобщенная динамическая и математическая модель системы «ротор-жидкость-фундамент», позволяющая исследовать динамику взаимосвязанных движений вертикальных роторов с жидкостью при наличии нелинейности и фундаментом установки;

– аналитическая методика расчёта амплитуд собственных и вынужденных колебаний, критических и резонансных частот вертикальных роторных систем с полостями, частично заполненными жидкостью при наличии нелинейности;

– методика расчёта основных характеристик процесса сепарации твердых частиц в вертикальных роторных системах.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и результатов диссертационной работы. При построении динамической и математической модели системы «твердое тело-жидкость» используются уравнения Лагранжа второго рода и гидродинамическое уравнение Эйлера. Нелинейная характеристика подшипников качения моделируется в

соответствии с контактной теорией Герца. Для нахождения решений нелинейных дифференциальных уравнений движения твердого тела используются метод комплексных амплитуд, метод гармонического баланса и др. Для определения амплитуды вынужденных и собственных колебаний, субгармонических и ультрагармонических колебаний ротора и фундамента используются методы теории нелинейных колебаний.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Результаты работы являются научной базой для совершенствования исследований в нелинейной динамике вертикальных роторных систем с полостью, частично заполненными жидкостью и позволяют с наименьшими затратами средств провести предпроектные вычислительные эксперименты, дать качественные и количественные характеристики и сократить сроки проектирования новых вертикальных роторных машин, повысить качество и надёжность их работы. Практическая значимость представленной работы направлена на изучение влияния нелинейности на производственный процесс роторных устройств, а также на исследование динамики вертикальных центрифуг непрерывного действия используемые в очистке нефти от других компонентов, выделение ценных и ценных элементов из тяжелой нефти, парафина из легких углеводородов, благодаря чему можно решить многие вопросы, такие как повышение текучести нефти по трубам, увеличение срока службы оборудования и трубопроводов нефтеперерабатывающего завода, улучшение экологического состояния регионов.

Связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами. Данная работа выполнена в рамках проекта программы грантового финансирования прикладных исследований в области энергетики и машиностроения «Проектирование и исследование динамики роторных машин для разделения многофазных жидких сред с учетом нелинейности опор и действия высокочастотного электромагнитного поля» (2020-2022 гг., AP08856167).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на научных семинарах: кафедры механики КазНУ им. аль-Фараби под руководством профессора А.Б. Кыдырбекулы, на факультете Mathematics Research Centre at Keele University (United Kingdom) под руководством профессора J.Kaplunov (2019 г.), на факультете Ocean and Mechanical Engineering Department in the Florida Atlantic University (Boca Raton, USA) под руководством профессора I.Elishakoff (2020 г.); а также на научно-практических конференциях: International Conference on «Modern Achievements of Science and Education» (Paris, France, 2013), 1st International Conference on Mathematical Methods & Computational Techniques in Science & Engineering (Athens, Greece, 2014), XII International conference on the Theory of Machines and Mechanisms (Liberec, Czech Republic, 2016), «Приоритетные задачи и стратегия технических наук» (Тольятти, Россия, 2017), «Актуальные проблемы информатики, механики и робототехники. Цифровые технологии в машиностроении» (Алматы, Казахстан, 2018), XIII International conference on the Theory of Machines and Mechanisms (Liberec, Czech Republic, 2021) и на

втором международном симпозиуме «Механика будущего», посвященный 90-летию академика У. А. Джолдасбекова (Алматы, Казахстан, 2021).

Публикации. Основные научные результаты диссертации отражены в 12 опубликованных работах, в том числе 3 публикации в научных изданиях, входящих в перечень рекомендованных ККСОН МОН РК для публикации основных результатов научной деятельности; 4 публикации в периодических зарубежных научных журналах и трудах международных конференций, индексируемых базой данных Scopus, среди которых 2 публикации с ненулевым импакт-фактором; 6 публикаций в трудах зарубежных и отечественных научных конференций и 1 патент.

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

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов, заключения, списка из 105 использованных источников. Общий объем диссертации составляет 121 страниц, включая 51 иллюстрации и 3 таблицы.

Основное содержание диссертации. Во введении освещены такие вопросы, как актуальность темы диссертационного исследования, основная цель работы, объект, предмет и методы исследования, научная новизна, научно-практическая значимость диссертационной работы.

В первом разделе описывается современное состояние исследуемой проблемы и дается обзор работ и литературы в области нелинейных колебаний твердого тела, полость которого частично заполнена жидкостью. Описывается динамическая модель ротора полость которого частично заполнена жидкостью, с учетом нелинейности упругих опор, установленного на подвижном фундаменте, проведен анализ нелинейных собственных и вынужденных колебаний системы «ротор-жидкость-фундамент».

Во втором разделе построена динамическая модель ротора установленного на подвижном фундаменте с учетом нелинейности упругих опор, предложены методики, основанные на методе эллиптических функций Якоби, позволяющие с высокой точностью определять амплитуды и частоты собственных и вынужденных нелинейных колебаний системы «ротор-фундамент», проведен сравнительный анализ известными классическими методами.

В третьем разделе проведен анализ процессов сепарации и седиментации твердых частиц в многофазных средах с низкой концентрацией в центрифуге для очистки сырой нефти, являющегося одним из прикладных примеров рассматриваемой роторной системы в производстве, получены важные результаты.

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