

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертационной работе Голуба Андрея Петровича

«Динамика двухзвенного аэродинамического маятника», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика».

Диссертация А.П.Голуба посвящена исследованию динамики двухзвенного маятника-флюгера с вертикальной осью вращения, установленного в потоке сопротивляющейся среды. К первому и второму звену прикреплены спиральные пружины. На втором звене закреплено крыло - пластина симметричного профиля. Для описания аэродинамического воздействия на крыло используется модифицированная квазистатическая модель, разрабатываемая в лаборатории навигации и управления НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова. Проанализированы положения равновесия данной системы. Проведено численное моделирование поведения системы, и исследована зависимость амплитуды и частот возникающих предельных циклов от параметров конструкции. В аэродинамической трубе А-6 НИИ механики МГУ проведена серия экспериментов при различных скоростях набегающего потока, разных положениях крыла относительно второго звена и разных жесткостях пружины между звеньями. Данные экспериментов находятся в качественном согласии с теоретическими результатами.

Область исследований полностью соответствует паспорту научной специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика».

Тема диссертации А.П.Голуба **актуальна**. Системы твёрдых тел, которые движутся под действием сил аэродинамической нагрузки и упругости, представляют большой интерес с точки зрения и фундаментальных исследований, и приложений. Активные исследования таких систем связаны со сложной природой и нелинейностью сил, действующих на тело со стороны среды. В такой системе влияние упругих и аэродинамических сил при определенных обстоятельствах может привести к появлению колебаний или хаотических движений. Наличие таких колебаний означает, что данная система может использоваться для преобразования энергии потока в полезную энергию. Это стимулирует поиск новых вариантов устройств, подходящих для этой цели. Научная актуальность подтверждается тем, что эта работа относится к приоритетному направлению фундаментальных исследований, включающему раздел

2.2.2. «Математическое моделирование, методы вычислительной и прикладной математики и их применение к фундаментальным исследованиям в различных областях знаний.»

Обоснованность – правомерность научных положений, выводов и рекомендаций диссертации обеспечивается отраженным в работе тщательным анализом полученных результатов, их экспериментальной проверкой, согласованностью с результатами целого ряда известных публикаций.

Достоверность – доказательность исследования обеспечивается применением принципов теоретической механики, современных аналитических и численных математических методов, непосредственным участием соискателя в поставленных экспериментах.

Результаты диссертации получены автором **самостоятельно**.

Научная новизна полученных А.П.Голубом результатов заключается в постановке и решении задачи поиска периодических решений в системе, представляющей собой двухзвенный аэродинамический маятник с упругим закреплением. В частности, в диссертации показано, что в такой системе могут одновременно существовать два притягивающих предельных цикла.

Практическая значимость полученных А.П.Голубом результатов состоит в том, что при достаточно малом расстоянии от межзвенного шарнира до центра крыла указана область устойчивости положения равновесия аэродинамического маятника, установленного «по потоку». Показано, что наличие пружины в межзвенном шарнире, приводит к уменьшению амплитуд колебаний. Найден диапазон значений жёсткости пружины на первом звене, при которых теряется устойчивость. Даны оценки значений параметров, при которых амплитуды и частоты колебаний двухзвенного аэродинамического маятника будут наибольшими.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации определяются растущим интересом к использованию возобновляемых источников энергии, в частности, ветра. Это стимулирует поиск новых направлений в строительстве ветрогенераторов. Двойной аэродинамический маятник – одна из перспективных систем, позволяющая преобразовывать энергию ветра в механическую или электрическую энергию в форме, доступной для использования.

Утверждения, выносимые на защиту, прошли серьезную апробацию.

Основные результаты работы докладывались на научной конференции «Ломоносовские чтения» (Москва, МГУ имени М.В. Ломоносова, 2016 - 2018); на Конференции-конкурсе молодых ученых НИИ механики МГУ, (2016 - 2018); на XXIX Международной научной конференции Математические Методы в Технике и Технологиях ММТТ-29, (2016); на 14-th Conference on Dynamical Systems: Theory and Applications (DSTA 2017), Lodz, (2017); на XIV Международной научной конференции «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления», ИПУ РАН, Россия, (2018); на Семинаре по аналитической механике и теории устойчивости имени В.В. Румянцева МГУ имени М.В. Ломоносова (2019).

Результаты автора по теме диссертации изложены в девяти печатных работах, четыре из которых опубликованы в рецензируемых журналах и сборниках, индексируемых в международных базах Scopus, WoS, RSCI. Автореферат работы соответствует содержанию диссертации.

Содержание диссертации, ее завершенность.

Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы, трёх глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 61 рисунок. Полный объем диссертации 104 страницы. Список литературы содержит 89 наименований.

Во введении к диссертации обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках диссертационной работы, приводится обзор научной литературы, посвященной изучению аэроупругих систем и ветроэнергетических установок, формулируется цель, ставятся задачи работы, охарактеризованы научная новизна и практическая значимость представляемой диссертации.

Первая глава посвящена постановке задачи о двухзвенном аэродинамическом маятнике.

Представлена нелинейная математическая модель исследуемой задачи как система с двумя степенями вободы. Аэродинамическое воздействие описывается в рамках квазистатического подхода. Исследуются условия устойчивости положения равновесия. Проанализировано влияние жёсткости пружин на устойчивость и стабилизацию положения равновесия. Оказалось, что наличие пружины на втором звене ведёт к стабилизации системы. Наличие же пружины на первом звене может сделать асимптотически устойчивое (в отсутствие пружин) положение равновесия

неустойчивым. Показано, что при любых положениях крыла на втором звене, найдётся такая жёсткость пружины на первом звене, что положение равновесия будет неустойчиво.

Вторая глава посвящена численному моделированию нелинейной задачи.

Показаны результаты численного моделирования в среде Maple. Изучаются предельные циклы, возникающие в системе при определённых значениях параметров. Проанализирована зависимость амплитуды колебаний от наличия пружин и различных положений крыла на втором звене. Показаны общие тенденции поведения системы при различных значениях параметров. В результате численного интегрирования (для определённых значений параметров) было получено два типа предельных циклов. При наличии пружины на первом звене увеличивается область неустойчивости (например, при параметрах, для которых наблюдалась асимптотическая устойчивость, положение равновесия становится неустойчивым). Увеличение жёсткости первой пружины (в некотором диапазоне) приводит к значительному увеличению амплитуды колебаний маятника. Вторая пружина стабилизирует систему. Подтверждён ожидаемый факт, что увеличение жёсткости пружин, приводит к увеличению частоты автоколебаний.

В третьей главе описывается экспериментальное исследование двухзвенного аэродинамического маятника, которое проводилось в дозвуковой аэродинамической трубе А-6 НИИ механики МГУ. Была разработана и изготовлена физическая модель двухзвенного аэродинамического маятника, в которой могло изменяться положение крыла на втором звене (до эксперимента устанавливалось нужное положение крыла, во время работы маятника крыло было зафиксировано). Изготовлена система регистрации движения маятника и написана специальная программа для обработки экспериментальных данных.

Подтверждено, что в системе существуют два типа предельных циклов при разных диапазонах расстояния от центра крыла до первого звена. При относительно малых расстояниях амплитуда колебаний обоих звеньев практически не зависит от скорости ветра и немного уменьшается с ростом расстояния. Амплитуда колебаний первого звена меньше, чем второго, а их частота линейно возрастает с увеличением скорости ветра. Зарегистрированные циклы качественно соответствуют циклам, полученным при численном анализе. С ростом расстояния возникает тип циклов, в

которых амплитуда первого звена больше амплитуды второго звена. Амплитуда первого звена возрастает при увеличении скорости ветра (что может быть связано с трением, оказывающим существенное влияние на затухание в области малых углов). Частота колебаний в этих циклах значительно ниже, чем в предыдущем случае.

В заключении автор формулирует ключевые результаты работы.

Замечания по тексту работы.

«В работе поставлена и решена задача поиска периодических решений в аэроупругой системе» (стр.4).

Аэроупругость – раздел прикладной механики, в котором изучается взаимодействие упругой системы с потоком газа. Обычно проводится изучение зависимости формы колебаний упругого деформируемого тела от давления окружающей среды. При этом к изучаемым явлениям относятся: изгибно-крутильный флаттер, срывной флаттер, дивергенция, вихревое возбуждение (ветровой резонанс), галопирование, бафтинг. Конечно, и представленную диссертацию можно рассматривать как исследование задач аэроупругости, но упругость здесь представлена двумя недемпфированными пружинами. Кроме того, в работе рассматривается и система без пружин. Поэтому, хотя эти пружины играют важную роль в выводах работы, отнесение предмета диссертации к классу аэроупругих систем с двумя вращательными степенями свободы несколько неточно. Рассматриваемая система – это оригинальный теоретико-механический объект с двумя степенями свободы, который базируется на конечномерной модифицированной квазистатической модели аэродинамики и с хорошей точностью описывает динамику сложной реально существующей механической системы.

В первой главе в линейном приближении задача сводится к автономной системе обыкновенных дифференциальных уравнений с необъятным количеством существенных параметров. Хотелось бы увидеть векторно-матричное представление этой системы, чтобы посмотреть на инерционную матрицу, скоростную матрицу, представленную как сумму «диссипативной» и «гироскопической» матриц, позиционную матрицу, представленную как сумму «потенциальной» и «циркулярной» матриц. Дело в том, что при этом можно было бы «подсмотреть» роль параметров. От каких параметров зависит, например, «гироскопическая» матрица, играющая

существенную роль для одновременного возникновения двух разночастотных предельных циклов, которые возникают при отсутствии пружин.

В работе показано, что квазистатическая модель не позволяет количественно описать циклы второго типа. Однако вопрос о причинах этого остается не выясненным. Было бы целесообразно более детально проанализировать влияние различных параметров на эти циклы и установить, какие факторы следует учесть, чтобы улучшить количественное совпадение расчета с экспериментом.

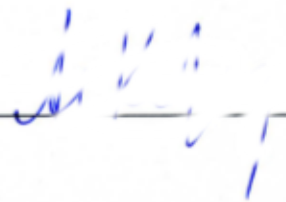
Было бы желательно уделить в работе больше внимания описанию экспериментальной установки и методики проведения экспериментов. В частности, не указана точность измерения различных параметров (скорости набегающего потока, углов отклонения звеньев, размеров маятника, характеристик пружин и т.п.), не дана оценка влияния элементов крепления на поток. Учет этих обстоятельств позволил бы оценить погрешность экспериментов и сделать более обоснованные выводы о количественном соотношении расчетов и экспериментов.

Сделанные замечания не снижают ценности полученных в диссертации результатов, не умаляет значимости диссертационного исследования и не влияют на безусловно положительную в целом оценку работы. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, считаю, что соискатель Голуб Андрей Петрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика».

Официальный оппонент доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет МЭИ »

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.02.01 - «Теоретическая механика»


Кобрин Александр Исаакович

30.10.2019

Адрес: 111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14

Телефон +7 495 362-77-19. E-mail KobrinAI@mpei.ru

Подпись профессора Александра Исааковича Кобриня заверяю
ученый секретарь Ученого совета НИУ «МЭИ»


Кузовлев Игорь Валентинович

