

**ОТЗЫВ официального оппонента  
на диссертацию на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук  
Селюцкого Юрия Дмитриевича  
на тему: «Некоторые особенности динамики тела, взаимодействующего с  
потоксом сопротивляющейся среды»  
по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин**

В диссертации Селюцкого Ю.Д. проведено параметрическое исследование механических систем, содержащих твердое тело, находящееся под воздействием воздушного потока. Используются феноменологические модели аэродинамических сил и моментов: известный квазистатический подход и разработанная автором модель присоединенного осциллятора. Это дает возможность получить строгие аналитические результаты и провести достаточно подробный параметрический анализ динамики системы.

**Актуальность исследования.** Несмотря на имеющуюся обширную литературу по этой теме остается еще множество открытых вопросов относительно эффектов, возникающих при взаимодействии твердого тела с потоком. В частности, к таким системам относятся ветроэнергетические установки, интерес к которым возрастает при освоении малозаселенных и удаленных территорий.

**Краткий обзор работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Во введении даны обзор современного состояния научной литературы по теме диссертации и общая характеристика диссертации.

В первой главе обсуждаются общие подходы к описанию воздействия потока на тело и обосновывается необходимость применения феноменологических подходов для сведения задачи к задаче динамики систем с конечным числом степеней свободы и возможности ее аналитического исследования. Описывается известный квазистатический подход, а также предложенный автором метод моделирования нестационарного воздействия потока на тело, основанный на использовании присоединенного осциллятора. В случае, когда тело движется поступательно поперек потока, в рамках модели присоединенного осциллятора нормальной аэродинамической силы получена формула, содержащая интеграл типа интеграла

Дюамеля с экспоненциальным ядром. Установлена аналогия этого подхода с подходами, известными в литературе. Модель присоединенного осциллятора использована также для описания нормальной аэродинамической силы, действующей на тело в виде крыла, совершающего малые угловые колебания в воздушном потоке (аэродинамический маятник). Показано, что в случае гармонических колебаний крыла, эта модель обеспечивает хорошее согласие расчетных значений силы с известными экспериментальными данными. Обсуждены области применимости квазистатического подхода и модели присоединенного осциллятора.

Содержание второй главы имеет общетеоретический характер. Рассматривается линейная голономная механическая система, в которой присутствуют все возможные типы сил: потенциальные, позиционные неконсервативные, диссипативные и гироскопические. Проведен анализ влияния на устойчивость тривиального равновесия изменения диагональных элементов матрицы потенциальных сил. Доказано, что при изменении величины одного из диагональных элементов от минус бесконечности до плюс бесконечности характер устойчивости (неустойчивость, устойчивость, асимптотическая устойчивость) может измениться не более чем  $2s-1$  раз, где  $s$  – число степеней свободы системы. Построен пример системы с произвольным конечным числом степеней свободы  $s$ , в которой число перемен характера устойчивости максимально.

Для систем с двумя степенями свободы проведен более подробный анализ. Предполагается, что к диагональному элементу матрицы потенциальных сил добавляется неотрицательный параметр. На основании критерия Гурвица получены условия, при выполнении которых характер устойчивости равновесия меняется три раза и два раза, когда этот параметр пробегает значения от нуля до бесконечности. В случае неполной диссипации и отсутствия позиционных неконсервативных и гироскопических сил найдены условия, при которых характер устойчивости меняется три раза. В случае полной диссипации и отсутствия гироскопических сил найдены условия на позиционные неконсервативные силы, при которых характер устойчивости меняется дважды.

В качестве иллюстрации рассмотрена задача о двойном аэродинамическом маятнике, в первом шарнире которого находится спиральная пружина. Получены условия асимптотической устойчивости равновесия, в котором оба звена ориентированы вдоль потока. Аналитически показано и подтверждено экспериментами, что при определенных условиях изменение коэффициента жесткости пружины приводит к изменению характера устойчивости два раза.

В третьей главе рассматриваются задачи движения тел вида тонких крыльев в потоке с малым углом атаки. Аэродинамические силы описываются с помощью модели присоединенного осциллятора. Вначале рассматривается задача торможения крыла, которое двигалось поступательно поперек потока. Проанализирован случай вынужденного торможения с постоянным ускорением. Показано, что при выполнении определенных условий нормальная аэродинамическая сила может менять направление два раза – на этапе торможения и после остановки тела на этапе последствия. В случае свободного торможения крыла показано, что если масса крыла превышает некоторое критическое значение, то финальное положение крыла будет смещено от начального положения в ту сторону, куда направлена начальная скорость. Если же масса меньше этого значения, то конечное положение будет смещено в противоположную сторону. Рассмотрена также задача об однозвенном аэродинамическом маятнике. Найдены достаточные условия асимптотической устойчивости положения равновесия, в котором державка маятника ориентирована вдоль скорости набегающего потока. Найден интервал значений длин державки, для которого характер устойчивости равновесия зависит от момента инерции маятника: если момент инерции меньше некоторого критического значения, имеет место неустойчивость, если больше – асимптотическая устойчивость. Этот результат сопоставлен с гидродинамическими расчетами, выполненными одним из соавторов соискателя.

В четвертой главе рассматриваются малые автономные ветроэнергетические установки различного типа. Построены замкнутые математические модели, включающие механическую и электрическую подсистемы. Аэродинамические силы описывается в рамках квазистатического подхода.

В первом разделе четвертой главы рассматривается динамика горизонтально-осевых ветроэнергетических установок в случае линейного электромеханического взаимодействия, когда момент электромагнитных сил на валу генератора пропорционален току, а ЭДС генератора пропорциональна угловой скорости с одним и тем же коэффициентом пропорциональности. Показано, что в некотором диапазоне значений нагрузки в электрической цепи существует несколько стационарных режимов, и возникает гистерезис выходной мощности и угловой скорости турбины. Получены условия асимптотической устойчивости стационарных режимов. Показано, что при определенных условиях все эти режимы могут быть неустойчивы, и возникает предельный цикл, охватывающий все неподвижные точки. Исследована эволюция фазового портрета при изменении индуктивности генератора.

Далее введена модель нелинейного электромеханического взаимодействия и исследованы стационарные режимы соответствующей динамической системы. Показана возможность существования двух однопараметрических семейств устойчивых режимов, зависящих от величины нагрузочного сопротивления, отвечающих высокоскоростным и низкоскоростным вращениям турбины. При этом существует критическое значение скорости ветра, зависящее от коэффициента нелинейности электромеханического взаимодействия. Если скорость потока меньше этого значения, существует диапазон нагрузочных сопротивлений, в котором высокоскоростные стационарные режимы отсутствуют. Если скорость потока больше этого значения, высокоскоростной режим существует при всех значениях полезной нагрузки. Все полученные результаты подтверждены данными экспериментов, проведенных в аэродинамической трубе НИИ механики МГУ с непосредственным участием соискателя.

Во втором разделе четвертой главы рассматриваются две ветроэнергетические установки колебательного типа. Вначале анализируется система, в которой колебания возникают за счет так называемого эффекта галопирования. Тело, взаимодействующее с потоком, представляет собой прямоугольную призму. К этому телу с помощью пружины крепится материальная точка, которая, в свою очередь, прикреплена пружиной к неподвижному основанию. Исследована устойчивость положения

равновесия системы. Получены условия, при которых при увеличении жесткости одной из пружин крепления характер устойчивости равновесия меняется два раза. Показано, что в рассматриваемой системе критическая скорость потока, при которой равновесие становится неустойчивым, меньше, чем в системе, в которой движется только одно тело (призма). С помощью методов малого параметра получены приближенные формулы для амплитуд и частоты колебаний тел системы. Показано, что в рассматриваемой системе средняя мощность при колебаниях больше, чем в системе с одним подвижным телом. Проведено численное моделирование, результаты которого подтверждают выводы, полученные аналитически.

Исследована также динамика ветроэнергетической установки колебательного типа, подвижный элемент которой представляет собой однозвенный аэродинамический маятник с упруго закрепленной точкой подвеса. Возбуждение колебаний здесь связано с эффектом флаттера. Исследована зависимость положений равновесия от параметров. Указаны условия, при которых характер устойчивости равновесий (как тривиального, при которых державка ориентирована вдоль скорости потока, так и «косых») два раза чередуется при изменении жесткости пружины крепления. В предположении, что некоторые из параметров являются малыми, с помощью метода гармонического баланса получены приближенные формулы для амплитуды и частоты предельных циклов. Численно исследована зависимость средней за период выходной мощности от ряда параметров системы. Отмечено, что положение центра масс маятника на державке оказывает существенное влияние на мощность. Исследовано влияние момента инерции маятника на устойчивость тривиального равновесия и на область существования предельного цикла. Показано, что уменьшение момента инерции при определенных условиях на другие параметры приводит к глобальной устойчивости тривиального положения равновесия.

В заключении перечислены основные результаты работы и указаны возможные направления дальнейшего исследования.

Диссертация Селюцкого Ю.Д. представляет собой законченное и цельное научное исследование, в котором получены новые важные результаты в области динамики твердых тел, испытывающих воздействие потока сопротивляющейся среды.

Результаты, представленные в диссертации, достоверны и обоснованы. Это гарантируется тем, что они получены с помощью математических методов, соответствующих исследуемым задачам. Результаты подтверждены экспериментально либо путем сравнения с результатами численного моделирования, проведенного методами вычислительной гидродинамики.

Все результаты, выносимые на защиту, опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных профильных журналах и были доложены на российских и международных конференциях, съездах и семинарах по механике.

Все результаты, выносимые на защиту, получены лично соискателем. Вклад соискателя четко определен и отделен от вклада соавторов.

**Теоретическая и практическая значимость.** Полученные в диссертации Селюцкого Ю.Д. результаты дают новые представления об особенностях динамики тел, находящихся под воздействием потока среды, и могут быть использованы, в частности, при проектировании малых автономных ветроэнергетических установок.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

**Замечания:**

1. В электрическую подсистему модели ветроэнергетических установок целесообразно было бы включить аккумуляторную батарею.

2. При рассмотрении ветроэнергетических установок пропеллерного типа интересно было бы рассмотреть поворотные лопасти пропеллера с выбором оптимального угла поворота в зависимости от меняющихся скорости ветра и полезной нагрузки в электрической цепи.

3. Динамика ветроэнергетических установок колебательного типа исследована аналитическими и численными методами. Было бы целесообразно провести соответствующие эксперименты и проверить предсказания, полученные в рамках используемых подходов к описанию аэродинамических сил.

4. В системах, рассмотренных в диссертации, характер устойчивости равновесия при изменении диагонального коэффициента матрицы потенциальных сил меняется два раза. Следовало бы привести пример конкретной механической системы с двумя

степенями свободы, в которой наблюдается трехкратная смена характера устойчивости.

5. Замеченные опечатки (слева указаны номер страницы и строки):

19.21 "Вольтерра" - "Вольтерры"

24.11 "в динамике системе" - "в динамической системе"

50.16 "тело имеет форму тонкого прямоугольного крыла  $ABCD$ " -  
не соответствует Рис.(1.4),(1.7),(3.6).

66.1 "учесть учесть" - "учесть"

67.13 "1.33" - "(1.33)"

69.1 "1,36" "1.35" - "(1.36)" "(1.35)"

96.14 "М станет" - "М"

97.6 "2.35" - "(2.35)"

155.7 "этом этом" - "этом"

Указанные замечания имеют характер пожеланий для дальнейшего развития работы и не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин (по физико-математическим наукам), а именно следующим ее направлениям: Классическая механика и аналитическая динамика, Теория устойчивости движения, Прикладные проблемы устойчивости равновесия и движения механических систем, Теория колебаний механических систем, Механика твердого тела и систем твердых тел, Динамика летательных аппаратов и космических конструкций, а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, и оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Селюцкий Юрий Дмитриевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник отдела механики Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук"

Степанов Сергей Яковлевич

Контактные данные:

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

01.02.01 Теоретическая механика

Адрес места работы:

119333, Москва, ул. Вавилова, 40,  
ФИЦ ИУ РАН, отдел 24 механики  
Тел.: +7(499)135-43-09, +7(499)135-61-59

Подпись сотрудника .....  
ФИЦ ИУ РАН С.Я. Степанова удостоверяю: