

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

Диссертационная работа Селюцкого Ю.Д. посвящена исследованию особенностей динамики механических и электромеханических систем, в состав которых входит твердое тело,двигающееся в потоке сопротивляющейся среды и испытывающее воздействие аэродинамических сил. Отдельное внимание уделяется изучению влияния изменения жесткости по одной из обобщенных координат на характер устойчивости равновесия. Результаты, полученные в работе, увязываются с вопросами проектирования различных малых ветроэнергетических установок.

**Актуальность темы исследования**

Выявление и описание особенностей динамики систем, содержащих тело, движущееся в потоке сопротивляющейся среды, безусловно, является актуальным. Кроме того, важной задачей является разработка и анализ областей применимости упрощенных моделей, позволяющих свести задачу о движении тела в потоке среды к исследованию системы обыкновенных дифференциальных уравнений. С точки зрения приложений актуальность работы обусловлена возможностью применения ее результатов при разработке и проектировании малых ветроэнергетических установок.

**Краткий обзор содержания диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (202 наименования). Объем работы составляет 263 страницы.

Во введении обосновывается актуальность исследования, описана новизна и практическая ценность работы и дан анализ научной литературы по рассматриваемой тематике.

В первой главе описываются подходы к описанию нестационарного аэродинамического воздействия на тело со стороны потока среды, которые в

дальнейшем используются в работе. Это квазистатический подход и модель присоединенного осциллятора (которая была предложена в кандидатской диссертации соискателя и представляет собой некоторое развитие квазистатического подхода). Продемонстрированы аналогии между результатами, получаемыми с помощью присоединенного осциллятора, и результатами, полученными (другими методами) в работах С.М. Белоцерковского. Модель присоединенного осциллятора применена для описания угловых колебаний крыла, показано, что при надлежащем выборе параметров она согласуется с данными экспериментов. Описаны ограничения на возможность применения каждого из указанных подходов.

Во второй главе ставится и решается задача о чередовании характера устойчивости равновесия линейной механической системы с голономными связями при изменении диагонального элемента матрицы потенциальных сил. Получена точная верхняя оценка числа таких чередований для систем с произвольным конечным числом степеней свободы.

Для систем с двумя степенями свободы найдены достаточные условия на параметры системы, при выполнении которых характер устойчивости равновесия изменится определенное число раз (два или три), когда диагональный элемент матрицы потенциальных сил изменяется от нуля до бесконечности.

Возможность проявления данного эффекта в реальных механических системах показана на примере двухзвенного аэродинамического маятника. Потеря устойчивости равновесия «вдоль потока» при увеличении жесткости пружины, установленной в точке подвеса первого звена, подтверждена экспериментом в аэродинамической трубе.

Эта тема вновь возникает позднее, в четвертой главе, при рассмотрении динамики систем с двумя степенями свободы, где также отмечаются ситуации, в которых изменение коэффициента жесткости по одной из обобщенных координат приводит к чередованию характера устойчивости равновесия.

В третьей главе рассматривается движение крыла с симметричным профилем в потоке среды. Аэродинамическое воздействие моделируется с помощью

присоединенного осциллятора. В случае, когда крыло может совершать угловые колебания (фактически, представляет собой флюгер), показано, что существует интервал значений длины державки, в котором тривиальное равновесие асимптотически устойчиво при малых значениях момента инерции маятника и неустойчиво при больших его значениях. Этот эффект подтвержден расчетами, проведенными с помощью методов вычислительной гидродинамики. Для вынужденного поступательного равномерного торможения крыла (движущегося поперек потока) показано, что нормальная аэродинамическая сила в случае достаточно большого ускорения меняет свое направление, причем на определенном этапе движения она препятствует торможению.

В четвертой главе подробно анализируется динамика малых ветроэнергетических установок. Для установки с горизонтальной осью вращения установлено, что в определенном интервале значений внешней нагрузки существует несколько стационарных режимов. Это приводит к возникновению гистерезиса при изменении внешней нагрузки. Предложена модель нелинейного электромеханического взаимодействия. Проанализировано влияние этой нелинейности на стационарные режимы, изучена перестройка множества этих режимов при увеличении скорости потока.

Полученные результаты подтверждены данными экспериментов.

В этой главе рассматриваются также две электромеханические системы, моделирующие колебательные ветроустановки. Первая система содержит так называемое плохообтекаемое тело (параллелепипед), а также материальную точку, упруго прикрепленную к параллелепипеду и к неподвижному основанию. Исследуется влияние параметров системы на устойчивость равновесия и на характеристики колебаний (в том числе, на среднюю мощность за период). При этом используются как аналитические методы (в частности, метод малого параметра), а также численное моделирование.

Вторая система представляет собой однозвенный аэродинамический маятник, аналогичный рассмотренному в третьей главе, но его точка закрепления предполагается упруго закрепленной и способной перемещаться вдоль неподвижной

прямой, перпендикулярной скорости потока. С этой точкой соединен постоянный магнит, который может двигаться внутри катушки. Исследуются неподвижные точки соответствующей динамической системы и их устойчивость, а также периодические решения. Изучено влияние положения центра масс маятника на державке на среднюю мощность на периоде. Предложена стратегия параметрического управления, которая обеспечивает, с одной стороны, гашение колебаний в ситуации, когда скорость потока является слишком большой, а с другой стороны – потерю устойчивости в ситуации, когда скорость потока оказывается в «рабочем» диапазоне.

В заключении формулируются основные результаты работы и приводятся возможные направления дальнейших исследований.

### **Новизна результатов**

В работе Селюцкого Ю.Д. получен ряд новых результатов, в том числе:

Для голономных линейных механических систем дана оценка количества чередований характера устойчивости тривиального равновесия при изменении диагонального элемента матрицы потенциальных сил. Для систем с двумя степенями свободы получены достаточные условия для двукратного и трехкратного чередования. Эффект подтвержден экспериментально для двухзвенного аэродинамического маятника.

Для однозвенного аэродинамического маятника описан эффект зависимости характера устойчивости равновесия от величины момента инерции.

Для горизонтально-осевой ветроэнергетической установки описан эффект гистерезиса угловой скорости на стационарном режиме при изменении внешней нагрузки. Построена модель нелинейного электромеханического взаимодействия и описана перестройка множества стационарных режимов при изменении скорости потока.

Для колебательной ветроэнергетической установки, использующей эффект галопирования, показано, что добавление в систему дополнительного тела позволяет увеличить выходную мощность и уменьшить скорость потока, при которой возникают колебания.

Установлена возможность стабилизации (дестабилизации) аэродинамического маятника с упруго закрепленной точкой подвеса за счет уменьшения (увеличения) момента инерции маятника. Показано, что средняя за период мощность, которую можно получить с помощью такого маятника, немонотонно зависит от положения центра масс на державке.

### **Достоверность положений, выносимых на защиту, научных выводов и рекомендаций**

Полученные в диссертации результаты, а также изложенные в ней выводы и рекомендации являются обоснованными и достоверными, что обеспечивается корректностью используемых математических моделей и методов исследования (как аналитического, так и численного). Аналитические результаты дополняются численным моделированием и подтверждаются данными экспериментов.

Результаты, выносимые на защиту, докладывались на многих международных конференциях и семинарах, как в России, так и за рубежом, и, таким образом, прошли необходимую апробацию. Основные результаты соискателя по теме диссертации опубликованы в 32 работах, в том числе в 26 статьях в журналах, индексируемых в международных базах Scopus, Web of Science, а также входящих в список ВАК.

### **Соответствие автореферата диссертации**

Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации.

### **Теоретическая и практическая значимость.**

В диссертационной работе Селюцкого Ю.Д. описан ряд интересных эффектов, возникающих в динамике тела, на которое действуют аэродинамические силы. Проведенные исследования позволяют, среди прочего, точнее очертить область применимости упрощенных феноменологических подходов к описанию нестационарного аэродинамического воздействия. На базе полученных результатов можно формулировать рекомендации (и некоторые такие рекомендации даются непосредственно в работе) по разработке, проектированию и сравнительному

анализу малых автономных ветроэнергетических установок различных типов, а также созданию алгоритмов управления такими устройствами.

### **Замечания.**

1. Я рекомендовал бы соискателю провести более детальное исследование бифуркаций периодических решений, возникающих в рассмотренных колебательных системах, и, в частности, проанализировать реализующиеся здесь сценарии перехода к детерминированному хаосу.
2. В математической модели ветроэнергетической установки с горизонтальной осью вращения, которая предложена в работе, не учитываются потери энергии, обусловленные наличием вязкого трения. На мой взгляд, было бы полезно проанализировать влияние этого фактора на динамику системы.
3. Было бы желательно уделить в тексте несколько больше внимания описанию специфики малых ветроэнергетических установок по сравнению с большими.

Вместе с тем, указанные замечания 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; Управление движением, наблюдаемость и идентификация механических систем; 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, а также 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,  
главный научный сотрудник лаборатории механики систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

Маркеев Анатолий Павлович

Контактные данные:

e-mail: [markeev@ipmnet.ru](mailto:markeev@ipmnet.ru)

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.03.01 Астрометрия и небесная механика

Адрес места работы:

119526, Москва, пр. Вернадского, д.101, корп.1

ИПМ им. А.Ю. Ишлинского РАН, лаборатория механики систем

Тел.: +7 (495) 434 30 60; e-mail: [markeev@ipmnet.ru](mailto:markeev@ipmnet.ru)

Подпись сотрудника .....

ИПМ им. А.Ю. Ишлинского РАН А.П. Маркеева удостоверяю: