

**ОТЗЫВ официального оппонента  
о диссертации 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**

Диссертационная работа Ю.Д. Селюцкого посвящена решению ряда новых научных проблем, связанных с исследованием динамики электромеханических систем, взаимодействующих с потоком сопротивляющейся среды. Специфика упомянутых проблем, имеющих не только теоретический, но и практический интерес, обусловлена разнообразием различных подходов к описанию нестационарного воздействия потока среды на твердое тело и вытекающей из этого необходимостью анализа областей их применимости. Кроме того, одни и те же, по своей сути, колебания тел в потоке сопротивляющейся среды могут являться вредными, например, в авиации и в строительстве, поскольку они приводят к усиленному износу и разрушению конструкций, и в то же время могут являться полезными в энергетике для преобразования энергии потока в электрический ток. Поэтому понятен интерес исследователей из различных областей науки и техники к упомянутому кругу проблем. В частности, одной из важных отраслей промышленности, которая стимулирует исследования в области динамики тел в потоке среды, является ветроэнергетика. При этом в научной литературе практически отсутствуют работы, опирающиеся на методы качественного анализа для аналитического исследования систем, описывающих совместную динамику малых автономных ветротурбин и процессов, происходящих в электрических цепях. В связи с вышеизложенным не вызывает сомнения актуальность и своевременность появления данной диссертационной работы, нацеленной на изучение особенностей динамики систем тел, взаимодействующих с потоком сопротивляющейся среды.

Перейдем к общей характеристике диссертационной работы Ю.Д. Селюцкого. По существу, диссертационная работа Ю.Д. Селюцкого представляет собой всестороннее систематическое исследование ряда особенностей динамики систем тел,

взаимодействующих с потоком сопротивляющейся среды. При этом теоретические результаты диссертации выходят за рамки исследования собственно ветроэнергетических систем. Поэтому они вносят существенный вклад в динамику нелинейных электромеханических систем. Важной особенностью диссертации является то, что апробация многих полученных в ней новых результатов прошла не только на конференциях и семинарах, но и в условиях реальных лабораторных испытаний на конкретных устройствах, созданных в целях решения актуальных задач, выдвинутых запросами ветроэнергетики.

По сути, автор диссертационной работы решил целый комплекс задач, объединенных единой тематикой и общей направленностью на выявление качественных свойств и особенностей динамики систем тел, взаимодействующих с потоком сопротивляющейся среды, не прибегая к детальному численному моделированию течения сплошной среды вокруг движущегося в ней тела. К их числу относятся: задача о движении в потоке тонкого крыла с присоединенным осциллятором, задача изучения влияния изменения потенциальных сил на устойчивость равновесия механической системы, задача исследования малых колебаний крыла аэродинамического маятника, задача изучения динамики ветроэнергетических установок колебательного типа. Все упомянутые задачи тщательно проанализированы в соответствующих разделах диссертации, что позволяет получить общее представление о качественных особенностях динамики систем тел, взаимодействующих с потоком сопротивляющейся среды.

Во-первых, проанализирована модель движущегося в потоке тонкого крыла с присоединенным осциллятором. Установлена взаимосвязь между описанием нестационарного аэродинамического воздействия на крыло с присоединенным осциллятором с описанием, получаемым с помощью интеграла Дюамеля с экспоненциальным ядром.

Во-вторых, проанализировано влияние потенциальных сил на характер устойчивости равновесия системы с  $s$  степенями свободы при изменении одного диагонального элемента матрицы потенциальных сил. Установлено, что характер устойчивости равновесия может измениться не более  $2s-1$  раз. Для механической

системы с двумя степенями свободы получены условия, при которых характер устойчивости тривиального равновесия меняется два и три раза. Общие выводы применены к задаче о двухзвенном аэродинамическом маятнике.

В-третьих, рассмотрены малые колебания крыльев. Показано, что при торможении тонкого крыла, поступательно движущегося поперек потока среды, нормальная сила, действующая на крыло, не меняет направление, если ускорения крыла меньше определенного критического значения, и меняет направление два раза, если ускорение превышает это критическое значение. Исследована устойчивость положения равновесия «по потоку» однозвенного аэродинамического маятника.

В-четвертых, исследована динамика двух ветроэнергетических установок колебательного типа, основанных на использовании эффектов галопирования и флаттера. Даны оценки характеристик периодических режимов, включая выходную мощность установок.

В результате выполненных исследований выявлено порядка десяти новых нетривиальных качественных особенностей ветроэнергетических установок с горизонтальными и вертикальными осями вращения (такие, как эффект «отсоединенной» массы, бифуркации свойств устойчивости и неустойчивости, гистерезис выходной мощности, гистерезис угловой скорости ветротурбины) и сформулированы практически важные рекомендации, направленные на подбор оптимальных массово-габаритных характеристик ветроэнергетических установок, на подбор оптимальных значений нагрузочных сопротивлений, на повышение выходной мощности ветроэнергетических установок, на обеспечение наиболее эффективных режимов их работы. Подробный перечень практических выводов и полученных результатов приведен на шести страницах диссертации - с 232 по 237.

Все упомянутые исследования потребовали от автора не только применения аналитических методов исследования, лежащих в основе данной работы, но также экспериментальных исследований и компьютерного моделирования. Полученные аналитические результаты подтверждены сравнением с результатами численного моделирования на базе модифицированного метода дискретных вихрей. Таким образом, положения, вынесенные на защиту, являются обоснованными, а

соответствующие им научные выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, - достоверными.

В целом диссертационная работа Ю.Д. Селюцкого имеет существенное значение для механики. Результаты, полученные в диссертационной работе, могут служить основой для математического моделирования, последующего динамического анализа, а также в практике разработки и конструирования ветроэнергетических систем.

Все утверждения диссертации строго обоснованы, каких-либо пробелов в доказательствах не обнаружено. Тема диссертации соответствует специальности 1.1.7 – «Теоретическая механика, динамика машин», а именно следующим ее направлениям: 1. Классическая механика и аналитическая динамика; 2. Теория устойчивости движения. Прикладные проблемы устойчивости равновесия и движения механических систем; 3. Теория колебаний механических систем; 6. Механика твердого тела и систем твердых тел; 12. Механика робототехнических и мехатронных систем; 13. Динамика систем, состоящих из абсолютно твердых и деформируемых тел, в том числе машин, приборов и конструкций; 14. Математическое и компьютерное моделирование кинематики и динамики механических систем, в том числе машин, приборов и их элементов при динамических, статических, тепловых и других видах воздействий.

Диссертация написана достаточно аккуратно. Тем не менее, в качестве недостатков можно отметить, например, следующее:

1. На с.38 в последнем абзаце упоминается «угол между проекцией вектора скорости на некоторую плоскость ...». Поскольку проекция вектора скорости является скаляром, то в определении упомянутого угла следовало бы изменить формулировку, начав ее словами «угол между составляющей вектора скорости в некоторой плоскости ...».

2. На с. 42 приводятся представления нескольких векторов через их координаты в виде строчных выражений, заключенных в фигурные скобки. Помимо отсутствия естественных для такого представления знаков транспонирования и неудачного для таких целей использования фигурных скобок вместо общепринятых круглых, существенным недостатком является отсутствие разделительных знаков (запятых или

точек с запятыми) между координатами, что приводит к неоднозначности в понимании введенных векторов.

3. Приведенные на с. 46 ссылки на литературу даны не в том формате, который используется в диссертации: вместо порядковых номеров приведены фамилии авторов. При этом казус в том, что приведенные фамилии отсутствуют в списке литературы.

Из замечаний редакционного характера отметим следующие:

1. На с.24 во втором абзаце имеется опечатка: «... анализ бифуркаций Андронова-Хопфа в динамике системе, ...».

2. На с.25 в последнем абзаце имеется опечатка: «ветротербин».

3. На с. 37, рис. 1.1, слишком мелкие и поэтому плохоразличимые цифры на координатных осях. Аналогичный недостаток имеется на с. 153, рис. 4.5.

Отмеченные недостатки не влияют на общее положительное впечатление о диссертационной работе и не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация представляет собой законченное научное исследование актуальной проблемы теоретической механики и ветроэнергетики, в которой получены новые и важные результаты. Достоверность и строгая обоснованность полученных результатов не вызывают сомнений, а их использование представляется полезным для дальнейших теоретических исследований динамики электромеханических систем, а также при разработке различных энергетических проектов, связанных с использованием воздействия потоков сплошной среды на механические системы.

По теме диссертации опубликованы 32 статьи в научных журналах, из них 7 статей в журнале «Известия РАН», 3 статьи в журнале «Доклады РАН», 9 статей в иностранных журналах, индексируемых в зарубежных наукометрических базах Scopus и WoS, 3 статьи в трудах конференций, проиндексированных в Scopus и WoS. Опубликованные работы достаточно полно отражают содержание диссертации. Полученные результаты достаточно полно апробированы. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация носит законченный характер, выполнена на высоком научном уровне, удовлетворяет 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 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, профессор кафедры теоретической и прикладной механики математико-механического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Тихонов Алексей Александрович

Контактные данные:

e-mail: a.tikhonov@spbu.ru

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

Адрес места работы:

199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9, СПбГУ, кафедра теоретической и прикладной механики математико-механического факультета. Тел.: +7 (812) 363-62-33; e-mail: a.tikhonov@spbu.ru

Подпись профессора кафедры теоретической и прикладной механики СПбГУ А.А. Тихонова удостоверяю: