

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Сатанова Андрея Андреевича  
«Динамика многомассовых систем, взаимодействующих с  
аэродинамическими потоками: эксперимент и численное моделирование»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин

### **Актуальность темы диссертации**

Проектирование и безопасная эксплуатация современных сложных инженерных объектов (высотные здания, большепролетные сооружения, ветроэнергетические установки) неразрывно связаны с решением задач взаимодействия конструкций с воздушными потоками. Существующие нормативные методики зачастую не способны адекватно учесть аэродинамические характеристики объектов уникальной формы, их взаимное влияние в составе систем, а также процессы накопления повреждений в материалах при циклических ветровых и резонансных нагрузках. Это требует развития методов, интегрирующих подходы теоретической механики, гидрогазодинамики и механики поврежденной среды.

Представленная диссертационная работа направлена на решение именно этих комплексных задач. Автор обоснованно показывает, что предложенный им подход, основанный на применении упрощенных многомассовых моделей в связке с результатами аэродинамического моделирования, позволяет существенно снизить вычислительные затраты при сохранении необходимой точности прогноза динамического поведения и оценке ресурса конструкций. Таким образом, актуальность темы не вызывает сомнений и полностью подтверждается как анализом современного состояния проблемы, так и потребностями инженерной практики.

**Научная новизна работы** заключается в получении следующих оригинальных результатов, вносящих вклад в развитие методов динамического анализа конструкций:

– Разработана и апробирована методика экспериментального определения аэродинамических нагрузок на объекты сложной геометрической формы. Её ключевое отличие от известных подходов состоит в том, что она позволяет получать безразмерные коэффициенты давления для всего диапазона скоростных режимов на основе измерений при единственной, фиксированной скорости набегающего потока. Это существенно сокращает объём необходимых экспериментальных исследований при сохранении полноты аэродинамического портрета конструкции.

– Предложен эффективный вычислительный способ определения динамических характеристик (частот и форм собственных колебаний) сложных конструкций путём их редукции к упрощённым многомассовым моделям с конечным числом степеней свободы. Данный способ, реализованный в виде зарегистрированного программного обеспечения, позволяет обойти трудоёмкое решение полных пространственных задач

От задач теоретической механики  
и контроля исполнения  
документов МАИ

«23» 12 2025 г.

деформируемого твёрдого тела, обеспечивая при этом удовлетворительную для инженерной практики точность.

– Создан оригинальный алгоритм синтеза расчётных анемограмм, имитирующих нестационарное ветровое воздействие с заданными статистическими и спектральными свойствами. Алгоритм интегрирует как параметры проектируемого объекта (собственные частоты), так и климатические особенности района строительства, что позволяет целенаправленно моделировать наихудшие с точки зрения резонанса сценарии нагрузки для динамического расчёта.

– Сформулирована комплексная методология исследования колебаний конструкций под аэродинамическим воздействием, основанная на последовательной интеграции результатов детального гидрогазодинамического моделирования с динамическим расчётом многомассовых моделей. Методология включает процедуру перехода от поля аэродинамического давления к векторам сосредоточенных сил, что обеспечивает корректную постановку задач динамики систем твёрдых тел.

– В результате параметрического исследования установлены принципы рационального формообразования высотных объектов с интегрированными ветроэнергетическими установками. На количественной основе выявлены и оптимизированы компромиссы между энергоэффективностью, аэродинамическими нагрузками на несущую конструкцию и её общей жёсткостью, что представляет собой новое прикладное знание на стыке динамики машин и энергоэффективного строительства.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 164 наименований. Общий объем работы – 149 страниц, включая 95 рисунков и 11 таблиц. Структура работы логична и отражает последовательность решения поставленных задач.

**Во введении** диссертации всесторонне обоснована актуальность исследования сложной динамики многомассовых систем под аэродинамическим воздействием. Чётко сформулированы цель и взаимосвязанный комплекс задач работы, определены объект и предмет исследования.

**Первая глава** посвящена теоретическим основам и методологии исследования. В ней представлен анализ современных проблем расчёта конструкций на динамические и циклические нагрузки, обоснована взаимосвязь задач колебаний с механикой повреждённой среды. Детально описана применяемая автором комплексная методика, включающая экспериментальную установку (аэродинамическая труба) и подходы к верифицированному численному моделированию в пакете *ANSYS CFX*. Эта глава служит фундаментом для всего последующего прикладного исследования.

**Вторая глава** содержит прикладные исследования большепролетных объектов уникальной формы (арочные покрытия, криволинейные оболочки).

На их примере проведено сопоставление данных физического эксперимента и *CFD*-моделирования, показавшее их удовлетворительную сходимость. Автор убедительно демонстрирует, что для сложных геометрий распределение ветровой нагрузки не описывается упрощёнными нормативными схемами. Важным практическим результатом является апробация принципа редукции непрерывного аэродинамического давления к системе сосредоточенных сил, прикладываемых к узлам упрощённой многомассовой модели.

**Третья глава** развивает подходы второй главы применительно к высотным зданиям. Исследование ведётся в двух ключевых направлениях: изучение аэродинамики одиночных объектов сложной архитектуры и анализ интерференционного взаимного влияния зданий в составе системы. Количественно оценено изменение результирующих сил и моментов в зависимости от взаимного расположения объектов. Отдельный значимый раздел посвящён параметрической оптимизации формы высотного здания с интегрированными ветрогенераторами, в ходе которой был найден рациональный компромисс между энергоэффективностью, аэродинамическими нагрузками и конструктивной жёсткостью.

**Четвертая глава** представляет собой синтез разработанных методов в единый расчётный комплекс для решения инженерных задач. В главе реализована последовательная цепочка анализа: от генерации расчётных анемограмм, моделирующих нестационарное ветровое воздействие, через определение динамических характеристик конструкций с помощью многомассовых моделей к прямому расчёту вынужденных колебаний, оценке напряжённо-деформированного состояния и накопления усталостных повреждений. Данный подход апробирован на комплексных примерах оценки последствий штормового ветра для большепролетных и высотных зданий, а также сейсмического анализа с учётом резонансных явлений.

**В заключении** систематизированы и обобщены основные научные и практические результаты, полученные в ходе исследования. Сформулированы окончательные выводы, которые соответствуют поставленным задачам и подтверждают положения, выносимые на защиту. Подведён итог, демонстрирующий решение актуальной научной проблемы и достижение цели работы.

**Практическая значимость работы** заключается в создании комплексной методики и инструментария для повышения безопасности, надёжности и энергоэффективности проектирования уникальных строительных объектов (большепролетных и высотных зданий сложной формы). Разработанный подход, включающий верифицированные методы аэродинамического моделирования, алгоритмы генерации расчётных ветровых воздействий, динамический анализ на основе многомассовых моделей и оценку накопления усталостных повреждений, позволяет перейти от упрощённых нормативных схем к точному учёту реальных нагрузок и резонансных явлений. Одновременно установлены принципы рационального формообразования объектов с интегрированными ветрогенераторами, оптимизирующие баланс между энерговыработкой и конструктивной жёсткостью.

Результаты работы внедрены в производственные процессы ООО «АТОМЭЛЕКТРОПРОЕКТ», используются в образовательной деятельности ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» (ННГАСУ) и при создании систем мониторинга в рамках проекта «Техноплатформа 2035», обеспечивая прямой экономический и технический эффект.

**Достоверность и обоснованность результатов** обеспечивается применением фундаментальных положений теоретической механики, аэродинамики, теории колебаний и механики поврежденной среды, комплексным использованием взаимодополняющих методов физического эксперимента и численного моделирования и внедрением результатов в реальную инженерную практику.

### **Публикации и апробация**

По теме диссертации опубликовано 26 научных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, входящих в международные базы данных, 3 статьи в изданиях из перечня ВАК по специальности 1.1.7. «Теоретическая механика, динамика машин», 6 статей в изданиях из перечня ВАК по иным специальностям, 2 монографии, 2 программы для ЭВМ. Количество и качество публикаций соответствуют требованиям ВАК для кандидатских диссертаций.

Апробация результатов диссертационной работы была проведена на 11 российских и международных конференциях, включая XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (Санкт-Петербург, 2023), XII Всероссийскую научную конференцию «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» (Москва, 2022), XLVII Международную молодежную научную конференцию «Гагаринские чтения» (Москва, 2021) и другие авторитетные научные форумы.

### **Замечания по диссертации и автореферату**

1. На рис. 1.1 в) представлены первые три формы собственных колебаний многомассовой системы. Однако, если система линейна, то первой форме колебаний должна соответствовать форма основного тона, совпадающая по форме с первыми формами (основными тонами), представленными на рис. 1.1 а) и б).
2. На стр. 18 указано, что вязкость принята равной  $1,45 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ , что вызывает вопросы, т.к. вязкость воздуха около  $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$  или  $15 \text{ мм}^2/\text{с}$ .
3. В диссертации автором не акцентируется вопрос, что рассмотрена несвязанная задача взаимодействия деформируемых тел (зданий) с потоком воздуха. Следовало бы, например, в разделе 2 более четко указать, что первоначально определяются ветровые нагрузки на недеформированное тело (абсолютно жесткое здание), а затем полученные законы распределения давления и скоростей используются как нагрузки для оценки упругой деформации тела (здания), а динамику взаимодействия упруго-деформируемой конструкции и потока воздуха оценивают, используя собственные частоты конструкции и вводя конструкционное демпфирование.

4. В пункте 4.1 не совсем ясно учитывались ли в коэффициентах системы (4.2) ветровые нагрузки. Если да, то каким образом.

5. На основе решения (4.3) автор приводит значения первых двух собственных частот, соответствующих основному тону и первому обертому колебаний. Ранее в главе 1 (стр. 14) отмечается, что «в реальных конструкциях необходимо учитывать не менее трех форм собственных колебаний, если период первой формы собственных колебаний  $T_1 > 0,4с$ , и только первой при  $T_1 \leq 0,4с$ ». Найденная автором первая частота показывает, что  $T_1 \leq 0,4с$ , тогда возникает вопрос: зачем далее рассматривается восьмимассовая система, если расчет показал, что достаточно рассмотрения одномассовой системы?

6. В табл. 4.1, представлено решение системы (4.5) для двух первых частот собственных колебаний, имеется явная опечатка: два раза указана относительная амплитуда  $\varphi_{11}$ . Кроме того, не совсем ясно почему в таблице отсутствуют  $\varphi_{18}$ ,  $\varphi_{28}$ ?

7. Как указано на стр. 118 в табл. 4.8 представлены данные по высотному зданию в виде стержня с 7-ю сосредоточенными массами. Однако, на схеме, в указанной таблице, приведен стержень с 8-ю сосредоточенными массами.

Сформулированные замечания носят характер уточнений и рекомендаций и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

### **Соответствие содержания диссертации и автореферата указанной специальности**

Содержание и полученные результаты диссертационной работы соответствуют паспорту научной специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин в пунктах 13, 14, 15.

Автореферат диссертации полностью отражает содержание работы и ее основные результаты.

### **Заключение**

Диссертационная работа Сатанова Андрея Андреевича, представленная к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук, является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научном уровне и посвященной актуальной научной задаче в области теоретической механики и динамики машин.

В работе получены новые научные результаты, имеющие теоретическое и практическое значение. Разработанные методики экспериментальных и численных исследований, алгоритмы моделирования и программное обеспечение могут быть использованы в инженерной практике при проектировании различных конструкций, подверженных аэродинамическим воздействиям.

Диссертационная работа «Динамика многомассовых систем, взаимодействующих с аэродинамическими потоками: эксперимент и численное моделирование» соответствует научной специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин и удовлетворяет требованиям

пунктов 9-14 Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842 «О порядке присуждения ученых степеней» (с изменениями и дополнениями), предъявляемым ВАК при Минобрнауки России к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук.

Считаю, что Сатанов Андрей Андреевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.

**Официальный оппонент:**

Профессор кафедры «Прикладная математика и системный анализ»  
СГТУ имени Гагарина Ю.А.,  
д.т.н., профессор



В.С. Попов

« 19 » 12 2025 г.

Полное наименование организации: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Адрес места работы: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

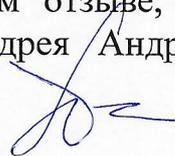
Телефон+7 (845) 299 88 25

E-mail: vic\_p@bk.ru

Научная специальность, по которой защищена докторская диссертация: 01.02.06 «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

Ученое звание профессора по кафедре «Теплогазоснабжение, вентиляция, водообеспечение и прикладная гидрогазодинамика».

Я, Попов Виктор Сергеевич, даю свое согласие на включение своих персональных данных, содержащихся в настоящем отзыве, в документы, связанные с защитой диссертации Сатанова Андрея Андреевича, и их дальнейшую обработку.



В.С. Попов

Подпись профессора, доктора технических наук Попова Виктора Сергеевича удостоверяю.

Ученый секретарь Ученого Совета  
СГТУ имени Гагарина Ю.А.



А.В. Потапова

С отзывом ознакомлен  
13.01.2026 @МТ АА Сатанов