

на правах рукописи



САТАНОВ Андрей Андреевич

ДИНАМИКА МНОГОМАССОВЫХ СИСТЕМ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ С
АЭРОДИНАМИЧЕСКИМИ ПОТОКАМИ: ЭКСПЕРИМЕНТ И ЧИСЛЕННОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ

Специальность: 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва

2025 г.

Диссертация выполнена в ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова – Грехова Российской академии наук»

Научный
руководитель:

Доктор физико-математических наук, профессор
Ерофеев Владимир Иванович

Официальные
оппоненты:

Попов Виктор Сергеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная математика и системный анализ» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Крайнов Артем Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетические установки и тепловые двигатели», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»

Защита диссертации состоится 30 января 2026 года в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.13, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4 и на сайте:

https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=186089

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.327.13, к.т.н.



Орехов Александр Александрович

Актуальность работы. Изучение колебаний механических систем наблюдается с самых первых упоминаний механики и, скорее всего, появилось намного раньше, чем человечество научилось фиксировать свои мысли и суждения с помощью письменности. Тем не менее, данный раздел механики и его расширение до механики волновых процессов являются крайне актуальными ввиду целого ряда факторов, возникающих неразрывно друг от друга:

- постоянное усложнение проектируемых технических систем, когда факторы, являвшиеся малозначительными ранее, начинают играть важную роль и оказывать значительное влияние на итоговую точность получаемых решений;
- применение новых материалов, которые плохо подчиняются или вовсе не соответствуют классическим гипотезам;
- все более сложные условия взаимодействий с внешними средами, в которых работают конструкции, при этом такие условия плохо описываются известными ранее моделями и их приближениями.

Таким образом, несмотря на большое количество исследований колебательных процессов в современном научном сообществе, существует множество задач, требующих решения для обеспечения возможности точных расчетов несущих конструкций различных технических объектов, а впоследствии увеличения уровня безопасности при их эксплуатации. Многие объекты, такие как мачты, антенны, атомные электростанции, линии электропередач, производственные здания химической промышленности, транспортные сооружения, а также применяемое в них промышленное оборудование, являются технически сложными и ответственными. Авария на таких объектах может привести к негативным последствиям: может быть нанесен не только финансовый ущерб, но и возможны человеческие жертвы.

В материалах конструкций, подверженных влиянию динамических повторяющихся воздействий, происходит процесс увеличения числа рассеянных по объему материала микрповреждений и микродефектов различной природы, называемый накоплением повреждений. Основы микромеханики поврежденной среды предложены Качановым Л.М. и Работновым Ю. Н. В настоящее время определению существующего уровня поврежденности материала и прогнозированию его нарастания уделяется особое внимание.

Увеличение поврежденности приводит к общей деградации свойств материалов, уменьшению модулей упругости, прочности. В результате этих необратимых процессов может произойти изменение отношений жесткостей, что приведет к изменению расчетных схем и моделей, к итоговому изменению расчетных усилий, а также повлияет на динамические характеристики конструкций. Это, в свою очередь, приводит к затруднению прогнозирования колебаний системы и к еще большему неспрогнозированному росту поврежденности. Таким образом, с целью обеспечения безопасной эксплуатации различных конструкций необходимо производить своевременные проверки остаточного ресурса и расчеты накопления повреждений в материалах конструкций, подверженных колебаниям под воздействием аэродинамических природных явлений.

Большинство типов сложных систем может быть упрощено до многомассовой модели, имеющей конечное число динамических степеней свободы, если такая модель способна отражать основные параметры движения и подобная идеализация не приводит к потере качества расчета. Сложности геометрии и иные особенности, влияющие на аэродинамический портрет, могут быть определены при экспериментальном или численном моделировании взаимодействия реальной системы с потоками воздуха, после чего полученные результаты могут быть заложены в уравнения колебательного движения идеализированной многомассовой системы. Данный подход не требует столь сложных вычислительных затрат, как непосредственное моделирование пространственных задач гидрогазодинамики.

Проектирование ряда ответственных объектов влечет за собой некоторые сложности, такие как особое, уникальное взаимодействие с окружающей средой, в частности с атмосферой. Сложная геометрическая форма покрытия, большая высота и другие факторы критично влияют на выбор конструкций. При проектировании необходимо учесть реальное распределение давления от ветрового потока на объект в целом и получить количественную оценку значений ветровых нагрузок. На основании этой информации могут быть применены известные и предложены новые методы теоретической и строительной механики, позволяющие в значительной степени повысить точность расчетов и качество проектирования, а, в последующем, и безопасность при эксплуатации. Корректный анализ схемы распределения ветровых потоков поможет избежать ошибок в расчетах. Если рассматривать проблему аэродинамического взаимодействия объектов с воздушной средой с точки зрения износостойкости материалов конструкций и их отдельных элементов, можно сделать вывод, что вязкое трение, возникающее при обтекании, может оказывать значительное влияние на поверхности, а в случае наличия многофазных сред вследствие наличия частиц пыли, льда, воды, различных агрессивных частиц вблизи производственных объектов, урон, вызываемый аэродинамическим воздействием, может увеличиваться в разы.

Для большинства современных объектов, подверженных аэродинамическому взаимодействию, в силу особенностей их геометрии существующие стандартные инженерные методики расчета ветровых нагрузок не подлежат использованию в ходе проектирования, поскольку с их применением трудно учесть интерференцию аэродинамических потоков вблизи поверхности сложной кривизны. При этом корректный учет внешних нагрузок на сооружение является одним из важнейших этапов проектирования, поскольку не только прогнозирует прочность и долговечность проектируемых конструкций, но и позволяет обеспечить безопасность людей.

Вопросы динамического взаимодействия механических систем с аэродинамической средой находят применение и при проектировании энергоэффективных систем. В последнее время особую актуальность получает изучение различных альтернативных источников электроэнергии, при этом одна из наиболее энергоемких природных сред – атмосфера, при движении воздуха которой вырабатывается большой объем механической энергии. Возможность

аккумулирования этой энергии может приводить к значительному экономическому эффекту. Преобразование энергии движения потоков в электрическую может осуществляться с помощью ветроэлектрических установок, интегрированных в конструкцию сооружений. Вязкое трение лопастей о воздух и лобовое сопротивление являются главными факторами, определяющими эффективность передачи энергии от ветра к ротору и, следовательно, стоимость энергии, вырабатываемой ветрогенератором. Таким образом, решение задач, связанных с взаимодействием механических систем и аэродинамической среды, а также вызванными этими колебаниями является **актуальной темой исследования.**

Цели работы. На основании интергации решений теоретической механики и гидрогазодинамики разработать математические и инженерные алгоритмы, модели и методы исследования колебаний многомассовых систем, взаимодействующих с аэродинамическими потоками.

В соответствии с целями были поставлены и решены следующие **задачи:**

1. Разработка методики определения безразмерных характеристик давления при проведении математическое и физическое моделирование аэродинамики конструкций и объектов сложной геометрической формы
2. Анализ взаимного влияния систем твердых тел, связанных через аэродинамическую среду.
3. Разработка способа определения частот и форм собственных колебаний тел как многомассовых систем.
4. Разработка алгоритма математического моделирования синтезированных анемограмм по требуемым расчетным частотным и скоростным характеристикам.
5. Разработка методологии моделирования колебаний механических систем, вызванных аэродинамическим воздействием, при помощи упрощенных многомассовых моделей.
6. Оценка перемещений характерных точек, напряжений и накопления поврежденности материалов несущих конструкций при аэродинамическом воздействии.
7. Исследование динамических режимов работы и эффективности, поиск рациональных форм и положений конструкций с интегрированными стационарными электрогенерирующими установками, использующих энергию аэродинамического взаимодействия.

Степень разработанности темы. Проблема динамического расчета тел и конструкций различных форм и размеров возникает во многих направлениях задач и исследований. Колебания разнообразных многомассовых систем рассматриваются в материалах А.И. Весницкого, М.А. Дашевского, В.И. Ерофеева, С.В. Крысова, В.Л. Литвинова и др. Основы микромеханики поврежденной среды предложены в работах Л.М. Качанова, Ю.Н. Работнова, Л.А. Игумнова, Дж. Коллинза, В.П. Тамужа, В.П. Голуба, Ю.Г. Коротких, И.А. Волкова и др. Вопрос взаимодействия зданий и сооружений с ветровыми нагрузками рассмотрен такими российскими и зарубежными авторами, как Г.А. Савицкий, Э.И. Реттер, М.Ф. Барштейн, С.А. Валгер, Р. Фрешет, О.И. Поддаева,

С.Ф. Хернер, А.М. Белостоцкий и др. Однако, на данный момент не существует единой методики определения аэродинамических характеристик инженерных объектов сложной формы, помимо трудозатратного физического и численного моделирования. Расчеты объектов на сейсмические воздействия представлены в работах Т.Ж. Жунусова, И.Л. Корчинского, О.В. Мкртычева, О.В. Павленко, Л.С. Чигринской, Е.В. Позняк и др.

Соответствие паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.1.7. «Теоретическая механика, динамика машин», а в частности пунктам:

п.3. Теория колебаний механических систем.

п.13. Динамика систем, состоящих из абсолютно твердых и деформируемых тел, в том числе машин, приборов и конструкций.

п.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,

п.15. Экспериментальное исследование динамики систем тел, в том числе летательных аппаратов, машин, приборов и конструкций (только технические науки).

Научная новизна диссертации:

1. Разработана методика экспериментальных аэродинамических исследований, базирующаяся на определении безразмерных характеристик давления. Методика отличается от ранее предложенных тем, что не требует моделирования ветрового потока с различными скоростями и профилями, а позволяет выполнять измерения при фиксированном значении скорости потока и определить реальное распределение давления по поверхности конструкции при помощи вводимых коэффициентов. (**п.14., п.15.**)

2. Разработан способ определения частот собственных колебаний конструкций с помощью упрощенных многомассовых моделей. Данный способ позволяет определять частоты конструкций сложной геометрической формы без трудоёмкого решения систем дифференциальных уравнений механики деформированного твердого тела. Разработано программное обеспечение: «Определение собственной частоты механической системы с известными жесткостными параметрами», свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2025610352 от 10.01.2025. (**п.3., п.13.**)

3. Разработан алгоритм математического моделирования расчетных синтезированных анемодиаграмм по требуемым псевдослучайным частотным и скоростным характеристикам. Данный алгоритм учитывает собственные характеристики как проектируемой конструкции или объекта, так и особенности ветрового района строительства. Разработано программное обеспечение: «Генератор расчетных анемодиаграмм», свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024690234 от 13.12.2024. (**п.3., п.14.**)

4. Разработана методология моделирования колебаний механических систем, вызванных аэродинамическим воздействием, при помощи упрощенных многомассовых моделей, позволяющая дифференцированно проводить решение задач гидрогазодинамики и динамических задач механики деформированного

твёрдого тела с последующей интеграцией результатов при помощи вводимых динамических коэффициентов, а также выполнять дальнейшие инженерные расчеты перемещений характерных точек конструкций, напряжений в несущих конструкциях и остаточного ресурса материалов технических систем. (п.3., п.13., п.14., п.15.)

5. Проведено исследование динамических режимов работы стационарных электрогенерирующих установок, использующих энергию аэродинамического взаимодействия интегрированных в конструкции, на основании которого предложены алгоритмы поиска рациональных форм и ориентации высотных объектов. (п.13.)

Теоретическая значимость диссертации заключается в расширении фундаментальных методов и основ теоретической механики и гидрогазомеханики, применяемых в инженерной практике.

Практическая значимость работы. Изложенные в работе результаты могут использоваться для создания инженерных и нормативных методик по проектированию конструкций, подверженных колебаниям под воздействием аэродинамических потоков, а также в дальнейших исследованиях в области расчетов систем на динамические нагрузки с учетом аэродинамического взаимодействия. Результаты диссертации были внедрены:

1. ООО «АТОМЭЛЕКТРОПРОЕКТ», г. Нижний Новгород.

2. ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» (ННГАСУ).

Методология и методы исследования. В процессе исследования использованы методы теоретической и экспериментальной механики, теории колебаний и волн, механики сплошных сред, экспериментальной и численной аэродинамики, механики разрушений, механики поврежденной среды.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика экспериментальных аэродинамических исследований, базирующаяся на определении безразмерных характеристик давления.

2. Способ определения частот собственных колебаний конструкций с помощью упрощенных многомассовых моделей.

3. Алгоритм математического моделирования расчетных синтезированных анемোগрам по требуемым псевдослучайным частотным и скоростным характеристикам.

4. Методология моделирования колебаний механических систем, вызванных аэродинамическим воздействием, при помощи упрощенных многомассовых моделей.

5. Результаты анализа динамических режимов работы и эффективности интегрированных стационарных электрогенерирующих установок, использующих энергию аэродинамического взаимодействия.

Работа выполнялась при следующей **финансовой поддержке:**

1. В рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2021-2023 гг. по теме № 0030-2021-0025.

2. При поддержке Научно-образовательного центра Нижегородской области «Техноплатформа 2035» (соглашение № 16-11-2021/55 от 16.11.2021 г.).

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается общими положениями аэродинамики, теории колебаний и механики поврежденной среды, согласованностью численного и экспериментального методов моделирования ветровых воздействий, а также с результатами ранее опубликованных работ.

Результаты диссертации были применены при разработке систем мониторинга конструкций в рамках проекта «Техноплатформа 2035» (соглашение № 16-11-2021/55 от 16.11.2021 г.), реализованного на базе научно-исследовательской лаборатории кафедры теории сооружений и технической механики «Непрерывный контроль технического состояния зданий и сооружений» при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» (акт внедрения № 01/25 от 15.01.2025 г.) , а также внедрены в проектный процесс организации ООО «АТОМЭЛЕКТРОПРОЕКТ», г. Нижний Новгород (справка внедрения от 31.01.2025, б/н).

Результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях и форумах:

1. VIII Всероссийский фестиваль науки, 3 – 5 октября 2018 г. (ННГАСУ, г. Н.Новгород);

2. Конференция «Проблемы прочности, динамики и ресурса», 25 – 29 ноября 2019 г. (НИУ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Н. Новгород);

3. Международный научно-промышленный форум «Великие реки 2020», 27 – 29 мая 2020 г. (ННГАСУ, г. Н. Новгород);

4. 5-я Международная научно-техническая конференция «Живучесть и конструкционное материаловедение ЖивКоМ», 27 – 29 октября 2020 г. (ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова, г. Москва);

5. XLVII Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» 20 – 23 апреля 2021 г. (НИУ МАИ, г. Москва);

6. 26-я Нижегородская сессия молодых ученых (технические и естественные науки), 25 – 28 мая 2021 г. (г. Н. Новгород);

7. XI Всероссийский фестиваль науки, 20 – 21 октября 2021 г. (ННГАСУ, г. Н. Новгород);

8. Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в рамках VII Всероссийского молодежного научного форума «Наука будущего – наука молодых», 23 – 26 августа 2022 г. (г. Новосибирск);

9. XII Всероссийская научная конференция с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, 15 – 17 ноября 2022 г. (ИПМех РАН, г. Москва);

10. Конференция «Необратимые процессы в природе и технике», 31 января – 3 февраля 2023 г (НИУ МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва);

11. XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, 21 – 25 августа 2023 г. (СПбПУ, г. Санкт-Петербург).

Работа была отмечена дипломом 1 степени на Международном научно-промышленном форуме «Великие реки 2020», а также именной стипендией им. академика Г.А. Разуваева 2022 – 2023 гг.

По материалам диссертации опубликовано 26 научных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, входящих 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.

Объем работы

Диссертация состоит из введения. Четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Работа изложена на 149 страницах машинописного текста, содержит 11 таблиц, 95 рисунков и список литературы, включающий 164 наименования.

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность исследования, обозначены цели и задачи, значимость диссертационной работы, положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Общие положения динамики конструкций, колебаний сложных систем, поврежденности материалов

В первой главе приводятся общие сведения о динамических нагрузках и колебаниях механических систем. Вводятся основные зависимости, позволяющие связать задачи колебательной динамики с механикой поврежденных сред и процессами накопления повреждений. Помимо этого, важным этапом изучения динамики сложных конструкций является анализ точного распределения аэродинамических воздействий, таких как давления, аэродинамические коэффициенты, скорости ветровых потоков, для дальнейшего использования в качестве нагрузок для определения колебаний реальной системы, сведенной к многомассовой.

Описывается установка (рис. 1.а), применяемая в дальнейшем при экспериментальном изучении обтекания тел и систем твердых тел аэродинамическими потоками. Приводятся описания граничных условий и параметров расчетной области и сетки (рис. 1.б) принятые при численном моделировании, решения ряда элементарных задач, связанных с аэродинамическим взаимодействием элементарных тел. На основании проведенных численных исследований делается вывод о достаточной точности полученных решений, обусловленной их общей сходимостью с существующими нормативными и инженерными методиками.

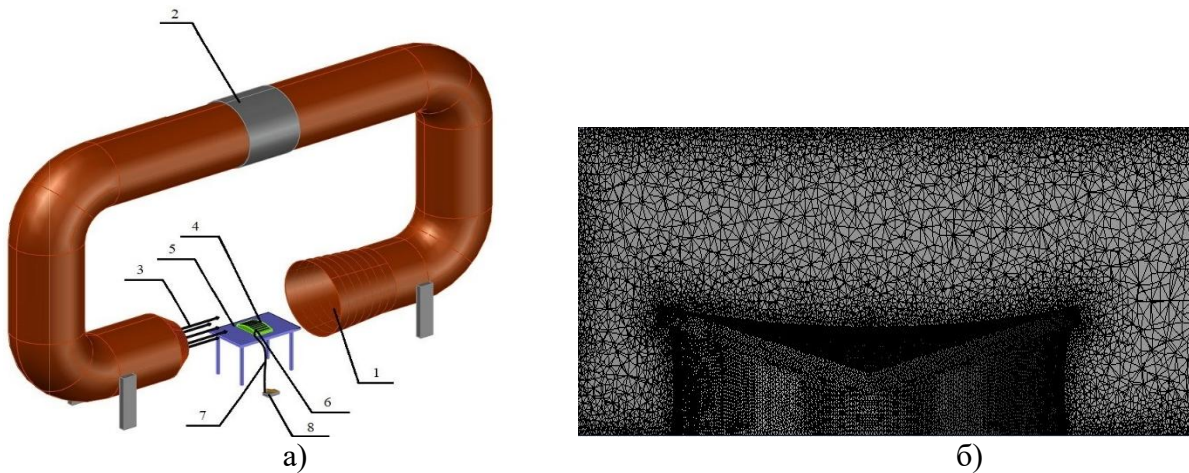


Рис. 1. а) Принципиальная схема применяемой экспериментальной установки:
1 – аэродинамическая труба, 2 – вентилятор, 3 – потоки воздуха, 4 – модель здания, 5 – подмакетник, 6 – исследуемая точка, 7 – гибкая силиконовая трубка, 8 – микрометр.
б) Численное моделирование аэродинамики пространства и исследуемого объекта

Глава 2. Моделирование взаимодействия твердых тел горизонтальной конфигурации с воздушными потоками при колебаниях

Одним из наиболее распространенных видов воздействия, приводящим к колебаниям технических объектов, является аэродинамическое. В силу своей природы ветровые воздействия постоянно изменяются в процессе колебаний по направлению и амплитуде, что может носить весьма хаотичный характер и приводить к различного рода резонансным эффектам.

Для описания колебаний объектов горизонтальной конфигурации при аэродинамическом воздействии может быть применена упрощенная многомассовая модель, учитывающая основные упруго-инерционных параметры. Основным преимуществом таких модели является их конечная степень динамической свободы, что позволяет применять при расчете колебаний известные подходы теоретической механики. Сложное аэродинамическое воздействие $w(x, y, t)$ в этом случае может быть заменено на вектор сосредоточенных сил $P(t)$, прикладываемых к каждой массе в направлениях степеней свободы, при этом значения этих сил могут быть определены при аэродинамическом моделировании исходного объекта с последующим определением равнодействующей на определенной грузовой площади (рис. 2.).

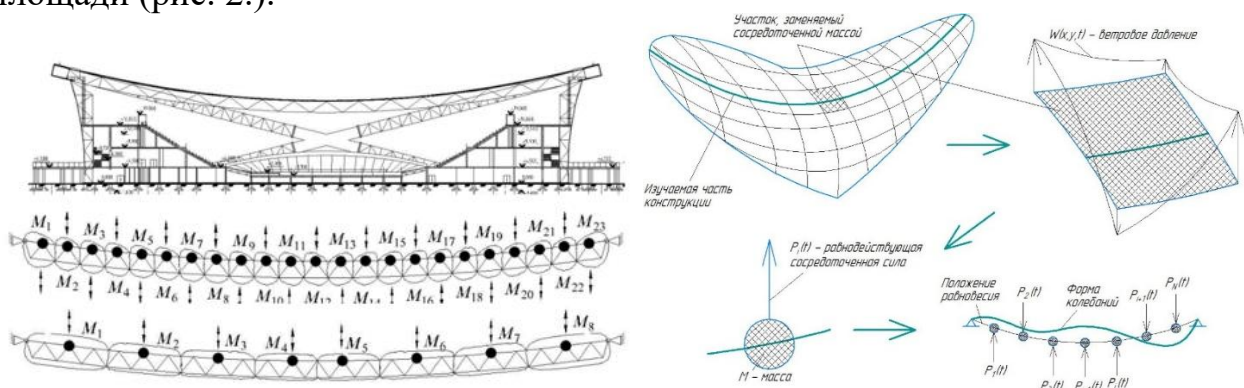


Рис. 2. Большепролетная конструкция и ее упрощенные многомассовые модели

В качестве исследуемых твердых тел горизонтальной конфигурации в

главе рассматриваются три проектируемых в научно-исследовательских целях большепролетных здания (рис. 3.) с различными формами покрытия. Для каждого из них определены аэродинамические характеристики экспериментальными и численными методами для нескольких характерных направлений ветровых потоков.

Картины распределения значений ветровых нагрузок, действующих на поверхность большепролетных поверхностей, по результатам численного моделирования и эксперимента совпадают с удовлетворительной точностью. Расхождения, присутствующие в основном в областях минимальных и максимальных значений, могут быть объяснены погрешностями и неточностями при проведении эксперимента, а также особенностями расчетов в модуле вычислительной гидрогазодинамики *ANSYS CFX*.



Рис. 3. Исследуемые объекты

По результатам аэродинамических испытаний здания с покрытием в виде криволинейной оболочки двоякой кривизны (рис. 4.) видно, что давление, действующее на покрытие, отрицательное. При общем разгрузке несущих конструкций здания подобное воздействие может оказывать значительное влияние и усложнять процесс расчета и проектирования креплений элементов кровли, поскольку при отсутствии снеговой нагрузки во время сильных ветров может произойти их отрыв. Помимо этого, в подобных мембранных покрытиях при действии пульсационной ветровой нагрузки могут возникать резонансные эффекты, действие которых в условиях эксплуатации реального сооружения не предсказуемо.

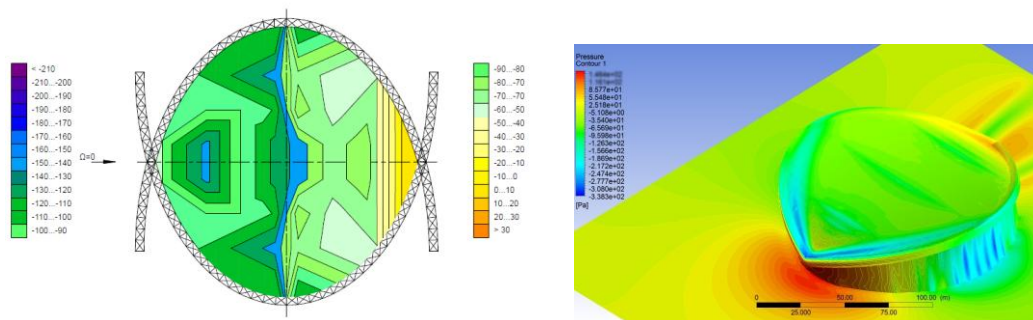


Рис. 4. Изополя распределения ветровой нагрузки по большепролетному, построенные по результатам физического и численного моделирования

Максимальные по абсолютной величине значения ветровых нагрузок на здание с арочной конструкцией покрытия из ферм (рис. 5.) достигаются со стороны граней здания, на которые направлены ветровые потоки, и в местах переломов сечений покрытия, что также должно учитываться при расчетах.

При изменении угла воздействия потока воздуха меняется картина изополей ветрового давления, следовательно, изменяются возникающие усилия

в конструкциях, что также следует учитывать при расчете на наиболее неблагоприятные расчетные сочетания нагрузок.

Распределение аэродинамических коэффициентов по покрытию здания с покрытием из криволинейных ферм (рис. 6.) крайне неравномерно в связи с наличием сложных изгибов его поверхности и практически не поддается условному зонированию с целью упрощения дальнейшего расчета конструкций, что еще раз подчеркивает ограниченную применимость в данном конкретном случае стандартных схем. При сборе ветровой нагрузки на подобные покрытия невозможно рассматривать каждый блок здания отдельно только на основании типовых схем, представленных в нормативных документах.

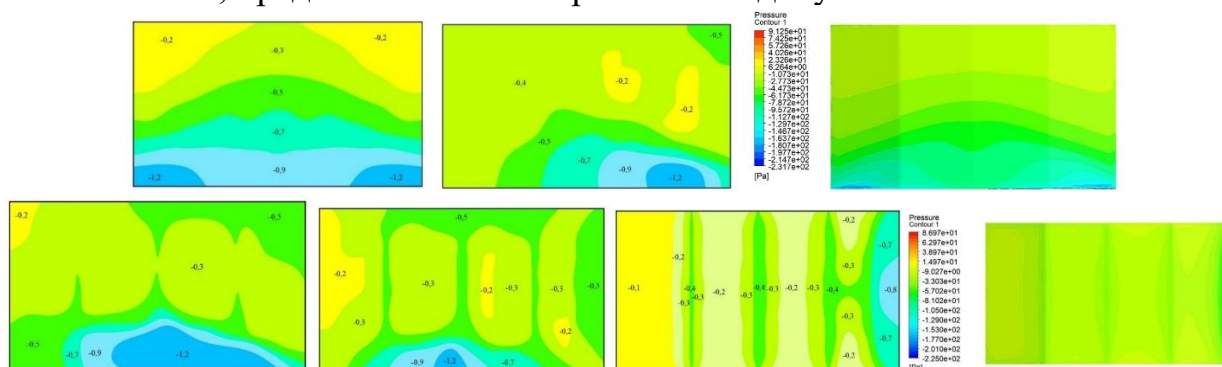


Рис. 5. Изополя распределения аэродинамических коэффициентов по большепролетному арочному покрытию, полученные экспериментально и численно

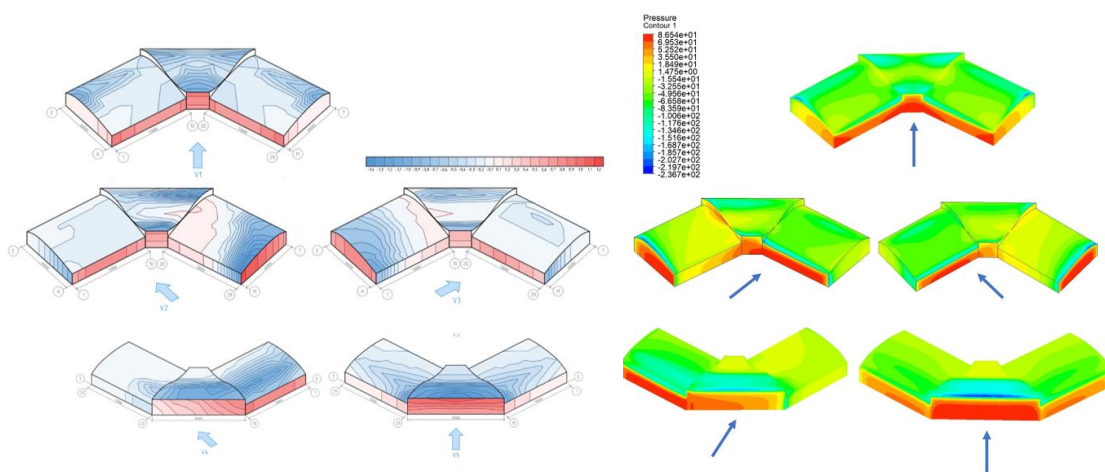


Рис. 6. Изополя распределения ветровой нагрузки по большепролетному покрытию здания с покрытием из криволинейных ферм полученные экспериментально и численно

Глава 3. Моделирование взаимодействия твердых тел вертикальной конфигурации с воздушными потоками при колебаниях

При изучении колебаний различных конструкций особое внимание уделяется высотным объектам, имеющие два характерных измерения, значительно меньшие третьего. Такие тела вертикальной конфигурации, как правило, сильнее подвержены влиянию динамических нагрузок, таких как сейсмические или ветровые, значительно возрастающие с увеличением высоты от земной поверхности. По сути данные тела могут рассматриваться как жестко-защемленный в уровне земли стержень эквивалентной жесткости, с распределенными по высоте массами, учитывая основные упруго-инерционных параметры (рис. 7.б).

Таким образом основной задачей данного этапа является исследование обтекания аэродинамическими потоками $w(x, y, t)$ объектов вертикальной конфигурации для использования в дальнейшем при описании колебательных процессов. В качестве исследуемых твердых тел вертикальной конфигурации в главе рассматриваются два проектируемых в научно-исследовательских целях высотных здания уникальной формы (рис. 7.а). Для каждого из них определены аэродинамические характеристики экспериментальными и численными методами для нескольких характерных направлений ветровых потоков.

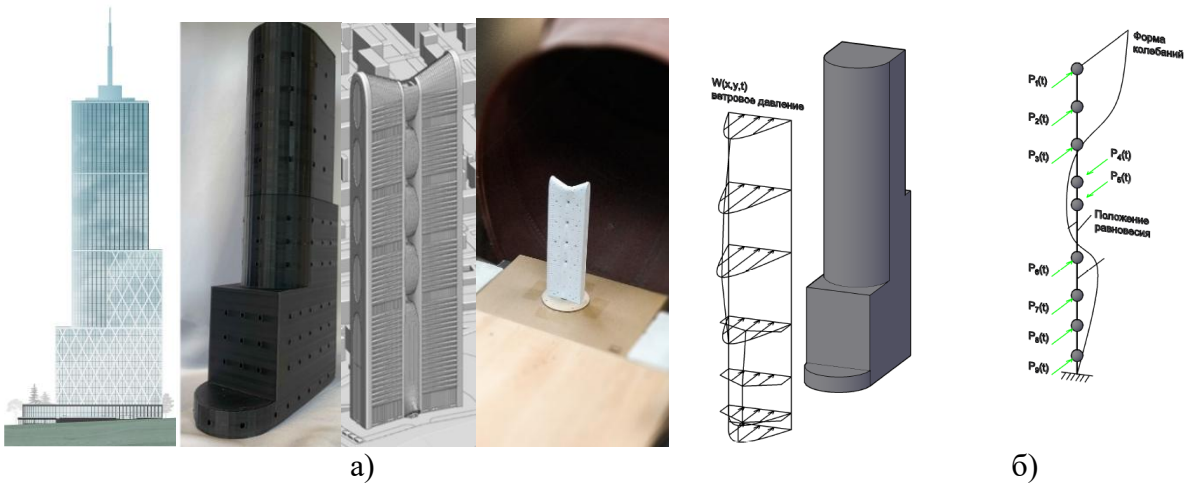


Рис. 7. а) Исследуемые высотные здания
б) Упрощенная многомассовая модель с вектором сил

Изополя распределения аэродинамических коэффициентов по поверхностям высотного здания (рис. 8.) по результатам экспериментального и численного исследований во многом совпадают. На переднем и заднем фасадах исследуемого здания при проведении натурных испытаний и численного моделирования можно выделить одинаковые участки, в которых наблюдается высокая сходимость результатов как по характеру распределения ветрового давления, так и в численном эквиваленте.

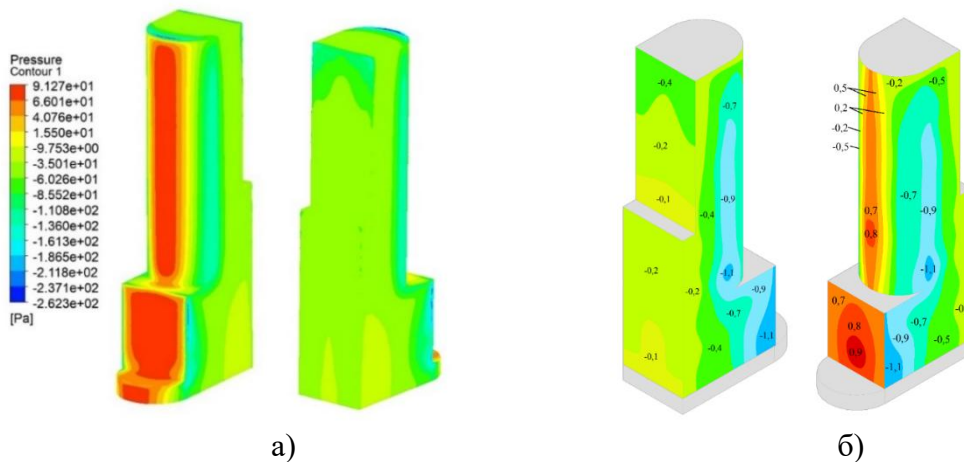


Рис. 8. Изополя распределения:
а) ветровых давлений по результатам численного моделирования;
б) аэродинамических коэффициентов по результатам физического моделирования

Было проведено моделирование распределения нагрузок системы из большепролетных и высотного зданий, при их различном взаимном положении (рис. 9).

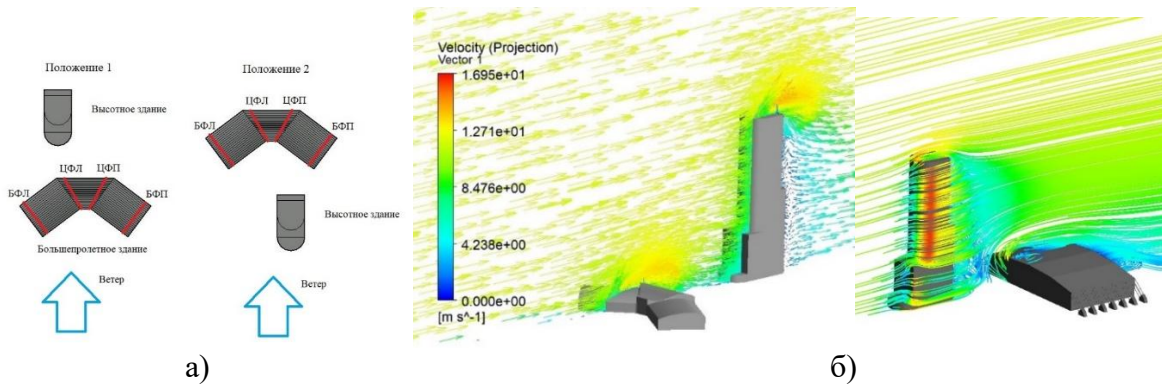


Рис. 9. а) Положения зданий в системе. б) Визуализация обтекания системы зданий ветровым потоком. Разрезы потоков в плоскости, параллельной направлению потоков

Объект, находящийся с наветренной стороны, значительно изменяет направление и скорость воздушных потоков, что сказывается на распределении аэродинамических давлений по поверхности подветренного объекта. Это особенно заметно на участках поверхности, непосредственно перекрываемых соседним объектом при проецировании системы на плоскость XOZ .

В сравнении с одиночным расположением объектов по картине распределения давления можно выделить локальные зоны его увеличения (резкого снижения), что при изменении исходных параметров системы, расстояния между объектами, углов их поворота и геометрических размеров, потенциально может привести к увеличению площади таких участков или модуля разности значений ветрового давления в этих зонах. Обратное влияние на систему подветренного объекта, объясняемое отражением ветровых потоков от его поверхности и, возникающими в связи с этим, воздушными вихрями, практически не подвергается визуальной оценке, однако тем не менее имеет место.

С целью более точной оценки такого влияния необходимо ввести некоторый количественный параметр, в качестве которого в рамках исследования был выделен вектор равнодействующей сил ветрового давления (рис.10.а).

Равнодействующая сил ветрового давления, приложенных к статичному объекту, рассматриваемому в составе системы схожих по габаритам объектов, объединенных аэродинамической средой, в любом случае будет иметь меньшее по модулю значение по сравнению с равнодействующей тех же сил, приложенных к отдельностоящему объекту, вне зависимости от расположения объектов в системе.

В зависимость от взаимного расположения объектов в системе главным образом попадают координаты точки приложения равнодействующей сил ветрового давления на конкретный объект, что вкупе с ее изменяющимся модулем может привести к существенному изменению значения равнодействующего момента в основании объекта.

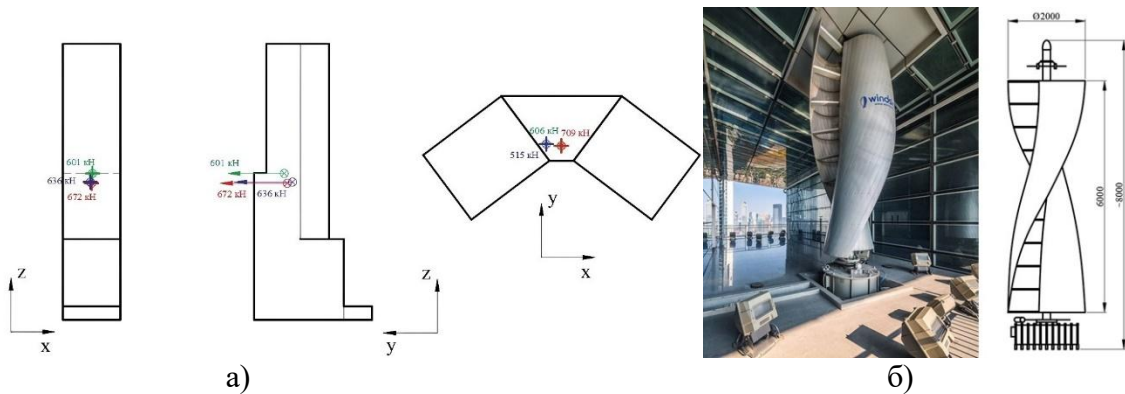


Рис. 10. а) Равнодействующие сил ветрового давления.

б) Принципиальная конструкция ветрогенератора с вертикальной осью ротора

В настоящее время одной из перспективных технологий, связанных с возобновляемыми источниками энергии, является использование ветровой энергии, а в частности интегрирование установок, генерирующие электроэнергию (рис. 10.б), непосредственно в здания. Задачи увеличения скорости ветровых потоков в области турбины ветрогенератора и обеспечения возможности эффективного нагнетания в нее ветра являются приоритетными при выборе геометрической формы объекта.

Методами вычислительной гидрогазодинамики были проведены параметрические исследования оптимальной формы здания для максимизации скорости воздушного потока, проходящего через ветрогенераторы при различных направлениях ветра (рис. 11).

Для дальнейшего анализа результатов введено значение коэффициента увеличения скорости ветра в канале с ветрогенератором в сравнении с исходной $k = v_k / v_{вх}$. Далее приводятся графики зависимости коэффициента увеличения скорости k от угла ветровой атаки θ для каждой из 6-ти моделей (рис. 12.а), а также график зависимости того же коэффициента от угла наклона поверхности объекта α для каждого из направлений ветра (рис. 12.б).

Для анализа оптимальной ориентации объекта использовалась методика, основанная на построении зависимости коэффициента усиления ветра k в канале с ветрогенераторами от направлений ветрового потока – угла атаки θ . Результаты проведенного исследования приведены на рисунке 13 а.

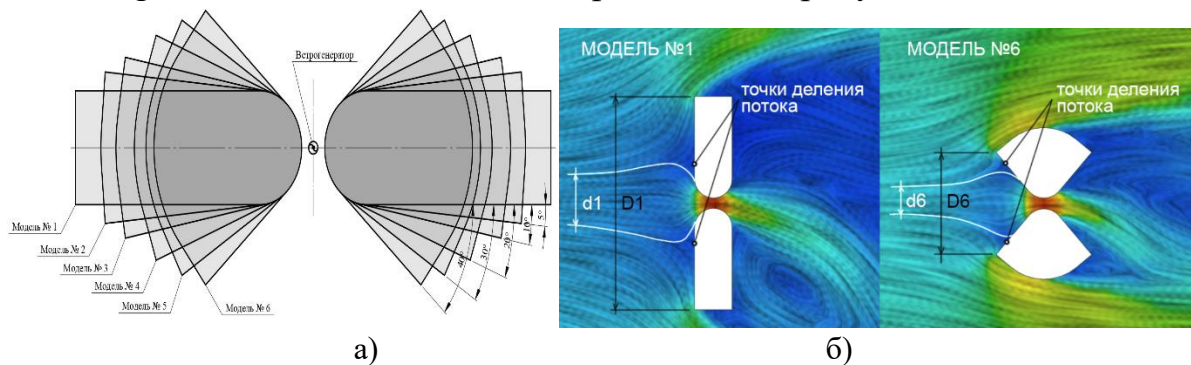


Рис.11. а) Исследуемые модели внешней оболочки объекта.

б) Поля направлений обтекания моделей

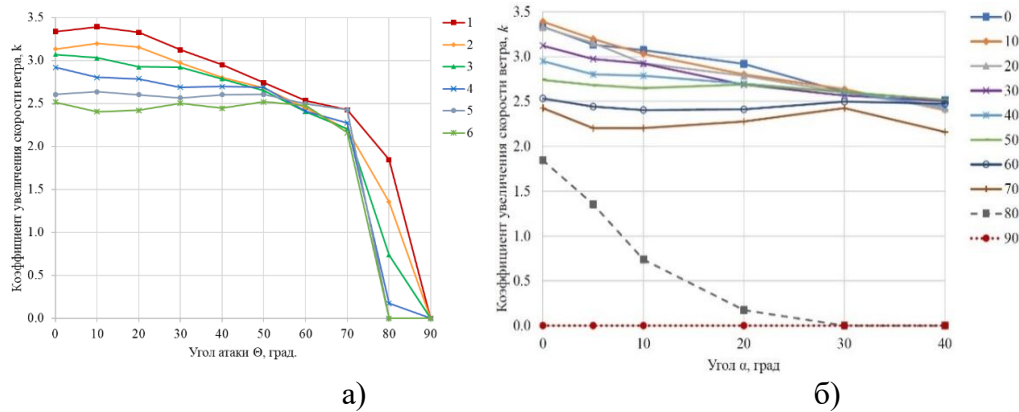


Рис. 12. а) График зависимости коэффициента увеличения скорости k от угла атаки θ . б) График зависимости коэффициента увеличения скорости k от угла α для всех углов атаки

Модель с углом наклона сегмента поверхности $\alpha=0^\circ$ наиболее эффективна. Однако принятие данной формы внешней оболочки объекта приведет к уменьшению его изгибной жесткости вследствие значительного увеличения его размера по фронту ветрового потока. Таким образом, наиболее рациональным решением будет принять угол $\alpha=6^\circ$, который позволяет сохранить высокие значения коэффициента увеличения скорости в рабочей области турбины ветрогенератора при большинстве углов атаки, а также сильно уменьшает продольный размер поперечного сечения при сохранении его площади.

Данное решение, как видно по результатам эксперимента в аэродинамической трубе, приведет к перераспределению значений аэродинамических коэффициентов по поверхности объекта, что приведет к смещению центра приложения ветровой нагрузки в нижнюю его часть и, соответственно, к уменьшению опрокидывающего момента в основании. (рис. 13.б). Уменьшение значения опрокидывающего момента говорит о повышении способности объекта сопротивляться воздействию ветровых нагрузок, что позволяет сделать заключение о том, что внедрение ветрогенераторов в тело объекта, помимо повышения энергоэффективности, может благоприятно влиять и на его аэродинамические параметры.

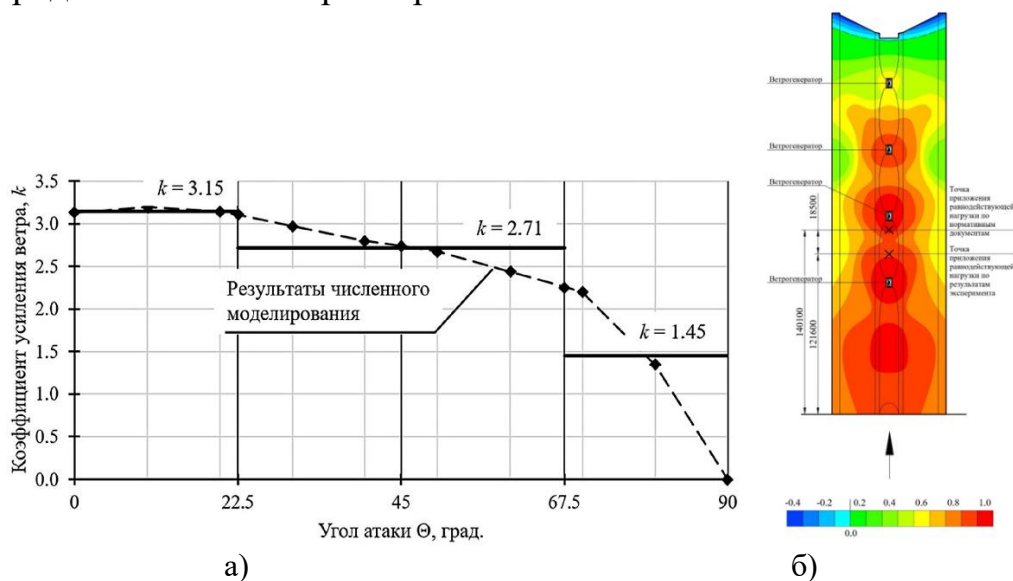


Рис. 13. а) График зависимости коэффициента увеличения скорости k от угла атаки θ по результатам численного моделирования и значения усредненных величин. б) Изополя распределения аэродинамических коэффициентов по результатам эксперимента

Глава 4. Динамические расчеты конструкций зданий при обтекании газодинамической средой

В рамках исследований производилась оценка влияния ветрового давления на напряженно-деформируемое состояние несущих конструкций, а также оценка накоплений повреждений от данного воздействия.

Для осуществления расчётов был разработан алгоритм (рис. 14.а) математического моделирования синтезированных анемограмм, основанный на псевдослучайных приращениях временных интервалов и приращении скорости ветровых порывов. Рабочий временной диапазон случайным образом разбивается на интервалы с граничными значениями от 0.1 до 0.7 секунды. Для создания массива начальных значений реальных скоростей ветровых потоков используется функция генерации случайной равновероятной величины из заданного диапазона граничных условий. Формируется список случайных приращений скоростей по Гауссову распределению с матожиданием равным нулю и контролируемым среднеквадратичным отклонением. Суммируя данные компоненты, получаем список скоростей ветрового потока во времени. При получении значений скоростей, не соответствующих заданным ограничениям, скорости корректируются путем изменения значения среднеквадратичного отклонения Гауссова распределения при назначении приращений. По результатам анализа скоростного и частотного спектров ветровых порывов заданного региона были рассчитаны анемограммы (рис. 14.б).

Так как любая реальная конструкция имеет распределенные по объемам элементы массы и поэтому представляет собой систему с бесконечным числом элементарных масс, то для упрощения решения задач часто распределенную массу заменяют несколькими массами, сосредоточенными в характерных точках конструкции. Остальные участки системы, оставшиеся без масс, рассматриваются как «безынерционный скелет» системы, сохранивший деформационные свойства рассчитываемой конструкции. Для определения параметров собственных колебаний конструкции может быть использована классическая система уравнений теоретической механики для объектов с несколькими степенями свободы (уравнений амплитуд):

$$\begin{cases} (M_1\delta_{11} - \frac{1}{\omega^2})a_1 + M_2\delta_{12}a_2 + \dots + M_n\delta_{1n}a_n = 0 \\ M_1\delta_{21}a_1 + (M_2\delta_{22} - \frac{1}{\omega^2})a_2 + \dots + M_n\delta_{2n}a_n = 0 \\ \dots \\ M_1\delta_{n1}a_1 + M_2\delta_{n2}a_2 + \dots + (M_n\delta_{nn} - \frac{1}{\omega^2})a_n = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где M_i – i -ая сосредоточенная масса;

a_i – амплитуда колебаний i -ой массы;

δ_{ij} – удельное перемещение точки сосредоточенной массы M_i от безразмерной единичной силы, приложенной в точке массы M_j ;

ω – круговая частота собственных колебаний.

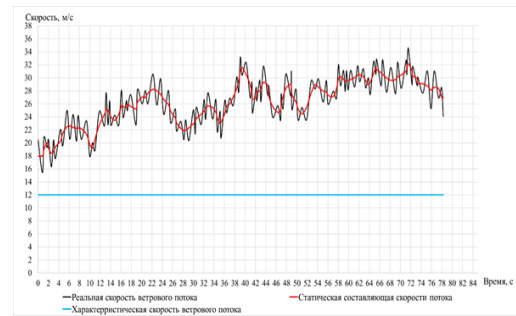
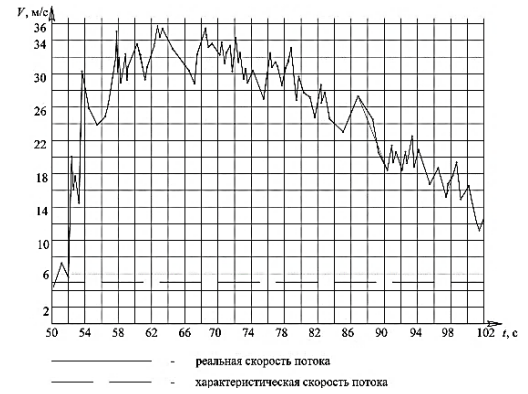
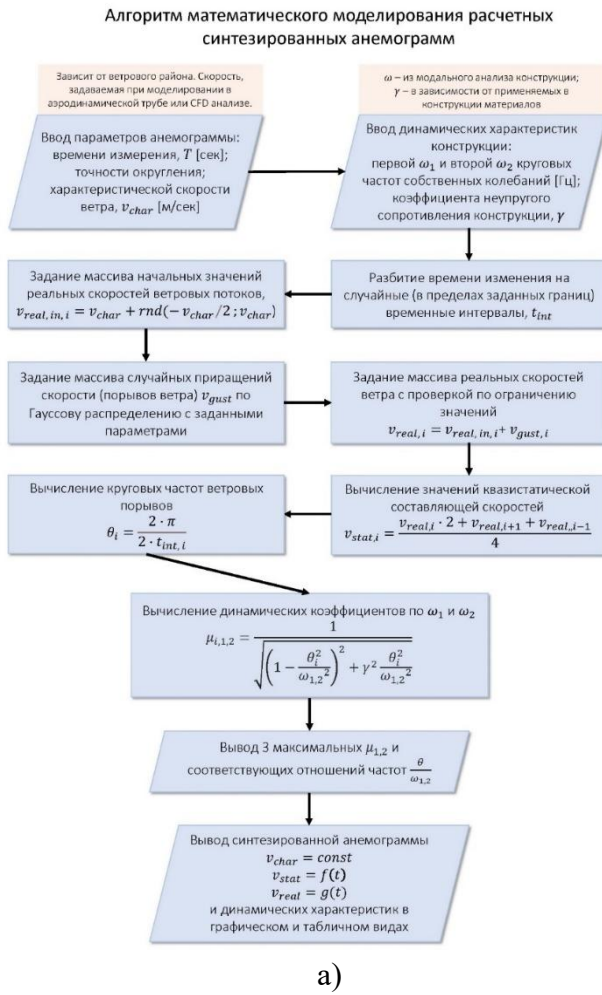


Рис. 14. а) Алгоритм математического моделирования расчетных синтезированных анемограмм. б) Синтезированные анемограммы штормовой ветровой нагрузки

Система уравнений (1) имеет нетривиальное решение, когда определитель матрицы коэффициентов равен нулю:

$$\begin{vmatrix} \delta_{11}M_1 - \frac{1}{\omega^2} & M_2\delta_{12} & \dots & M_n\delta_{1n} \\ M_1\delta_{21} & \delta_{22}M_2 - \frac{1}{\omega^2} & \dots & M_n\delta_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_1\delta_{n1} & M_2\delta_{n2} & \dots & \delta_{nn}M_n - \frac{1}{\omega^2} \end{vmatrix} = 0. \quad (2)$$

Исходя из решения уравнения (2) могут быть найдены частоты и формы собственных колебаний конструкций.

После упрощения схем объектов с помощью соотношений (1), (2) были определены динамические характеристики собственных колебаний высотного здания как защемленного стержня и ферм центральной (ЦФ) и боковой (БФ) части большепролетного здания (таблица 1, 2).

Динамические напряжения и перемещения, возникающие в конструкциях, зависят от реальной скорости ветра, увеличивающей статическую составляющую напряжения и соотношения частоты ветровых порывов и собственной частоты здания. Таким образом, динамическое перемещение

может быть определено по формуле:

$$\Delta_d = \Delta_0 \cdot \frac{(V_{ст} + V_d \cdot \mu)^2}{V_0^2} \quad (3)$$

где

$V_{ст}$ – статическая составляющая реальной скорости потока;

V_d – динамическая составляющая реальной скорости потока;

V_0 – характеристическая скорость ветрового потока (12м/с);

Δ_0 – перемещение от характеристической скорости;

$\mu = \frac{1}{\sqrt{(1 - \frac{\theta^2}{\omega^2})^2 + \gamma^2 \frac{\theta^2}{\omega^2}}}$, – динамический коэффициент, учитывающий

соотношение круговой частоты ветровых порывов θ и круговой частоты собственных колебаний конструкции ω ;

$\gamma = 0,025$ – коэффициент неупругого сопротивления конструкции.

Таблица 1. Частоты и формы собственных колебаний ферм большепролетного здания



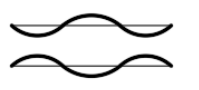
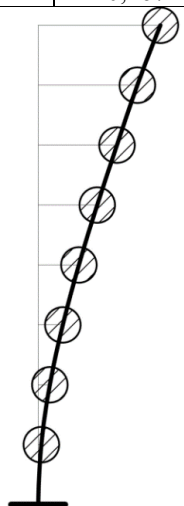
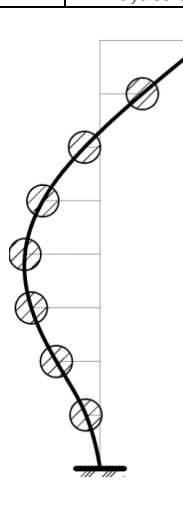
	I форма собственных колебаний		II форма собственных колебаний		III форма собственных колебаний	
	Ферма ЦФ	Ферма БФ	Ферма ЦФ	Ферма БФ	Ферма ЦФ	Ферма БФ
ω_1 (рад/с)	16,257	14,375	40,386	71,354	67,899	79,722
Форма						

Таблица 2. Формы собственных колебаний высотного здания

I форма собственных колебаний			II форма собственных колебаний		
ω_1 , рад/сек	f_1 , сек ⁻¹	T_1 , сек	ω_1 , рад/сек	f_1 , сек ⁻¹	T_1 , сек
13,467	2,143	0,467	70,014	11,143	0,0897
					
$\varphi_{11} = 1$			$\varphi_{12} = 1$		
$\varphi_{21} = 0,757$			$\varphi_{22} = 0,575$		
$\varphi_{31} = 0,461$			$\varphi_{32} = 0,091$		
$\varphi_{41} = 0,227$			$\varphi_{42} = -0,457$		
$\varphi_{51} = 0,137$			$\varphi_{52} = -0,612$		
$\varphi_{61} = 0,071$			$\varphi_{62} = -0,513$		
$\varphi_{71} = 0,024$			$\varphi_{72} = -0,208$		

Таким образом, при помощи формулы (3) учитываются как статические, связанные с увеличением общей скорости ветра, так и резонансные, связанные с ветровыми порывами, явления. При известном значении Δ_0 (уравнение (3)) может быть построена диаграмма изменения динамической амплитуды колебательного процесса.

Результаты определения перемещений в характерных точках ферм большепролетного здания и высотного здания от штормовой ветровой нагрузки представлены на рисунках 15, 16.

Для определения количества циклов до разрушения может быть использована методика, основанная на построении кривой усталости Веллера для конкретной стали.

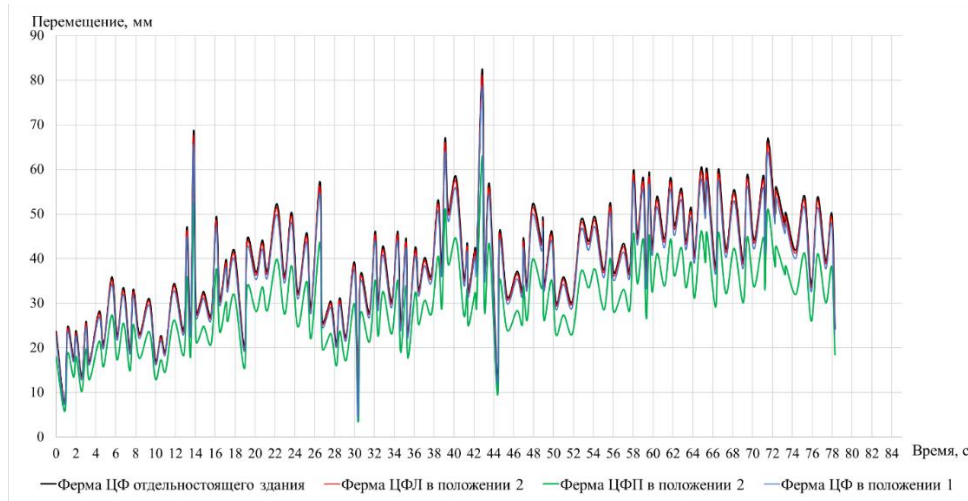


Рис. 15. Перемещения центральной фермы большепролетного здания от штормовой ветровой нагрузки в середине пролета (Обозначение ферм по рис 10.а.)

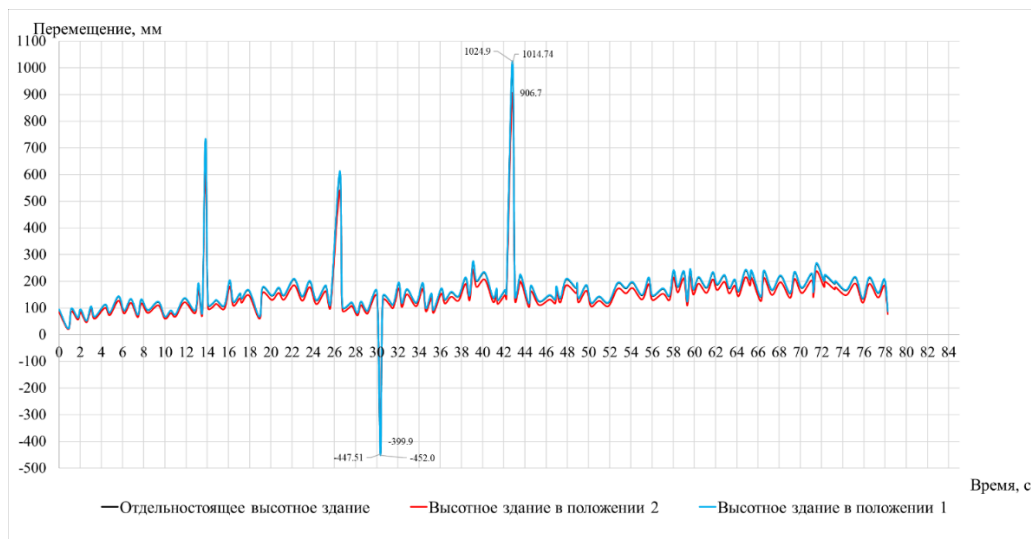


Рис. 16. Перемещение высотного здания от штормовой ветровой нагрузки в верхней точке

В результате штормового ветра происходит резкое увеличение динамических нагрузок. Кривая усталости показывает, чему равняется количество циклов до разрушения при заданном размахе напряжений. Таким образом, может быть получено значение приращения параметра поврежденности при различных значениях напряжений. Реальная диаграмма изменения напряжений каркасного здания (рис. 17.) имеет ряд максимальных значений, каждому из которых будет соответствовать определенное приращение поврежденности.

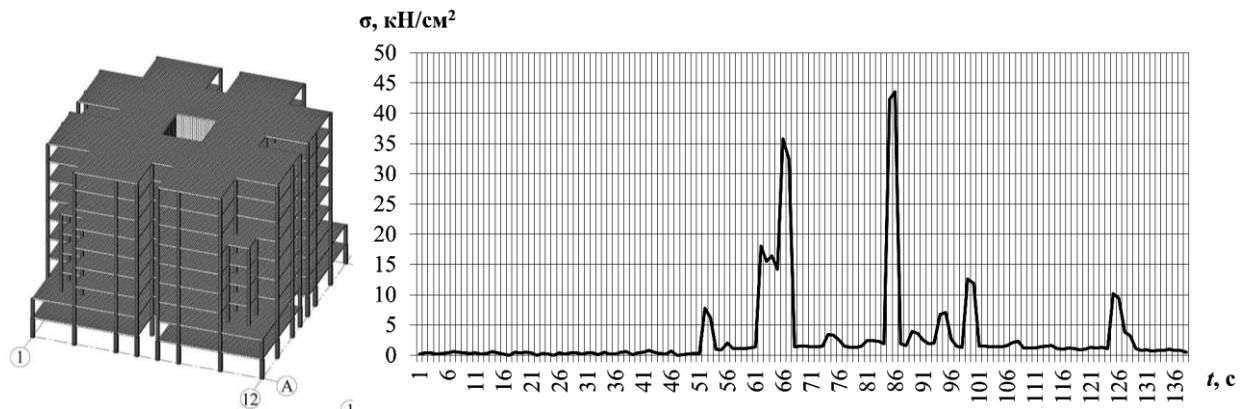


Рис. 17. а) Пространственная конечно-элементная модель каркасного здания. б) График изменения реальных напряжений при штормовых порывах

Учитывая данные гидрометцентра о повторяемости штормовых ветров и скоростях ветрового потока, было определено, что за время шторма может происходить до 75 циклов с максимальным размахом напряжений, равным $43,5 \text{ кН/см}^2$ (рис. 17.б). При близости частот приращение поврежденности за время штормового ветра может достичь 0,0376. Иначе говоря, ресурс материала в опасном сечении снижается на 3-4%.

Для определения реальных сейсмических нагрузок на каркасное здание, моделировались сейсмические воздействия по результатам анализа землетрясения, произошедшего 13 ноября 1993 г. у восточного побережья Камчатки. В ходе анализа акселерограмм были получены графики реальных изменений сейсмических нагрузок (рис. 18.).

Далее определялись динамические напряжения, возникающие в наиболее нагруженном конструктивном элементе и зависящие от двух факторов: статического напряжения от единичной силы в i -ой массе; реальной сейсмической нагрузки.

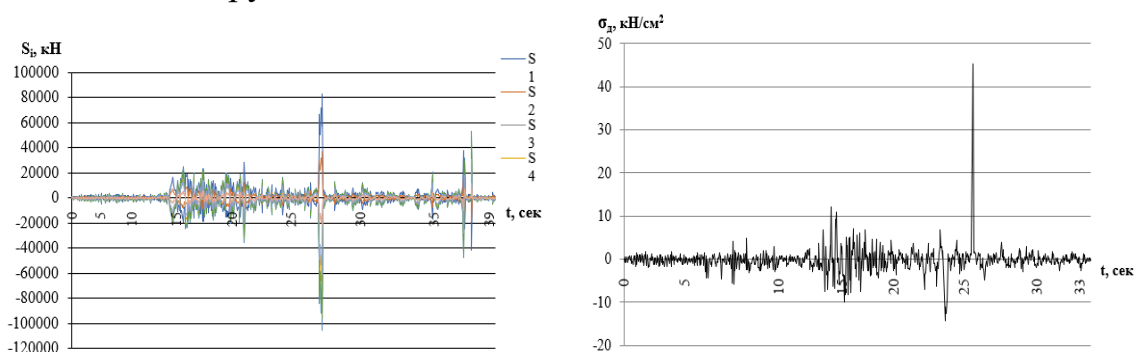


Рис. 18. а) Реальные сейсмические нагрузки.
б) График изменения динамических напряжений

Было определено максимальное напряжение, возникающее в наиболее нагруженной колонне, которое составило $\sigma_{d, \max} = 292,2 \text{ кН/см}^2$. Согласно анализу, возникающие напряжения в колонне в 6,8 раза превышают ее несущую способность. Таким образом, колонна не отвечает требованиям прочности.

Кроме этого, было определено максимальное значение динамического напряжения в наименее нагруженной колонне, которое составило $39,6 \text{ кН/см}^2$. Данное значение не превышает расчетного сопротивления материала колонны ($R_y = 43 \text{ кН/см}^2$), но в остальных колоннах напряжения будут превышать

несущую способность конструкции.

В результате этих необратимых процессов может произойти разрушение большинства колонн, то есть здание не выдержит землетрясение с магнитудой в 7 баллов и разрушится от действия резонансных эффектов, возникающих в период сейсмических воздействий. Предлагается произвести изменение конструктивной схемы, с увеличением жесткости каркаса. При этом необходимо отметить, что данное событие маловероятно ввиду необходимости наступления большого числа условий, обуславливающих полное совпадение собственных частот здания и колебаний грунта, а также достижение резонанса.

Заключение

1. Разработана методика экспериментальных аэродинамических исследований, базирующаяся на определении безразмерных характеристик давления. Методика была апробирована на нескольких объектах сложной формы. Были получены реальные картины распределения ветровых потоков по поверхностям. Были построены изополя изменения аэродинамических характеристик на основании данных эксперимента в аэродинамической трубе, которые подтвердились численным расчетом с использованием специализированного программного оборудования. Небольшие различия объясняются погрешностями при проведении эксперимента, а также спецификой расчетов по методам конечных элементов. Из-за сложности конструкций в некоторых местах здания значения аэродинамических коэффициентов могут сильно превышать значения, представленные в нормативных документах для зданий простых форм, а также иметь противоположное направление. Методика применена при разработке систем мониторинга конструкций в рамках проекта «Техноплатформа 2035», реализованного на (акт внедрения № 01/25 от 15.01.2025 г.) при реализации проекта «Техноплатформа 2035» (соглашение № 16-11-2021/55 от 16.11.2021 г.).

2. Аэродинамические характеристики тел, объединенных в систему через воздушную среду, могут значительно отличаться от характеристик каждого тела в отдельности. Ветровые потоки огибают переднее тело, отражаются от заднего, образуют завихрения, что сказывается на значениях давлений на поверхностях. Изменение давлений в свою очередь влияет на итоговые динамические процессы, происходящие при колебаниях систем. Значения перемещений и напряжений могут как уменьшаться, так и увеличиваться. Зачастую нормативные методики недостаточно точно учитывают или не учитывают вовсе взаимное влияние объектов, взаимодействующих с аэродинамическими потоками, что может значительно снизить точность и, следовательно, безопасность при эксплуатации.

3. Разработан способ и программное обеспечение (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2025610352 от 10.01.2025.) определения частот собственных колебаний конструкций с помощью упрощенных многомассовых моделей. Зачастую сложные механические системы могут быть упрощены до многомассовой модели, имеющей конечное число динамических степеней свободы, если такая модель способна отражать основные параметры движения и подобная идеализация не приводит к потере качества расчета.

Бесконечное число распределенных масс заменяется конечным числом сосредоточенных в характерных точках. Остальные участки системы, оставшиеся без масс, рассматриваются как «безынерционный скелет» системы, сохранивший деформационные свойства рассчитываемой конструкции. Классическая система уравнений теоретической механики для объектов с несколькими степенями свободы может быть использована для определения частот и форм собственных колебаний конструкций. Результаты внедрены в ООО «АТОМЭЛЕКТРОПРОЕКТ» (справка внедрения от 31.01.2025, б/н).

4. Разработан алгоритм математического моделирования расчетных синтезированных анемодиаграмм по требуемым псевдослучайным частотным и скоростным характеристикам. Данный алгоритм учитывает собственные характеристики как проектируемой конструкции или объекта, так и особенности ветрового района строительства. Разработано программное обеспечение (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024690234 от 13.12.2024), значительно упрощающее выбор наиболее неблагоприятных условий работы. Результаты внедрены в ООО «АТОМЭЛЕКТРОПРОЕКТ» (справка внедрения от 31.01.2025, б/н).

5. Разработана методология расчета систем на колебания, вызванные аэродинамическим воздействием при помощи упрощенных многомассовых моделей. Показана необходимость учета возможности достижения резонанса собственных частот конструкций и частот ветровых порывов, так как при этом нагрузки, а следовательно, и перемещения, и внутренние напряжения могут многократно возрастать, что может приводить к разрушению материалов и обрушению конструкций. Помимо этого, в сложных покрытиях при действии пульсационной ветровой нагрузки могут возникать резонансные эффекты, действие которых в условиях эксплуатации сооружения не предсказуемо. Методика применена при разработке систем мониторинга конструкций в рамках проекта «Техноплатформа 2035», реализованного на (акт внедрения № 01/25 от 15.01.2025 г.) при реализации проекта «Техноплатформа 2035» (соглашение № 16-11-2021/55 от 16.11.2021 г.).

6. Собственная частота конструкции может находиться в диапазоне возможных частот штормовых порывов. В результате происходит резкое увеличение динамических нагрузок, что приводит к истощению ресурса материала в наиболее опасных сечениях. Увеличение поврежденности приводит к общей деградации свойств материалов, уменьшению модуля упругости, прочности. В результате этих необратимых процессов может произойти изменение отношений жесткостей, что приведет к изменению расчетной схемы и к итоговому изменению расчетных усилий, а также повлияет на динамические характеристики здания (частоты и формы собственных колебаний)

7. Проведено исследование динамических режимов работы стационарных электрогенерирующих установок, использующих энергию аэродинамического взаимодействия, интегрированных в конструкции, на основании которого предложены алгоритмы поиска рациональных форм и ориентации высотных объектов. Для эффективного вовлечения потоков воздуха к ветрогенераторам и их стабилизации для уменьшения усталостных нагрузок на

лопасти турбин форма здания должна иметь воронкообразное очертание в плане, а само здание должно быть расположено с учетом преобладающего направления ветра для повышения выходной мощности турбин. Модели, не имеющие воронкообразного очертания, более энергоэффективны, однако имеют больший размер по фронту ветрового потока, что увеличивает ветровую нагрузку, а меньшая ширина усложняет обеспечение требуемой жесткости всей конструкции. При проектировании необходимо принимать формы с оптимальным соотношением энергоэффективности ветрогенераторов, значений ветровой нагрузки и изгибной жесткости всей конструкции.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Публикации в журналах, входящих в международные базы данных (приравнивается к перечню ВАК, категория K1):

1. Erofeev V.I. Statistical model of aerodynamic impact on the large-span coverage / V.I. Erofeev, A.V. Ilyakhinsky, E.A. Nikitina, V.M. Rodyushkin, P.A. Khazov, **A.A. Satanov** // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 19 (№3) - 2023. P. 20-30.

2. **Satanov A.A.** Oscillations of Structures Interacting through an Aerodynamic Medium / **A.A. Satanov**, V.I.Erofeev, P.A. Khazov // 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). IEEE, 2024.

3. Хазов, П.А. Методика математического моделирования синтезированных анемограмм для аэродинамического расчета конструкций / П.А. Хазов, А.К. Ситникова, **А.А. Сатанов**, А.П. Помазов // Жилищное строительство, 2025, №3. С. 39-44. (RSCI)

Публикации в журналах, входящих в перечень ВАК по специальности 1.1.7. «Теоретическая механика, динамика машин»:

4. Ведяйкина, О.И. Аэродинамика высотных комплексов с интегрированными ветрогенерирующими установками / О.И. Ведяйкина, В.А. Коновалова, М.В. Старикова, П.А. Хазов, **А.А. Сатанов** // Журнал теоретической и прикладной механики, 2025, №1 (90) С. 62-72.

5. Ерофеев, В.И. Колебания изолированных и связанных многомассовых систем при аэродинамическом воздействии / В.И. Ерофеев, **А.А. Сатанов**, П.А. Хазов, О.И. Ведяйкина // Машиностроение и инженерное образование, 2024, № 3–4 (75). С. 3-11.

6. Ерофеев, В.И. Рациональная ориентация объектов с интегрированными ветрогенераторами по критерию максимизации вырабатываемой электроэнергии / В.И. Ерофеев, **А.А. Сатанов**, П.А. Хазов, М.Л. Поздеев, А.В. Симонов // Машиностроение и инженерное образование – 2023. – №4 – С. 39–46.

Монографии:

7. Хазов, П.А. Динамика строительных конструкций при экстремальных природных воздействиях: колебания, прочность, ресурс / П.А. Хазов, Д.А. Кожанов, А.М. Анущенко, **А.А. Сатанов** // Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. - 98 с.

8. Аносов, М.С. Акустические волны в материалах и элементах конструкций с дефектами, неоднородностями и микроструктурой / М.С. Аносов, А.М. Антонов, **А.А. Сатанов** [и др.]. - Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2021. - 311 с.

Программы для ЭВМ (приравнивается к перечню ВАК, категория К1):

9. Определение собственной частоты механической системы с известными жесткостными параметрами / Хазов П.А., **Сатанов А.А.**, Ситникова А.К., Васина Л.Ю. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2025610352, 10.01.2025. Заявка № 2024691111 от 18.12.2024.

10. Генератор расчетных анемোগрамм / Хазов П.А., **Сатанов А.А.**, Помазов А.П., Помазов С.П., Симонов А.В. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2024690234, 13.12.2024. Заявка № 2024689881 от 06.12.2024.

Публикации в журналах, входящих в перечень ВАК по иным специальностям:

11. Ерофеев, В.И. Влияние штормовой нагрузки на поврежденность материала несущих конструкций каркасного здания / В.И. Ерофеев, Е.А. Никитина, П.А. Хазов, **А.А. Сатанов**, А.А. Генералова // Приволжский научный журнал. - 2019. - № 1 (49). - С. 9-15.

12. Анущенко, А.М. Исследование обтекания воздушными потоками большепролетной поверхности численным и экспериментальными методами / А.М. Анущенко, В.И. Ерофеев, П.А. Хазов, **А.А. Сатанов**, А.В. Февральских // Приволжский научный журнал. - 2021. - №1(57). С. 9-18.

13. **Сатанов, А.А.** Экспериментальное исследование распределения аэродинамических коэффициентов на высотное здание / **А.А. Сатанов**, М.Л. Поздеев, А.В. Симонов, А.П. Помазов, П.А. Хазов // Приволжский научный журнал. - 2022. - № 3 (63). - С. 43-51.

14. **Сатанов, А.А.** Экспериментальное исследование распределения аэродинамических коэффициентов по поверхностям уникального высотного здания / **А.А. Сатанов**, А.А. Молева, Е.П. Исаева, Н.Г. Абрамян // Приволжский научный журнал. - 2023. - № 2(66). - С. 61-68.

15. **Сатанов, А.А.** Определение аэродинамических характеристик большепролетного здания экспериментальными методами / **А.А. Сатанов**, А.В. Симонов, П.А. Хазов // Строительная механика и конструкции. - 2023. - № 1(36). - С. 63-74.

16. **Сатанов, А.А.** Физическое и численное моделирование аэродинамики большепролетной конструкции при различных направлениях ветрового потока. / **А.А. Сатанов** // Строительная механика и конструкции. - 2023. - № 2(37). - С. 87-97.

Прочие издания:

17. Фурса О.В. Аэродинамическое взаимодействие связанной системы тел / О.В. Фурса, **А.А. Сатанов** // XIII Всероссийский Фестиваль науки. Сборник тезисов. Нижний Новгород, 2023. С. 110-111.

18. **Сатанов А.А.** Аэродинамические характеристики зданий сложной формы / **А.А. Сатанов**, А.В. Симонов, П.А. Хазов // Необратимые процессы в природе и технике. Труды Двенадцатой Всероссийской конференции. В 2-х томах. Москва, 2023. С. 188-195.

19. **Сатанов А.А.** Экспериментальное и численное моделирование взаимодействия систем тел через аэродинамическую среду / **А.А. Сатанов**, В.И. Ерофеев, П.А. Хазов // XIII Всероссийский Съезд по теоретической и прикладной механике. Сборник тезисов докладов. Санкт-Петербург, 2023. С. 428-431.

20. **Сатанов А.А.** Исследование распределения ветрового давления на поверхность зданий уникальной формы / **А.А. Сатанов** // Сборник тезисов докладов участников VII Всероссийского молодежного научного форума «Наука будущего – наука молодых». Новосибирск, 2022, С 292.

21. **Сатанов, А.А.** Определение аэродинамических характеристик большепролетного здания терминала аэропорта экспериментальными методами / **А.А. Сатанов**, А.В. Симонов, П.А. Хазов // В сборнике: Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред. Сборник трудов 12-й Всероссийской научной конференции с международным участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского. Москва. - 2022. - С. 303-309.

22. **Сатанов, А.А.** Сравнение результатов физического и численного моделирования распределения ветровой нагрузки на покрытие большепролетного здания / **А.А. Сатанов** // В сборнике: XLVII Гагаринские чтения. Сборник трудов Международной молодежной научной конференции. Секция "Механика и моделирование материалов и технологий". Москва. - 2021. - С. 137-138.

23. **Сатанов, А.А.** Анализ напряженности материала большепролетных конструкций покрытия здания велодрома при динамических воздействиях. / **А.А. Сатанов** // В сборнике: XXVI Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные науки). Материалы конференции. Нижний Новгород. - 2021. - С. 142-146.

24. Ерофеев, В.И. Частоты и формы собственных колебаний высотного здания во Владивостоке при расчете на максимальное расчетное землетрясение / В.И. Ерофеев, **А.А. Сатанов**, П.А. Хазов, М.А. Шишова // В сборнике: Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКоМ - 2020). Сборник трудов V Международной научно-технической конференции в дистанционном формате. - 2020. - С. 237-241.

25. **Satanov, A.A.** Analysis of frequencies and modes of natural vibrations of an earthquake-resistant high-rise building in Vladivostok / **A.A. Satanov**, М.А. Shishova // В сборнике: Великие реки 2020. Труды научного конгресса 22-го Международного научно-промышленного форума. Ответственный редактор А.А. Лапшин. - 2020. - С. 387-391.

26. Хазова, А.А. Анализ влияния дефектов на значения механических напряжений в материале / А.А. Хазова, А.К. Платунова, **А.А. Сатанов** // В сборнике: VII Всероссийский фестиваль науки. сборник докладов: в 2 томах. Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. - 2017. - С. 112-115.