

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный
исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-
Грехова Российской академии наук»

на правах рукописи



САТАНОВ Андрей Андреевич

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

1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д. ф.-м. н., профессор
ЕРОФЕЕВ Владимир Иванович

Нижний Новгород

2025 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. Общие положения динамики конструкций, колебаний сложных систем, поврежденности материалов.....	13
1.1 Общие сведения о динамических нагрузках.....	13
1.2 Общие сведения о колебаниях многомассовых систем.....	15
1.3 Повреждение конструктивных материалов в процессе усталости	18
1.4 Методы проведения исследований.....	22
1.5 Тела простой формы	26
ГЛАВА 2. Моделирование взаимодействия твердых тел горизонтальной конфигурации воздушными потоками при колебаниях.....	30
2.1 Криволинейная оболочка двоякой кривизны.....	32
2.2 Арочная конструкция с покрытием из ферм.....	37
2.3 Криволинейное покрытие из нескольких частей.....	45
ГЛАВА 3. Моделирование взаимодействия твердых тел вертикальной конфигурации воздушными потоками при колебаниях.....	51
3.1 Многофункциональное высотное здание	53
3.2 Аэродинамическое взаимодействие связанной системы тел	57
3.3 Интеграция ветрогенераторов в высотное здание	65
3.4 Экспериментальное моделирование аэродинамики высотного здания с ветрогенераторами	74
ГЛАВА 4. Динамические расчёты конструкций зданий при обтекании газодинамической средой.....	78
4.1 Методика определения собственных динамических характеристик сложных систем при помощи многомассовых моделей.....	78
4.2 Колебания фермы здания с покрытием в виде криволинейной оболочки двоякой кривизны	89
4.3 Резонансный анализ здания аквапарка с учетом податливости основания ...	95
4.4 Анализ сейсмостойкости уникального высотного здания.....	102
4.5 Определение динамических напряжений, возникающих в конструкциях каркасного здания от сейсмических воздействий	109
4.6 Колебания конструкций при взаимном влиянии близкорасположенных объектов	116
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	124
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	127
Приложение А. Акты внедрения	146
Приложение Б. Свидетельства о регистрации объектов интеллектуальной собственности	148

ВВЕДЕНИЕ

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 интергаии 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 [6, 7, 13, 18, 24-28, 33, 39, 40, 42, 52-55, 59, 62-64, 68-75, 85, 86, 90-93, 97, 104, 105, 134, 135, 140, 143, 164]. Основы микромеханики поврежденной среды предложены в работах [8, 43, 56, 58, 77, 80, 83, 87, 108-111, 113, 141, 142, 146, 160]. Вопрос взаимодействия зданий и сооружений с ветровыми нагрузками рассмотрен многими российскими и зарубежными авторами [1, 10, 12, 15-17, 23, 27, 29, 35, 38, 45, 46, 57, 84, 100, 112, 116]. Однако, на данный момент не существует единой методики определения аэродинамических характеристик инженерных объектов сложной формы, помимо трудозатратного физического и численного моделирования [4, 9, 11, 14, 26, 48, 60, 95, 107, 116, 145]. Аэродинамика летательных аппаратов рассмотрена в работах [3, 49, 82, 147-149]. Расчеты объектов на сейсмические воздействия представлены в работах [2, 5, 20, 61, 78, 86, 89, 94, 99, 101-103, 109, 154, 161].

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 анемодиаграмм 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 международных 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.

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

1.1 Общие сведения о динамических нагрузках

Динамические нагрузки по своей природе очень разнообразны. К ним относят воздействия, связанные с природными явлениями, например, сейсмические толчки и ветровые порывы, а также динамические воздействия технологического и аварийного происхождения: падение летящего тела при соударении его с элементами конструкций, работа молотов, копров и других ударных механизмов, движение неуравновешенных частей машин и механизмов, движение поездов, кранов и т.д [155].

По закону изменения во времени динамические нагрузки разделяются на периодические и непериодические. К первым относят повторяющиеся нагрузки с одинаковой периодичностью при большом числе циклов. Наиболее распространенным является гармонический (синусоидальный) вид периодической нагрузки. Непериодические нагрузки характеризуются импульсным характером, внезапным и кратковременным действием, большой интенсивностью. Они могут быть однократными (удар, взрыв) или повторного действия (сеймика, порывы ветра, воздействия морских волн).

Особенность динамических нагрузок состоит в том, что сооружение переходит в состояние движения. Периодическое повторение динамических воздействий приводит к накоплению энергии механической системой, наблюдается постепенное увеличение амплитуды колебаний, приводящее к явлению резонанса, при котором может произойти разрушение от воздействий с малой интенсивностью [56, 93, 98].

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 сосредоточенными массами. Места сосредоточения масс выбираются таким образом, чтобы совместить их положение с местами расположения наибольших вертикальных нагрузок. Остальные участки системы,

оставшиеся без масс, рассматриваются как безынерционный скелет системы, сохранивший деформационные свойства рассчитываемой конструкции.

Механическая система совершает колебательные движения под действием внутренних усилий и внешних динамических нагрузок. В проектировании механической системой может являться невесомый связевой остов, на котором расположены сосредоточенные или распределенные массы, характеризующие инерционные явления в системе, а колебания этих масс вызывают усилия и перемещения, требующие сопоставления с допустимыми значениями в рамках динамических расчетов [45, 59, 117].

Важнейшими характеристиками, определяющими поведение конструкций при действии внешних динамических нагрузок, являются частоты и формы собственных колебаний. Большинство методов расчета на динамические нагрузки основаны на определении данных параметров.

В механике можно выделить одномассовые, двухмассовые и многомассовые системы (рис. 1.1), к которым принято приводить реальные объекты для упрощения расчетов. Так, для множества технических объектов с простыми конструктивными решениями возможно применение консольной расчетной модели, как наиболее простой с точки зрения инженерного расчета, при этом для определения усилий в реальных конструкциях необходимо учитывать не менее трех форм собственных колебаний, если период первой формы собственных колебаний $T_1 > 0,4\text{с}$, и только первой при $T_1 \leq 0,4\text{с}$ [56, 136, 137].

Цели динамического расчета:

- определение частот собственных колебаний систем и сравнение их с частотами вынуждающих воздействий с целью исключения возможности появления резонанса путем динамического регулирования;
- определение максимальных напряжений, возникающих в элементах конструкций в процессе колебаний и сравнение их с предельно допустимыми величинами, установленными из условий прочности, устойчивости, выносливости;
- определение динамических перемещений (амплитуд) и сравнение их с предельно допустимыми значениями, установленными нормами.

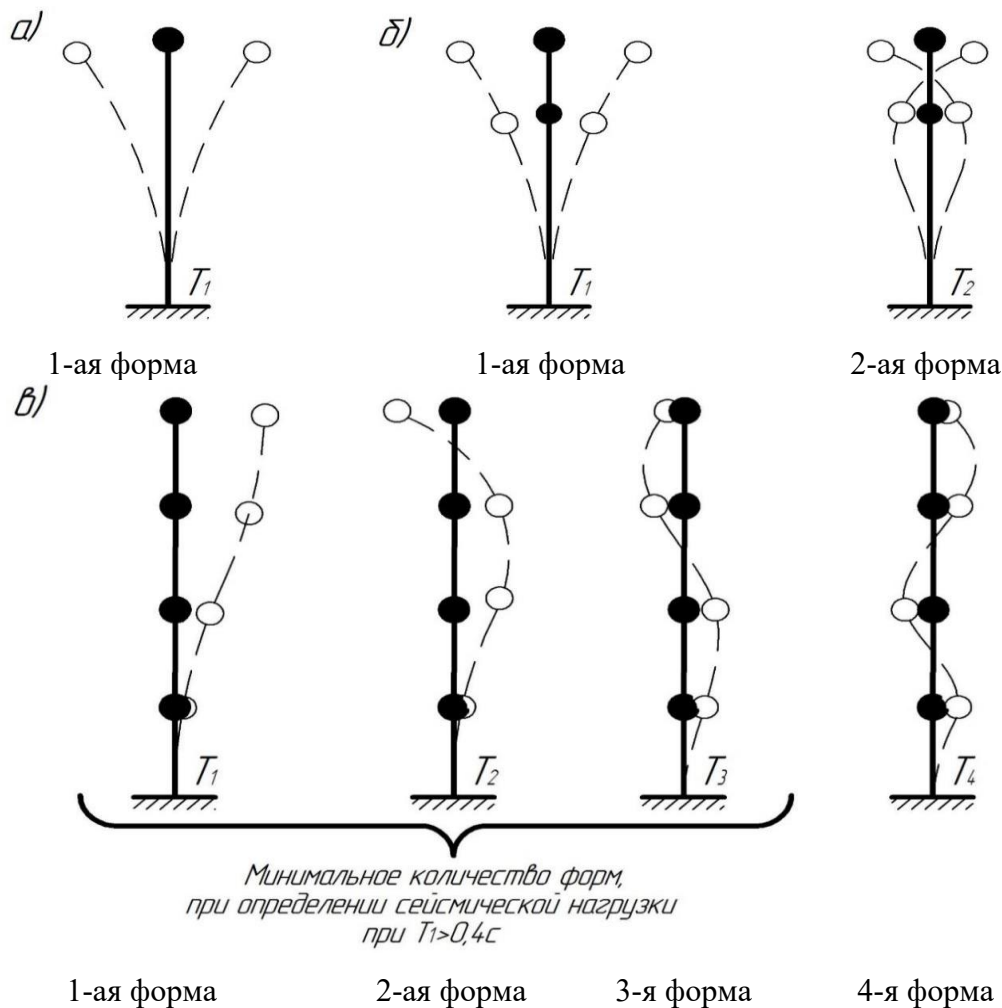


Рис. 1.1. Формы собственных колебаний сооружения для одномассовой (а), двухмассовой (б) и многомассовой (в) механической системы

1.2 Общие сведения о колебаниях многомассовых систем

Свободные (собственные) колебания – это колебания в системе под действием внутренних сил после выведения ее из состояния равновесия. Простейшими примерами свободных колебаний являются колебания груза, прикреплённого к пружине или подвешенного на нити.

Частота собственных колебаний является важнейшей динамической характеристикой системы, поскольку ее величина значительно влияет на расчетные значения нагрузок. Ошибки, допущенные на стадии вычисления частоты собственных колебаний, приводят к неправильному определению напряженно-деформированного состояния конструкций при динамических воздействиях. Помимо этого, неверное определение собственной частоты колебаний может привести к возникновению неспрогнозированных резонансных явлений, которые являются достаточно опасными [78, 101, 137].

Уравнения движения - математические выражения, которые определяют динамические перемещения механических систем. Их решение позволяет определить искомые функции изменения перемещений во времени. Составление уравнений движения представляет собой самый важный этап динамического расчета.

Для механических систем с несколькими степенями свободы, в качестве которых могут быть рассмотрены сосредоточенные массы $M_1, M_2 \dots M_n$ (рис. 1.2), справедливы следующие утверждения:

- любая масса сопротивляется изменению своей скорости или ускорения;
- согласно принципу Даламбера, масса считается уравновешенной, если помимо внешних сил к ней приложить силу инерции F_i , противоположную ускорению [47, 164].

Принимая за величину y_i отклонение i -ой массы механической системы, уравнение движения системы может быть записано в следующем виде:

$$\begin{cases} y_1 = F_1\delta_{11} + F_2\delta_{12} + \dots + F_i\delta_{1i} + \dots + F_n\delta_{1n} \\ y_2 = F_1\delta_{21} + F_2\delta_{22} + \dots + F_i\delta_{2i} + \dots + F_n\delta_{2n}, \\ \dots \\ y_i = F_1\delta_{i1} + F_2\delta_{i2} + \dots + F_i\delta_{ii} + \dots + F_n\delta_{in} \end{cases} \quad (1.1)$$

где δ_{ij} – удельное перемещение точки сосредоточенной массы m_i от безразмерной единичной силы, приложенной в точке сосредоточения массы m_j (рис. 1.2).

Подстановка выражения для силы инерции $F_i = -M_i\ddot{y}_i$ в (1.1) дает следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} y_1 + M_1\ddot{y}_1\delta_{11} + M_2\ddot{y}_2\delta_{12} + \dots + M_i\ddot{y}_i\delta_{1i} + \dots + M_n\ddot{y}_n\delta_{1n} = 0 \\ y_2 + M_1\ddot{y}_1\delta_{21} + M_2\ddot{y}_2\delta_{22} + \dots + M_i\ddot{y}_i\delta_{2i} + \dots + M_n\ddot{y}_n\delta_{2n} = 0 \\ \dots \\ y_n + M_1\ddot{y}_1\delta_{n1} + M_2\ddot{y}_2\delta_{n2} + \dots + M_i\ddot{y}_i\delta_{ni} + \dots + M_n\ddot{y}_n\delta_{nn} = 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

Решение (1.2) может быть представлено в следующей форме:

$$y_i = a_i \sin(\omega t + \beta). \quad (1.3)$$

Математические преобразования (1.2) с учетом (1.3) позволяют получить систему уравнений амплитуд:

$$\begin{cases} (M_1\delta_{11} - \frac{1}{\omega^2})a_1 + M_2\delta_{12}a_2 + \dots + M_n\delta_{1n}a_n = 0 \\ M_1\delta_{21}a_1 + (M_2\delta_{22} - \frac{1}{\omega^2})a_2 + \dots + M_n\delta_{2n}a_n = 0, \\ \dots \\ M_1\delta_{n1}a_1 + M_2\delta_{n2}a_2 + \dots + (M_n\delta_{nn} - \frac{1}{\omega^2})a_n = 0 \end{cases} \quad (1.4)$$

где a_i – амплитуда колебаний i -ой массы;

ω – круговая частота собственных колебаний.

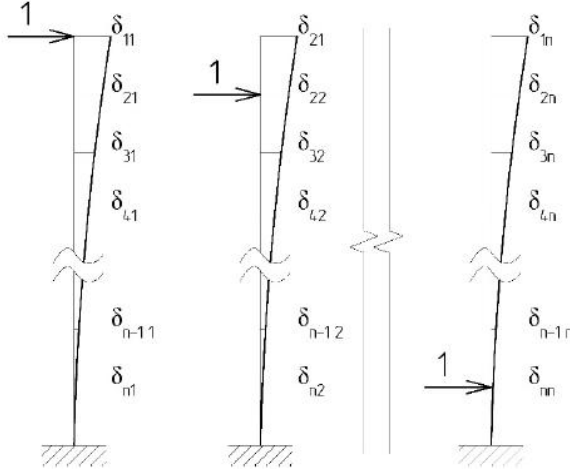


Рис. 1.2. Схема к определению удельных перемещений точек сосредоточения масс (1 – безразмерное единичное усилие, приложенное в точке сосредоточения j -ой массы)

Система уравнений (1.4) имеет решение в двух случаях:

– $a_1 = a_2 = \dots = a_n = 0$ – нулевое решение, которому соответствует отсутствие колебаний, нахождение системы в положении равновесия (тривиальное решение);

– нетривиальное решение возможно в случае, когда определитель матрицы коэффициентов равен 0:

$$\begin{vmatrix} \delta_{11}M_1 - \frac{1}{\omega^2} & M_2\delta_{12} & \dots & M_n\delta_{1n} \\ M_1\delta_{21} & \delta_{22}M_2 - \frac{1}{\omega^2} & \dots & M_n\delta_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_1\delta_{n1} & M_2\delta_{n2} & \dots & \delta_{nn}M_n - \frac{1}{\omega^2} \end{vmatrix} = 0. \quad (1.5)$$

Раскрытие (1.5) позволяет получить многочлен n -ой степени:

$$b_0\lambda^n + b_1\lambda^{n-1} + \dots + b_n\lambda^0 = 0, \quad (1.6)$$

где λ – собственное число матрицы:

$$\lambda = \frac{1}{\omega^2}. \quad (1.7)$$

Данный многочлен имеет n корней – n различных частот собственных колебаний. Частоты, расположенные в порядке возрастания, образуют спектр частот собственных колебаний. Наименьшая частота собственных колебаний соответствует форме колебаний с наименьшей потенциальной энергией деформаций системы – частота основного фона. Последующие частоты, соответствующие большим значениям потенциальной энергии деформации, называют обертонами [155].

1.3 Повреждение конструктивных материалов в процессе усталости

Реальные материалы изначально содержат многочисленные повреждения различных размеров – от микроскопических дефектов до крупных пор и макротрещин (рис. 1.3). Дефекты решетки, трещины и поры различного происхождения и размеров, локальные особенности структуры осложняют картину и приводят к тому, что определение количественных характеристик прочности конструкционных материалов на атомном уровне представляются нереальными [80, 83, 87]. Более реально подойти к установлению прочностных характеристик материалов и прочностных прогнозов на основе механики сплошных сред при одновременном учете как особенностей структуры, так и некоторых общих физических аспектов.

Под разрушением материала обычно понимается образование в каком-либо значительном объеме материала свободной поверхности или макротрещины. При этом происходит выброс энергии, что дает возможность оценки процессов накопления повреждений с позиции энергетических теорий. Поскольку все микродефекты в материале являются концентраторами напряжений, значения напряжений в близлежащих точках могут многократно превышать величину расчетного сопротивления материала, в результате чего наблюдается непрерывный рост этих микродефектов.

Существует разделение полной долговечности образца на составляющие: стадия возникновения микротрещин, стадия зарождения макротрещин, стадия распространения макротрещин [83]. Процесс разрушения и процессы, предшествующие и сопутствующие его возникновению, зависят от физико-

механических характеристик материала, температурно-скоростного режима нагружения, истории изменения и вида напряженно-деформированного состояния.

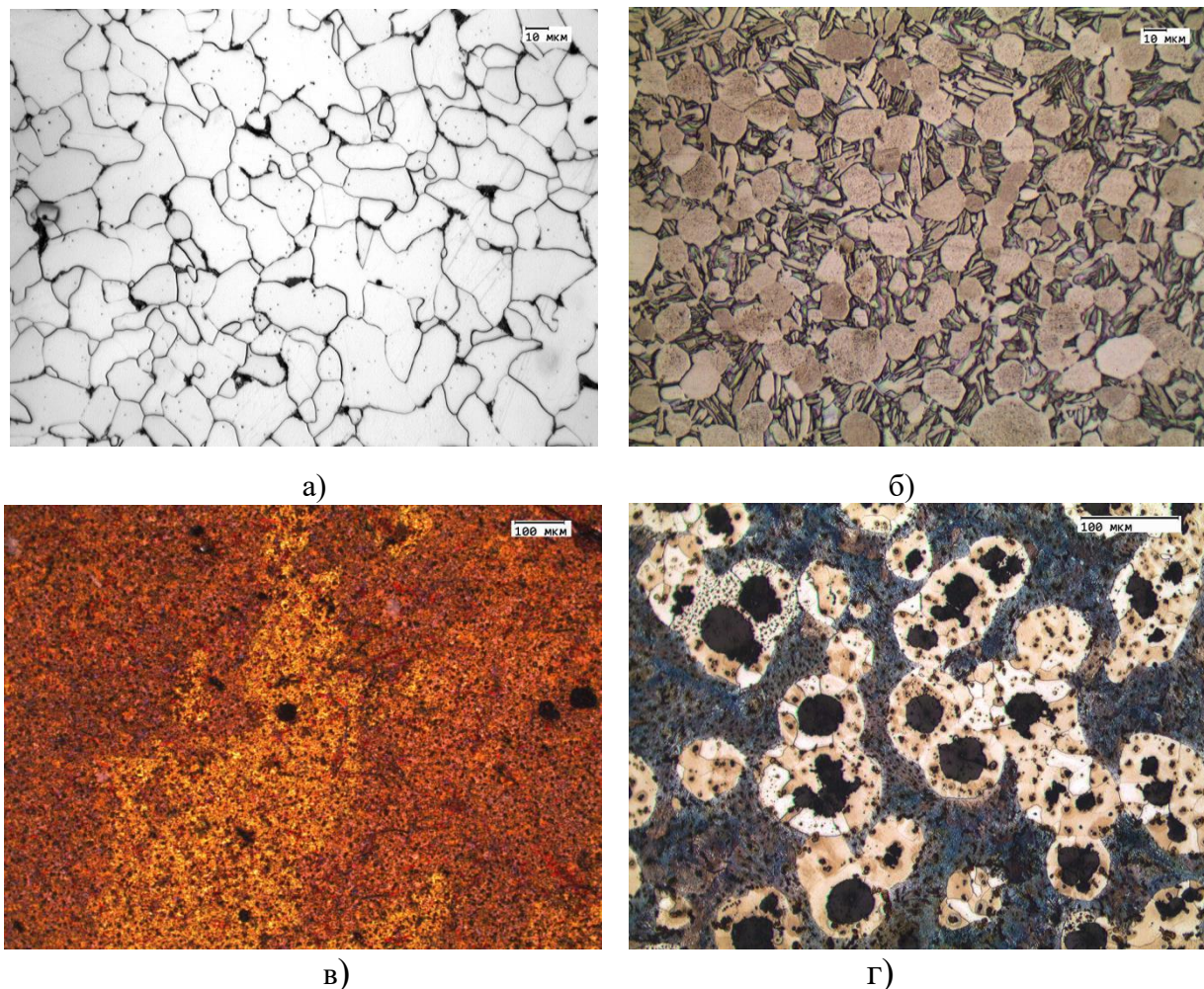


Рис. 1.3. Структура различных металлов при увеличении под микроскопом: а) сталь конструкционная углеродистая СТ37; б) титан ВТ6; в) медь; г) чугун

За меру повреждаемости в процессе развития деформации принимается скалярный параметр $\psi(x, t)$, характеризующий относительную плотность равномерно рассеянных в единице объема микродефектов. Этот параметр равен нулю, когда повреждений нет, и близок к единице в момент разрушения.

Наиболее заметным процесс накопления повреждений становится при многократно повторяющихся нагружениях – процесс усталости материала. При этом выделяется два вида усталости – многоцикловая (МнЦУ) и малоцикловая (МЦУ) [58, 61]. Под многоцикловой усталостью понимается процесс накопления повреждений, при котором амплитудные значения напряжений малы по сравнению с пределом текучести. В этом случае влияние пластических деформаций исчезающе мало. В случае, когда значения напряжений достигают или превышают

предел текучести материала, имеет место малоцикловая усталость. При этом подходы к решению задач, связанных с указанными типами усталости, различны.

В процессе эксплуатации конструкций происходит циклическое изменение их надежности, что связывается с изменчивостью величин нагрузок и изменением несущей способности вследствие различных повреждений. При достижении конструкций определенного уровня надежности в ней будут наблюдаться необратимые повреждения: трещины, потеря устойчивости сжатых элементов, пластические деформации, коррозионные повреждения и т.п.

Повреждения в конструктивных материалах разделяются в зависимости от причин их возникновения на две группы: от силовых воздействий и от воздействия внешней среды. Последняя группа повреждений снижает не только прочность конструкции, но и уменьшает ее долговечность. В зависимости от имеющейся поврежденности и надежности, техническое состояние конструкций разделяется на 5 категорий: нормальное, удовлетворительное, ограниченно работоспособное, неудовлетворительное, аварийное [155].

Влияние повреждений на надежность конструкций оценивается посредством уменьшения общего нормируемого коэффициента надежности (запаса) конструкций в процессе эксплуатации [137]:

$$\gamma_0 = \gamma_m \cdot \gamma_c \cdot \gamma_f \cdot \gamma_n, \quad (1.8)$$

где γ_m - коэффициент надежности по материалу;

γ_c - коэффициент условий работы;

γ_f - коэффициент надежности по нагрузке;

γ_n - коэффициент надежности по назначению.

Относительная надежность конструкции при эксплуатации $y = \gamma/\gamma_0$ и поврежденность конструкции $\varepsilon = 1 - y$, где γ - фактический коэффициент надежности конструкции с учетом имеющихся повреждений.

Общая оценка поврежденности здания и сооружения производится по формуле(1.9):

$$\varepsilon = \frac{\alpha_1 \varepsilon_1 + \alpha_2 \varepsilon_2 + \dots + \alpha_i \varepsilon_i}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_i}, \quad (1.9)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_i$ – максимальная величина повреждений отдельных видов конструкций;

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i$ – коэффициенты значимости отдельных видов конструкций.

При оценке величин повреждений учитывают их максимальную величину, так как авария здания или сооружения обычно происходит из-за наличия критического дефекта в отдельно взятой конструкции.

Коэффициенты значимости конструкций устанавливаются на основании экспертных оценок, учитывающих социально-экономические последствия разрушения отдельных видов конструкций, характера разрушения (разрушение с предварительным оповещением посредством развития пластических деформаций или мгновенное хрупкое разрушение). При отсутствии данных коэффициенты значимости α_i принимаются: для плит и панелей перекрытия и покрытия $\alpha = 2$, для балок $\alpha = 4$, для ферм $\alpha = 7$, для колонн $\alpha = 8$, для несущих стен и фундаментов $\alpha = 3$, для прочих строительных конструкций $\alpha = 2$.

Относительная оценка надежности здания или сооружения [155] производится по формуле:

$$y = 1 - \varepsilon. \quad (1.10)$$

Величину повреждения строительных конструкций через t лет ее эксплуатации определяют по формуле:

$$\varepsilon = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (1.11)$$

где $\lambda = \frac{-\ln y}{t\varphi}$ – постоянная износа, определяемая по данным обследования на основании изменения несущей способности в момент обследования;

y – относительная надежность, определяемая по категории технического состояния конструкции в зависимости от повреждений;

t – срок эксплуатации в годах на момент обследования.

Срок эксплуатации конструкции до капитального ремонта в годах определяется по формуле:

$$t = \frac{0,16}{\lambda}, \quad (1.12)$$

где λ – постоянная износа.

На стадии проектирования необходимо разрабатывать такие проектные решения конструкций, которые исключат появление множества дефектов в процессе их изготовления, монтажа и эксплуатации. Определение ожидаемого уровня надежности объекта позволяет критически подойти к контролю качества и предупредить возникновение аварийного состояния [87].

В современных работах механическую усталость определяют как процесс постепенного накопления повреждений материала под действием повторно-переменных напряжений (деформаций), приводящий к изменению его строения и свойств, образованию и развитию трещин и к разрушению.

Обычно различают малоцикловую и многоцикловую усталость. При малоцикловой усталости окончательное разрушение происходит примерно после 10^3 циклов и менее. При многоцикловой усталости разрушение происходит после $10^3 - 10^9$ циклов.

1.4 Методы проведения исследований

В настоящем исследовании рассматривается ряд задач, связанных с динамикой колебаний многомассовых систем при взаимодействии с аэродинамическими потоками. В связи с этим важным этапом 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. Для определения распределения аэродинамических коэффициентов по поверхностям тел сложной формы прибегают к различным методам моделирования взаимодействия тела с воздушными потоками.

Математическое моделирование, применимое к ветровой аэродинамике, основано на численных схемах решения трехмерных уравнений движения жидкости и газа с адекватными моделями турбулентности, реализованными в современных программно-вычислительных комплексах. Физическое моделирование подразумевает проведение испытания модели здания в аэродинамической установке с сохранением при этом аэродинамического подобия [79, 112, 116, 137].

Аэродинамическая установка представляет собой трубу большого диаметра с продуваемым через неё воздухом, специально разработанную для исследования эффектов, возникающих при обтекании твердых тел воздушным потоком. Иными словами, она моделирует воздействие окружающей среды на испытуемое тело посредством создания равномерного потока в рабочей области. Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1.4.

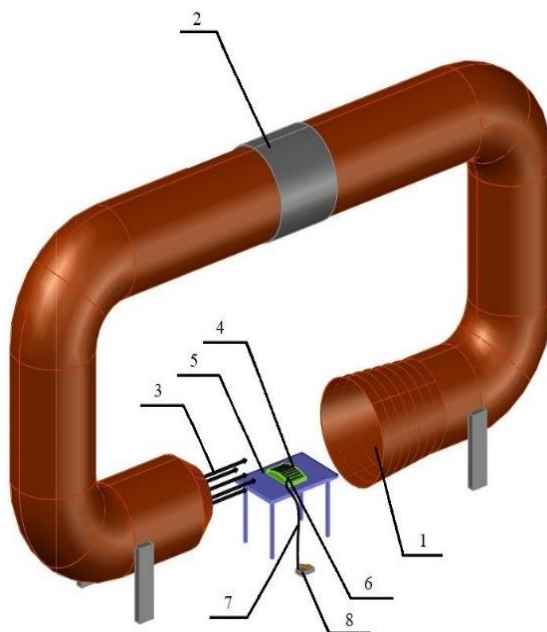


Рис. 1.4. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 – аэродинамическая труба, 2 – вентилятор, 3 – потоки воздуха, 4 – модель здания, 5 – подмакетник, 6 – исследуемая точка, 7 – гибкая силиконовая трубка, 8 – микроманометр

При проведении модельных испытаний должно соблюдаться условие подобия числа Рейнольдса, соответствующего модели и исследуемому объекту. Число Рейнольдса определяется соотношением:

$$Re = \frac{V_0 l_y}{\nu}, \quad (1.13)$$

где V_0 – средняя скорость ветра или потока в аэродинамической трубе;

l_y – размер сооружения или модели в направлении, перпендикулярном направлению скорости;

$\nu \approx 1,45 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ – кинематическая вязкость воздуха.

Так как значение кинематической вязкости воздуха для потока в аэродинамической трубе практически не отличается от того же значения в естественных условиях, а $V_{0э} / V_0 \approx 1$, то отношение чисел Рейнольдса, соответствующих модели и натурному сооружению, пропорционально линейному

масштабу моделирования, т.е. условие подобия числа Рейнольдса при проведении аэродинамических испытаний зданий и сооружений выполняется при соблюдении геометрического подобия модели и исследуемого объекта [125].

Следует заметить, что в большинстве задач гидрогазодинамики соблюдение геометрического подобия не является достаточным условием подобия аэродинамического. В частности, при исследовании воздушного обтекания гиперзвуковых объектов в воздухе или конструкций судов в жидкостях подобие соблюдается при гораздо более строгих условиях. Причиной этому является высокая скорость потока (в случае гиперзвукового обтекания) или значительная вязкость среды (в случае жидкостей при движении судов). Аэродинамика зданий и сооружений является своего рода «исключением» или частным случаем подобных задач. С практической точки зрения основной особенностью аэродинамических испытаний в строительстве является то, что аэродинамические коэффициенты слабо зависят от числа Рейнольдса. Это обстоятельство позволяет с достаточной степенью надежности использовать результаты модельных испытаний при назначении ветровых нагрузок, действующих на реальные сооружения.

Для проведения исследований в аэродинамической трубе была разработана серия макетов, выполненных методом послойного наплавления (*FDM*) из *ABS*-пластика на принтере для трехмерной печати. В характерных точках каждой модели выполнена система дренажных отверстий для подключения гибких силиконовых трубок и последующего измерения давления ветрового потока на поверхность модели. Примеры исследуемых макетов представлены на рисунке 1.5.

Численное моделирование выполнено с использованием рабочей среды программного обеспечения *ANSYS Workbench* и модуля вычислительной гидрогазодинамики *ANSYS CFX*. Аэродинамическое течение моделировалось в области пространства, размеры которого выбраны относительно величины максимального габарита проектируемого объекта $H_{\max}$: $A \geq 5H_{\max}$, $B \geq 5H_{\max}$, $C \geq 15H_{\max}$, $D \geq 6H_{\max}$ (рис.1.6). Принимается, что внешние граничные условия области течения не влияют на результаты определения аэродинамических характеристик вблизи поверхности исследуемого объекта [21,22, 34, 66].

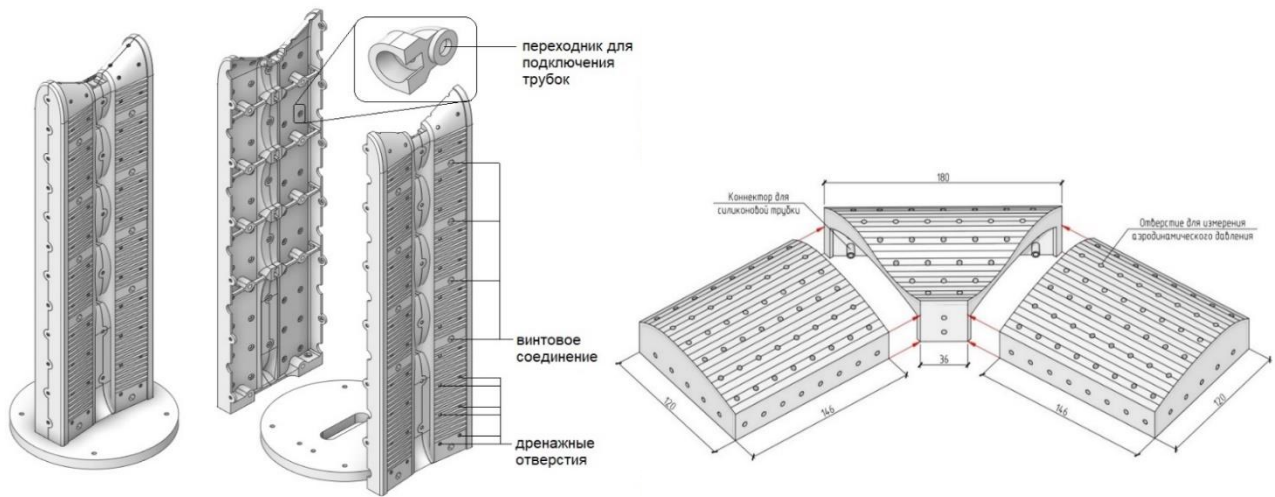


Рис. 1.5. Макеты исследуемых твёрдых тел

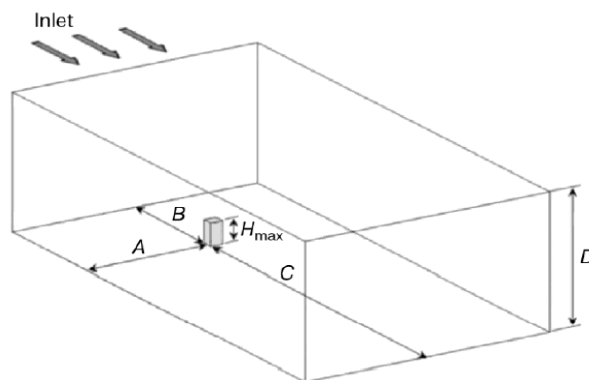
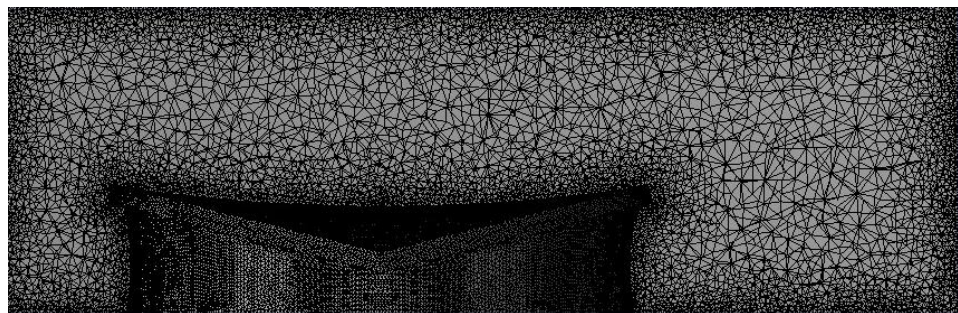


Рис. 1.6. Схема к определению параметров расчетной области

Построение расчетной сетки для метода контрольных объемов осуществлялось в сеточном препроцессоре *ANSYS Meshing*. (рис. 1.7) Для корректного воспроизведения течения в настройках сеточного генератора задавалось сгущение элементов сетки к поверхности здания. В препроцессоре *ANSYS CFX* созданы граничные условия втекания и истечения воздуха из расчетной области. Поверхности здания присвоено граничное условие непротекания *Wall*, при котором на поверхности составляющая скорости по нормали равна нулю, а вязкое трение отсутствует.

Рис. 1.7. Расчетная сетка, сгенерированная в *AnsysMeshing*

1.5 Тела простой формы

Для тел простых форм распределение аэродинамических коэффициентов является тривиальным и может подлежать условному зонированию, что представлено в приложении В [137]. Однако, некоторые упрощения, предложенные в нормативных документах, не всегда могут точно описать картину распределения ветровых нагрузок.

Осредненное по площади значение аэродинамического коэффициента для тел простой формы соответствует значению, представленному в нормативных документах. Однако, в случае усложнения геометрической формы самого объекта и покрытия, распределение аэродинамических коэффициентов неравномерно, из-за чего точка приложения равнодействующей нагрузки может смещаться, изменяя значение опрокидывающего момента в основании. Также имеют место локальные увеличения аэродинамических коэффициентов ближе к краям конструкций, в местах расположения проемов, местах перегибов покрытия. При расчете на динамические нагрузки эти и другие факторы могут сильно повлиять на расчетные значения перемещений и напряжений, а как следствие, и на развитие повреждений в материалах.

В рамках исследования были проведены эксперименты в аэродинамической установке с телами формы параллелепипеда размером 100x200x400мм. При этом исследовалось горизонтальное и вертикальное расположение, а также размещение большей и меньшей в плане стороной к направлению ветровых потоков. Изополя значений аэродинамических характеристик, построенные по результатам эксперимента, приведены на рисунках 1.8, 1.10.

Тела с соответствующими физическому эксперименту размерами и параметрами были замоделированы и исследованы в модуле вычислительной гидрогазодинамики *ANSYS CFX*. Результаты представлены на рисунках 1.9, 1.11.

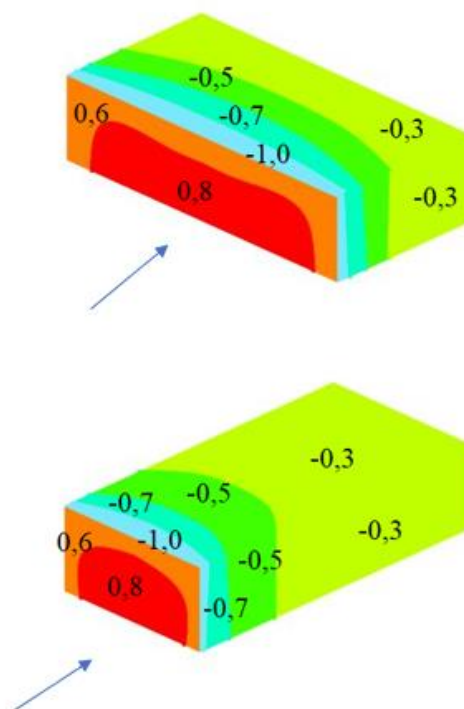


Рис. 1.8. Изополя значений аэродинамических характеристик тела простой формы горизонтальной конфигурации по результатам эксперимента

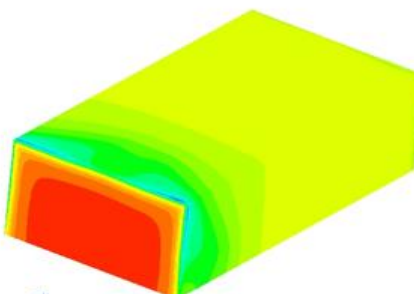
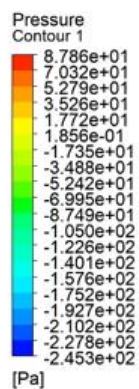
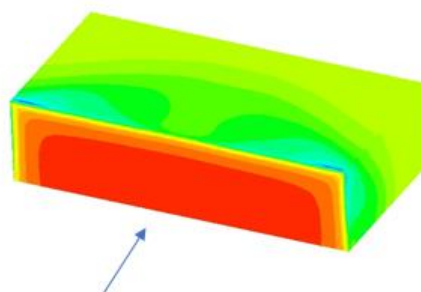
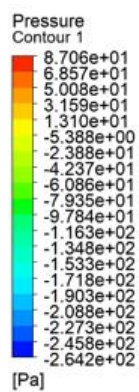


Рис. 1.9. Значения аэродинамических характеристик тела простой горизонтальной конфигурации формы по результатам численного моделирования

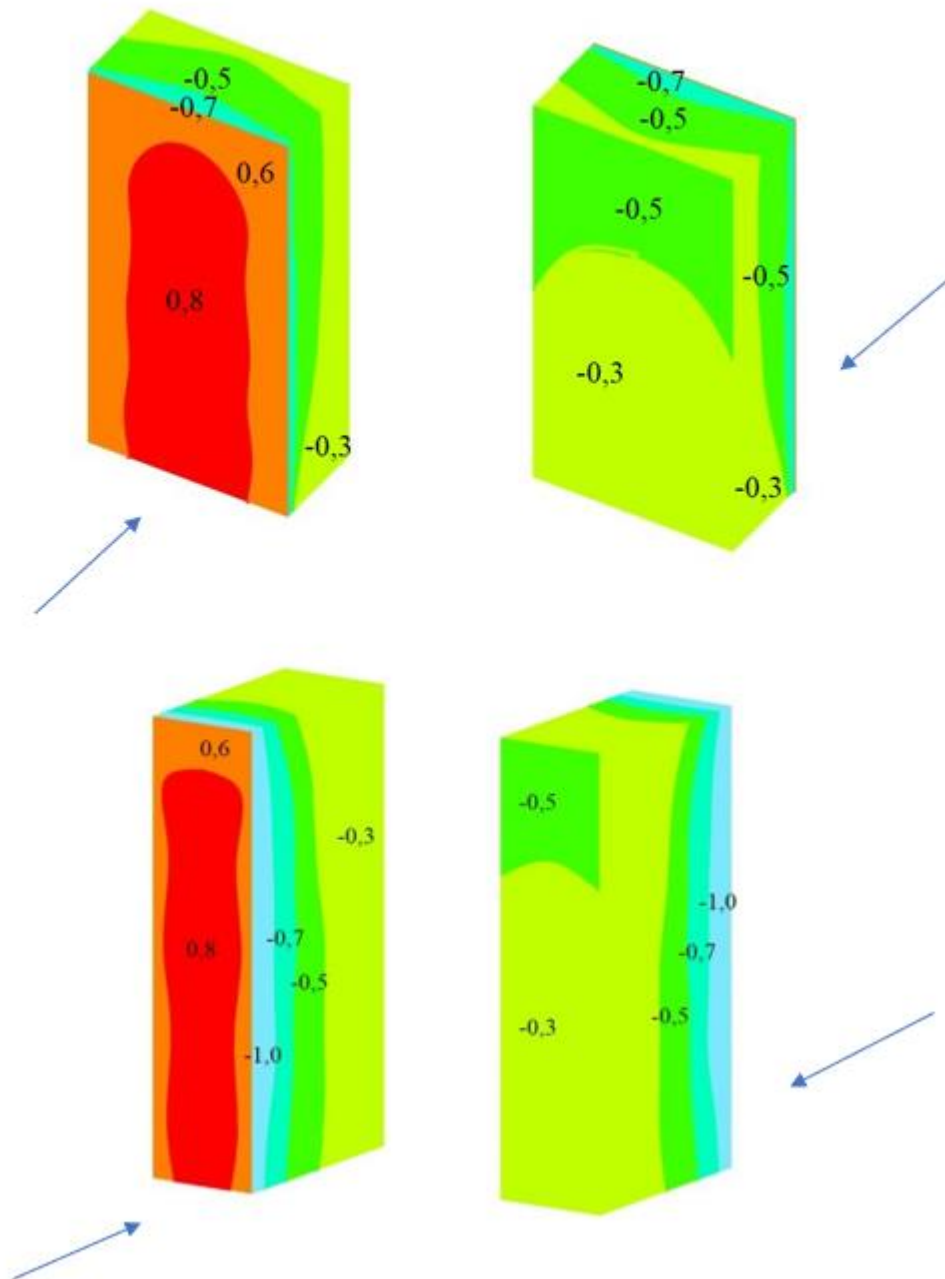


Рис. 1.10. Изополя значений аэродинамических характеристик тела простой формы вертикальной конфигурации по результатам эксперимента

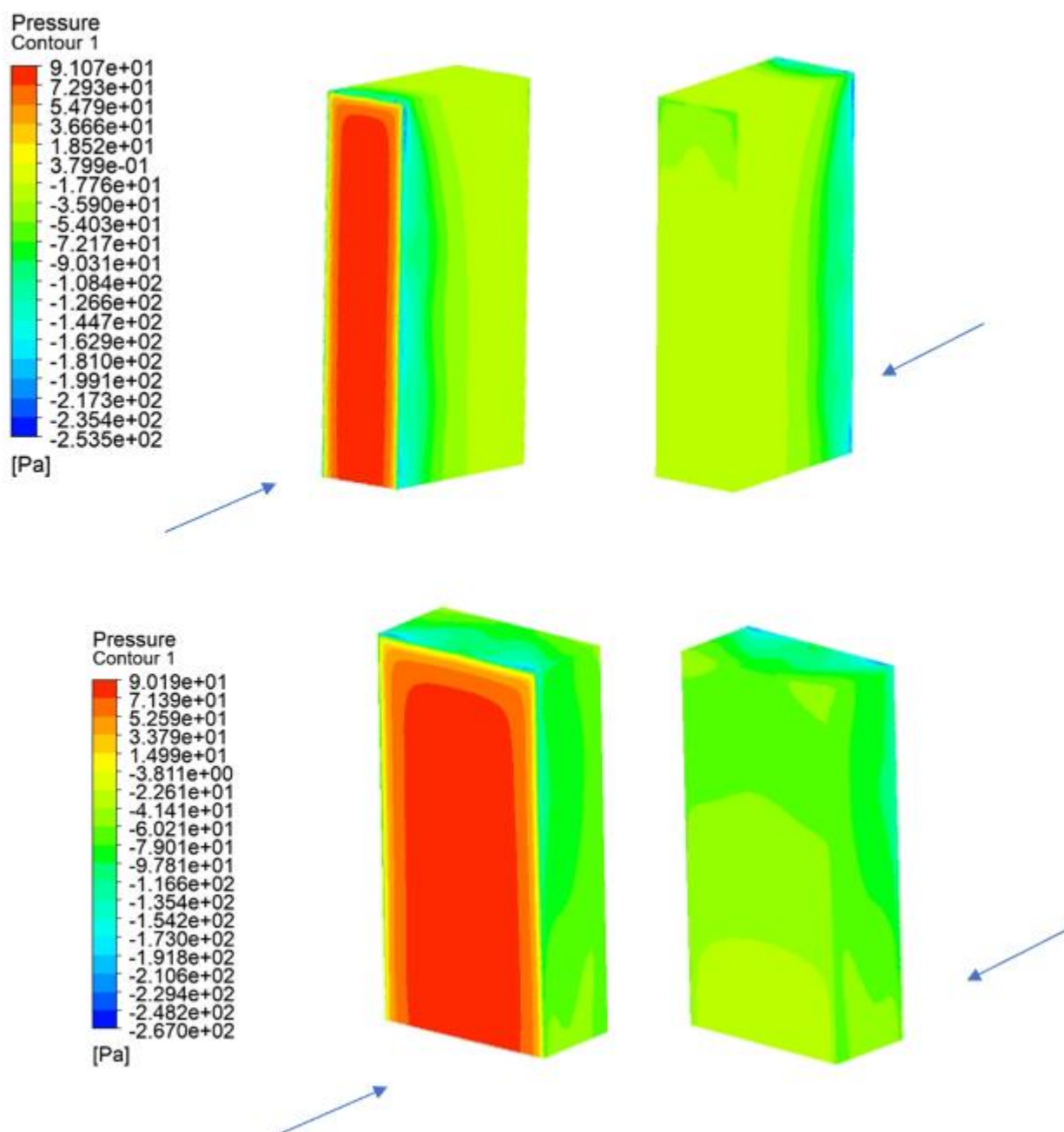


Рис. 1.11. Значения аэродинамических характеристик тела простой вертикальной конфигурации формы по результатам численного моделирования

При сравнении результатов можно отметить их высокую сходимость (в среднем около 5%) и соответствие значениям, предложенным в нормативных документах.

ГЛАВА 2. Моделирование взаимодействия твердых тел горизонтальной конфигурации 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, особенно в случае, когда изучаемая конструкция не оборудована какими-либо специальными системами, призванными реализовывать принципы сейсмо- или виброрегулирования. К таким системам могут быть отнесены системы с повышенным уровнем демпфирования при использовании в дополнение к несущим материалам пластических вставок, системы виброизоляции, системы динамического регулирования, изменяющие значения периодов и частот собственных колебаний в процессе роста амплитуд и приближения к резонансу.

Как правило, основное внимание ученых в области строительства и проектирования при аэродинамических воздействиях направлено на высотные объекты, имеющие два характерных измерения, значительно меньшие третьего. Тем не менее отдельного внимания заслуживают различные конструкции, имеющие горизонтальную конфигурацию. При обтекании таких объектов воздушными потоками образуются отдельные порывы и завихрения, значительно усложняющие общую картину распределения аэродинамических давлений, а изменение общего уровня ветрового воздействия может приводить к колебаниям и упругим волнам в изучаемом покрытии. Как правило, такие объекты представляют собой криволинейные поверхности больших пролетов. Несущие конструкции в данных системах имеют пространственную структуру и являются сложными даже с точки зрения выполнения статических расчетов.

Для описания колебаний объектов горизонтальной конфигурации при аэродинамическом воздействии может быть применена упрощенная многомассовая модель, учитывающая основные упруго-инерционных параметры, как показано на рисунке 2.1.

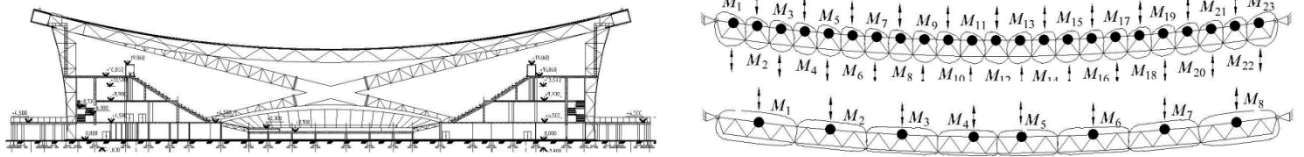


Рис. 2.1. Большепролетная конструкция и ее упрощенные многомассовые модели с разной степенью детализации

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.2.2.). Динамические параметры воздушного потока в данной модели предлагается учитывать с помощью введения дополнительных коэффициентов, данный вопрос подробно изучается в главе 4.

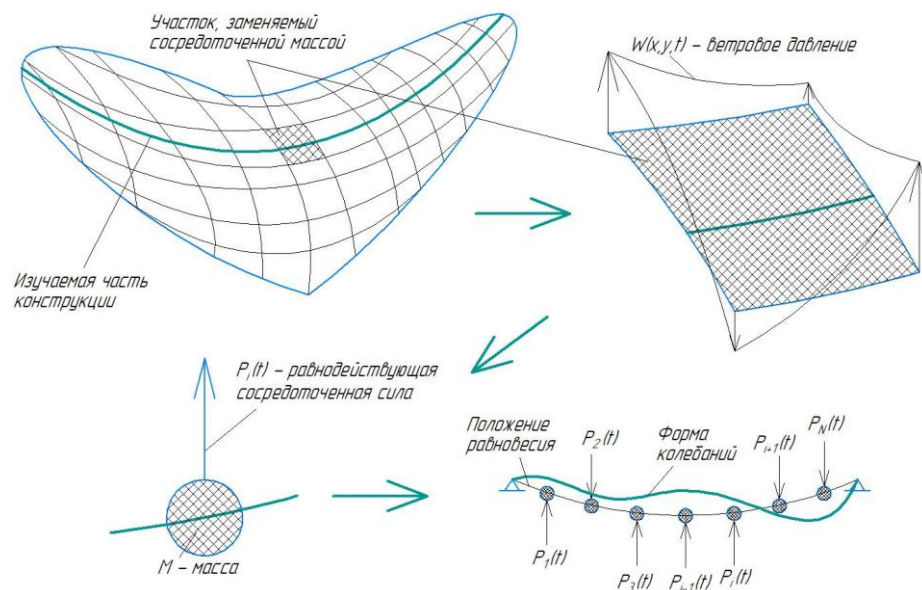


Рис. 2.2. К определению вектора сил вынужденных колебаний системы при взаимодействии с аэродинамическими потоками

Таким образом основной задачей данного этапа является исследование обтекания аэродинамическими потоками ($w(x, y, t)$) объектов горизонтальной конфигурации для использования в дальнейшем при описании колебательных процессов. В качестве исследуемых твердых тел горизонтальной конфигурации

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

В настоящее время активно развивается строительство большепролетных зданий и сооружений. В связи с ростом населения и развития инфраструктуры, возникает потребность в больших площадях и устройстве гибких планировок, необходимость перекрытия объемов без дополнительных опор. Большепролетные конструкции используются для покрытий спортивных сооружений, вокзалов и аэропортов, промышленных зданий, ангаров и в большинстве случаев имеют сложную геометрическую форму.

Проектирование большепролетных сооружений, имеющих уникальные с точки зрения аэродинамики архитектурные формы, является сложной инженерной задачей в части учета ветровых нагрузок и аэродинамического воздействия. Для обеспечения надежности и безопасной эксплуатации необходимо корректно учитывать распределение ветровых нагрузок по поверхностям здания. При расчете ветровой нагрузки на покрытие необходимо знать избыточное статическое давление, возникающее за счет действия ветра. Корректный учет различных воздействий на данные объекты обеспечивает их безопасную эксплуатацию [116, 133, 144].

2.1 Криволинейная оболочка двоякой кривизны

В качестве первого объекта аэродинамического исследования принята модель проектируемого в научно-исследовательских целях здания с покрытием в виде криволинейной оболочки двоякой кривизны (рис. 2.3). Конструкция покрытия здания состоит из двух наклонных металлических пространственных решетчатых арок параболического очертания, между которыми монтируются фермы, формирующие седловидное покрытие. Габаритные размеры здания: 158x152 м.

Для выполнения моделирования в аэродинамической трубе был изготовлен макет здания в масштабе 1:300, внутренняя полая область макета для обеспечения жесткости и прочности заполнялась быстротвердеющим пенным материалом

(рис. 2.4.а). Для измерения давления в характерных точках одной из четвертей седловидного покрытия ввиду его симметрии относительно главных осей была выполнена система дренажей из десяти воздухоотводящих трубок. Измерения проводились для нескольких направлений ветрового потока (рис. 2.4.б).

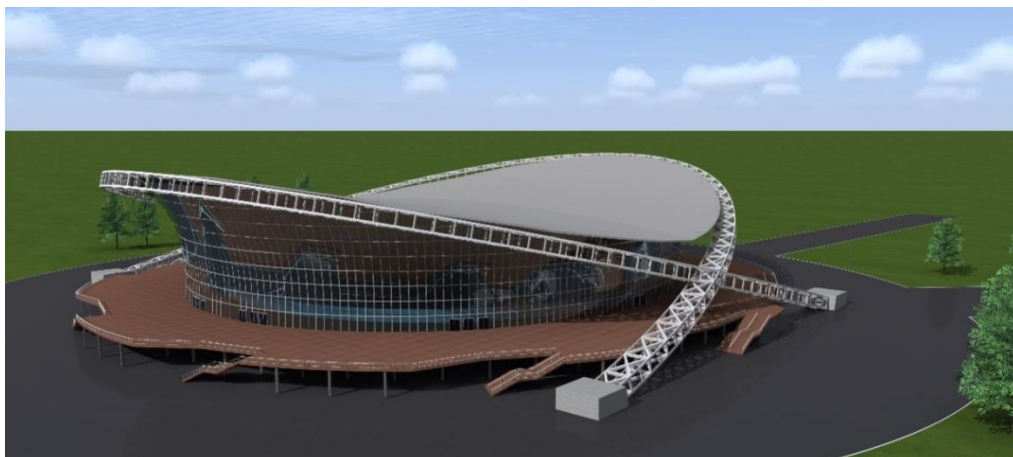
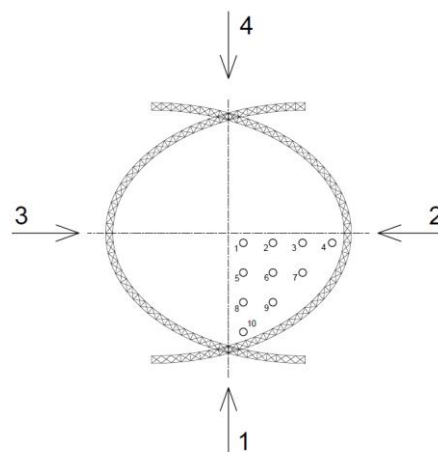


Рис. 2.3. Визуализация здания с покрытием в виде криволинейной оболочки двойкой кривизны



а)



б)

Рис. 2.4 а) Макет здания, помещенный в аэродинамическую трубу. б) Схема размещения дреназирующих трубок на покрытии макета с указанием направлений ветровых потоков, принятых при моделировании

Как было сказано ранее, соблюдение аэродинамического подобия при решении задач данного рода является автоматическим при соблюдении подобия геометрического, что, в частности, косвенно отражено в нормативных документах, исходными данными для которых является лишь форма сооружений, а не его размеры или упругие характеристики. По данным, полученным в результате эксперимента, были построены изополя распределения ветровой нагрузки по поверхности покрытия (рис. 2.5).

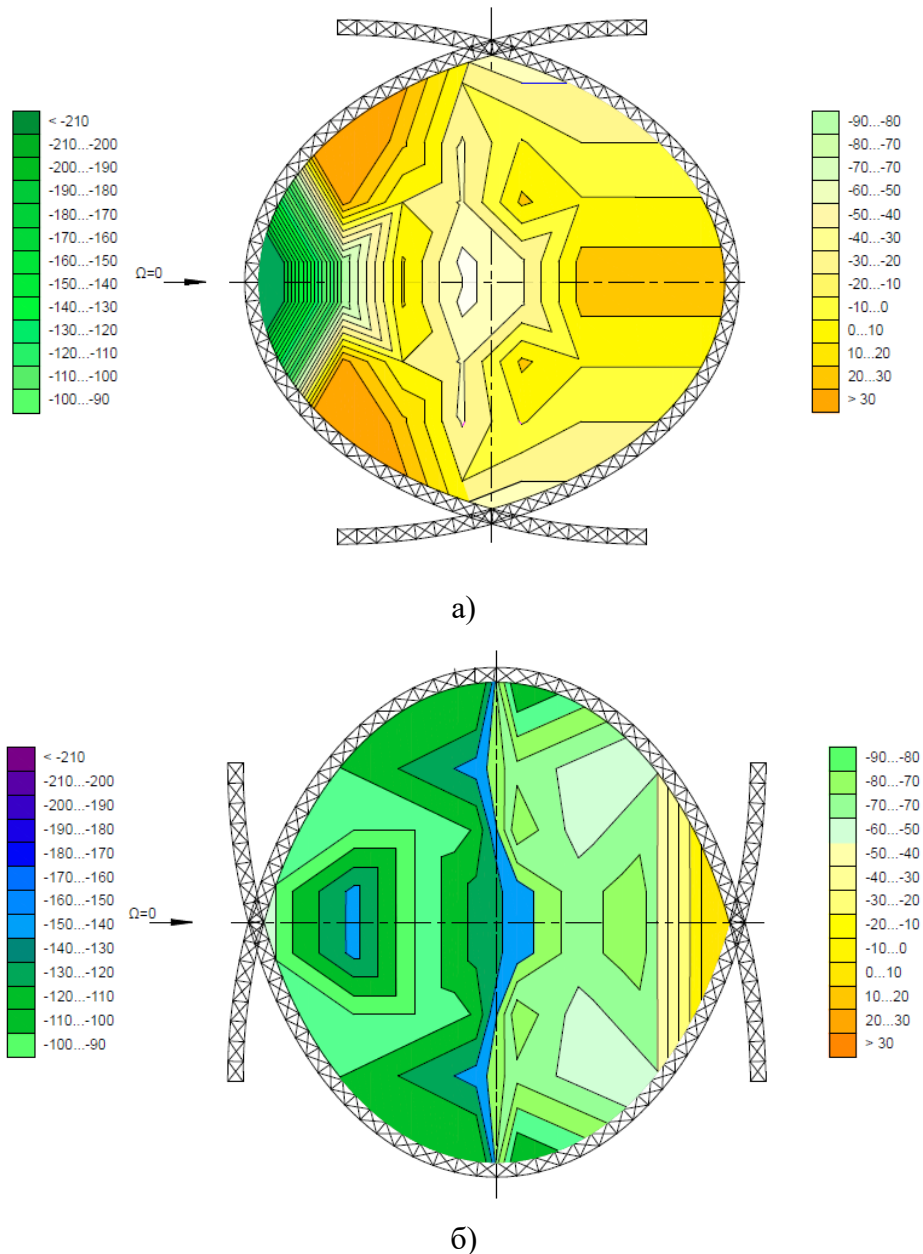
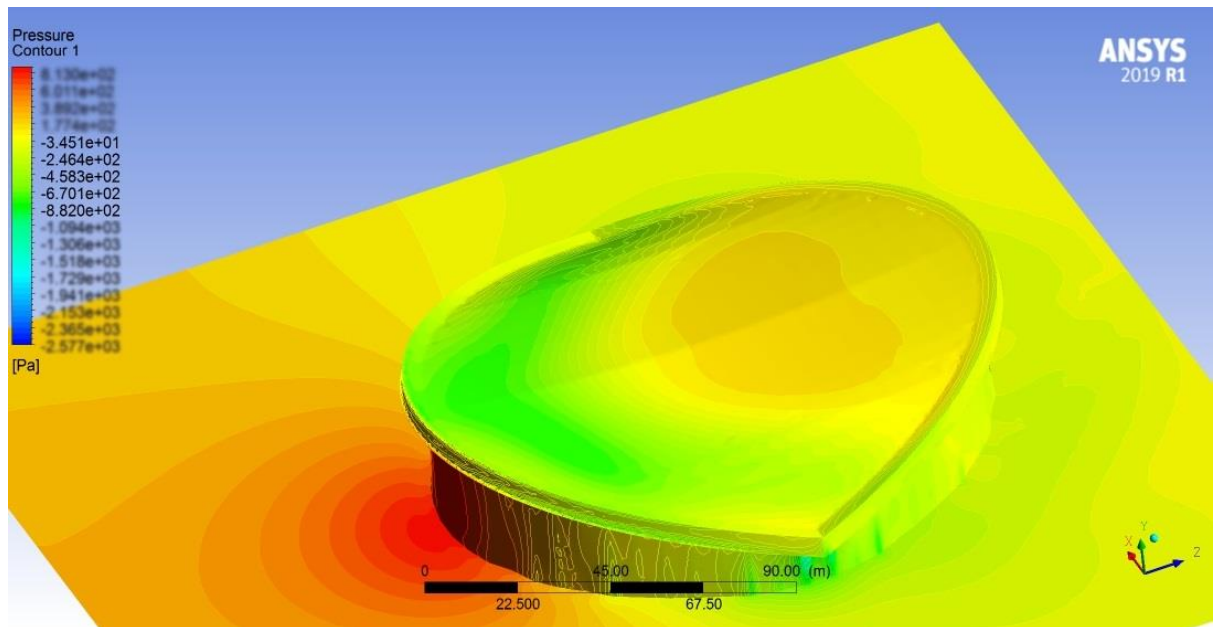


Рис. 2.5. Изополя распределения ветровой нагрузки по большепролетному покрытию, Па, построенные по результатам физического моделирования в аэродинамической трубе для двух взаимно перпендикулярных направлений ветрового потока: а) направление 1; б) направление 2

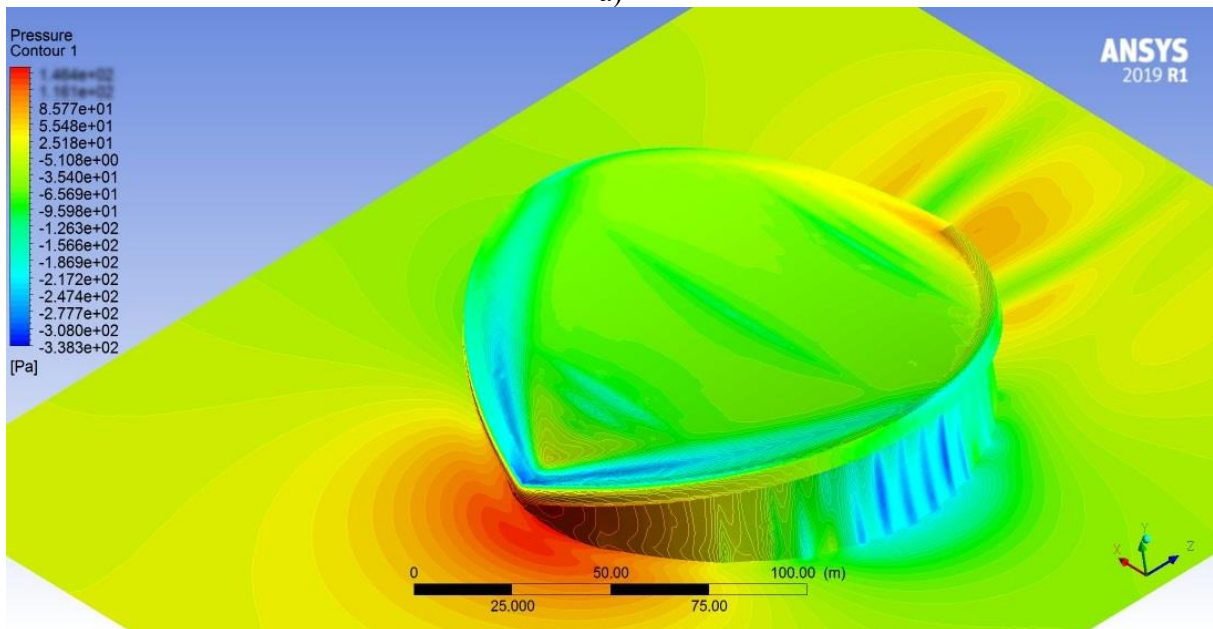
По результатам аэродинамических испытаний [155] видно, что давление, действующее на покрытие, отрицательное. При общем разгрузении несущих конструкций здания подобное воздействие может оказывать значительное влияние и усложнять процесс расчета и проектирования креплений элементов кровли, поскольку при 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.

На рисунке 2.6 представлены результаты численного моделирования распределения давлений по большепролетному покрытию. На рисунке 2.7 приводятся картины обтекания здания воздушными потоками.



а)

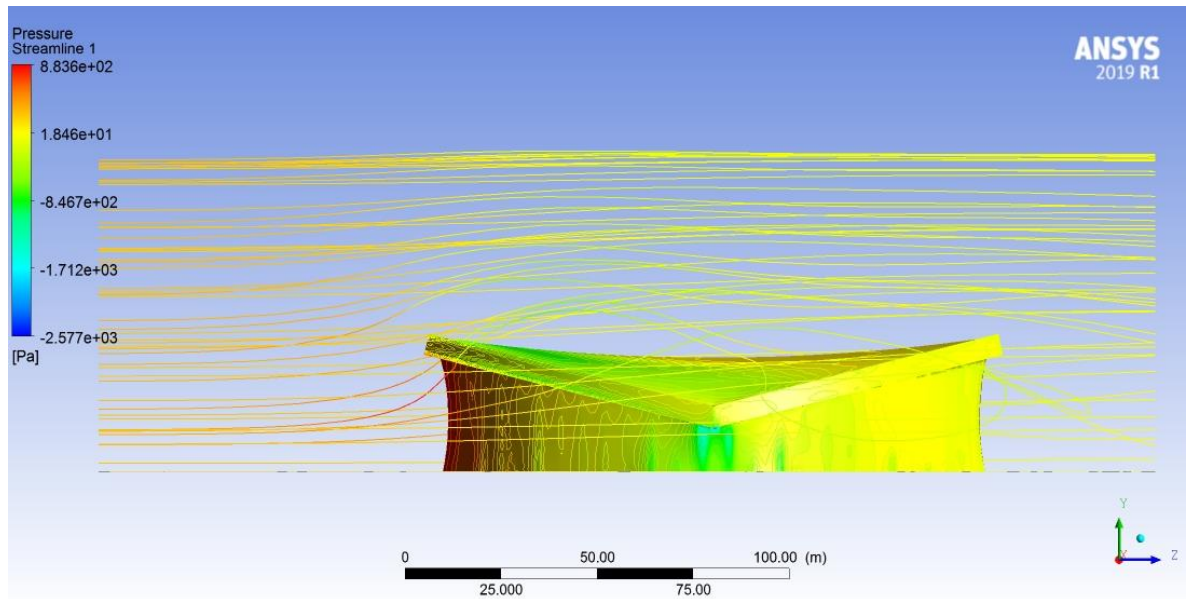


б)

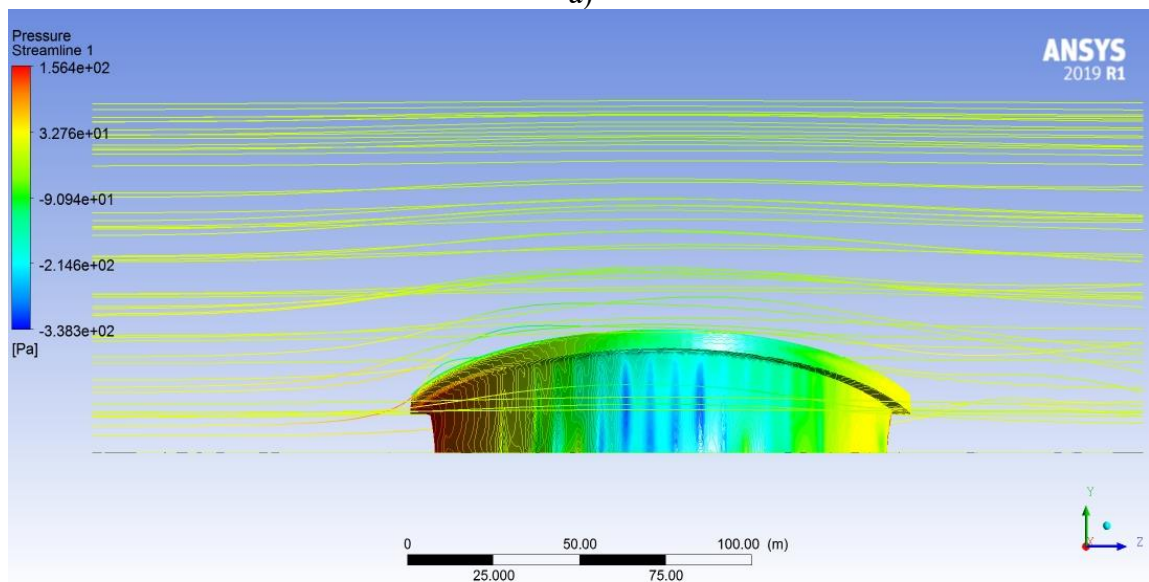
Рис. 2.6. Изополя распределения ветровой нагрузки по большепролетному покрытию, Па, построенные по результатам численного моделирования для двух взаимно перпендикулярных направлений ветрового потока: а) направление 1; б) направление 2

В целом, численная картина распределения давлений подтверждается экспериментом. Экстремальные значения отрывов, а также зоны их возникновения

совпадают с погрешностью, не превышающей 10%. В менее загруженных зонах расхождение результатов оказывается более значительным, но влияние этих зон на общее напряженно-деформированное состояние конструкций покрытия менее значимо. На основании полученных результатов может быть сделан вывод, что при проектировании зданий и сооружений сложной геометрической формы необходимо выполнять как численное, так и экспериментальное моделирование, принимая в качестве расчетного наименее выгодное распределение нагрузок.



а)



б)

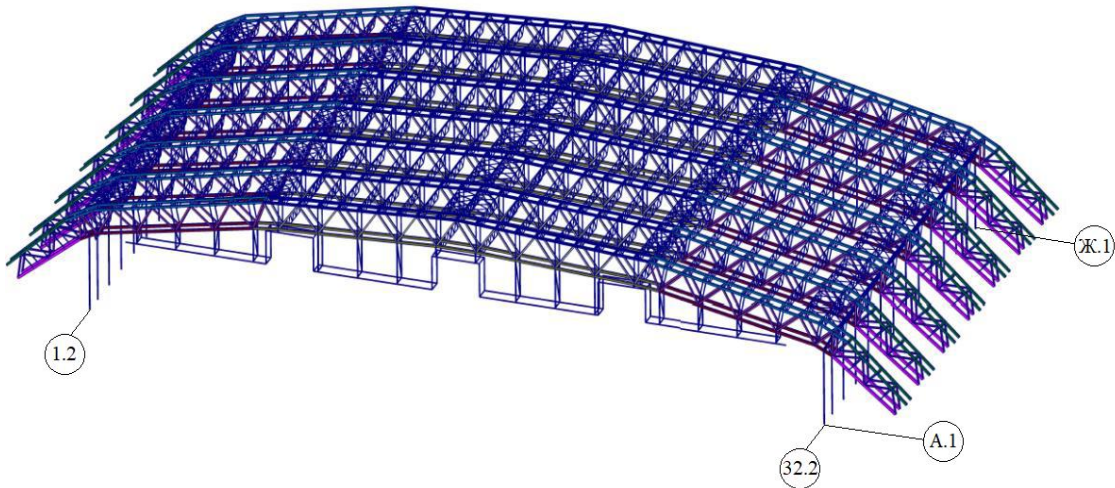
Рис. 2.7. Визуализация обтекания здания ветровым потоком по результатам численного моделирования: а) направление 1; б) направление 2

2.2 Арочная конструкция с покрытием из ферм

В качестве второго объекта исследования в данной главе рассматривается проектируемое в научно-исследовательских целях большепролетное здание [44], перекрываемое пространственными арками пролетом 228 м с ломаным очертанием параллельных поясов (рис. 2.8). Максимальная высота здания в центральной точке 38 м.



а)



б)

Рис. 2.8. Исследуемое здание: а) визуализация; б) фрагмент расчетной схемы

Эксперимент проводился для пяти направлений ветрового потока, под углами 0° , 30° , 45° , 60° , 90° . Схема направлений ветровых потоков приведена на рисунке 2.9.

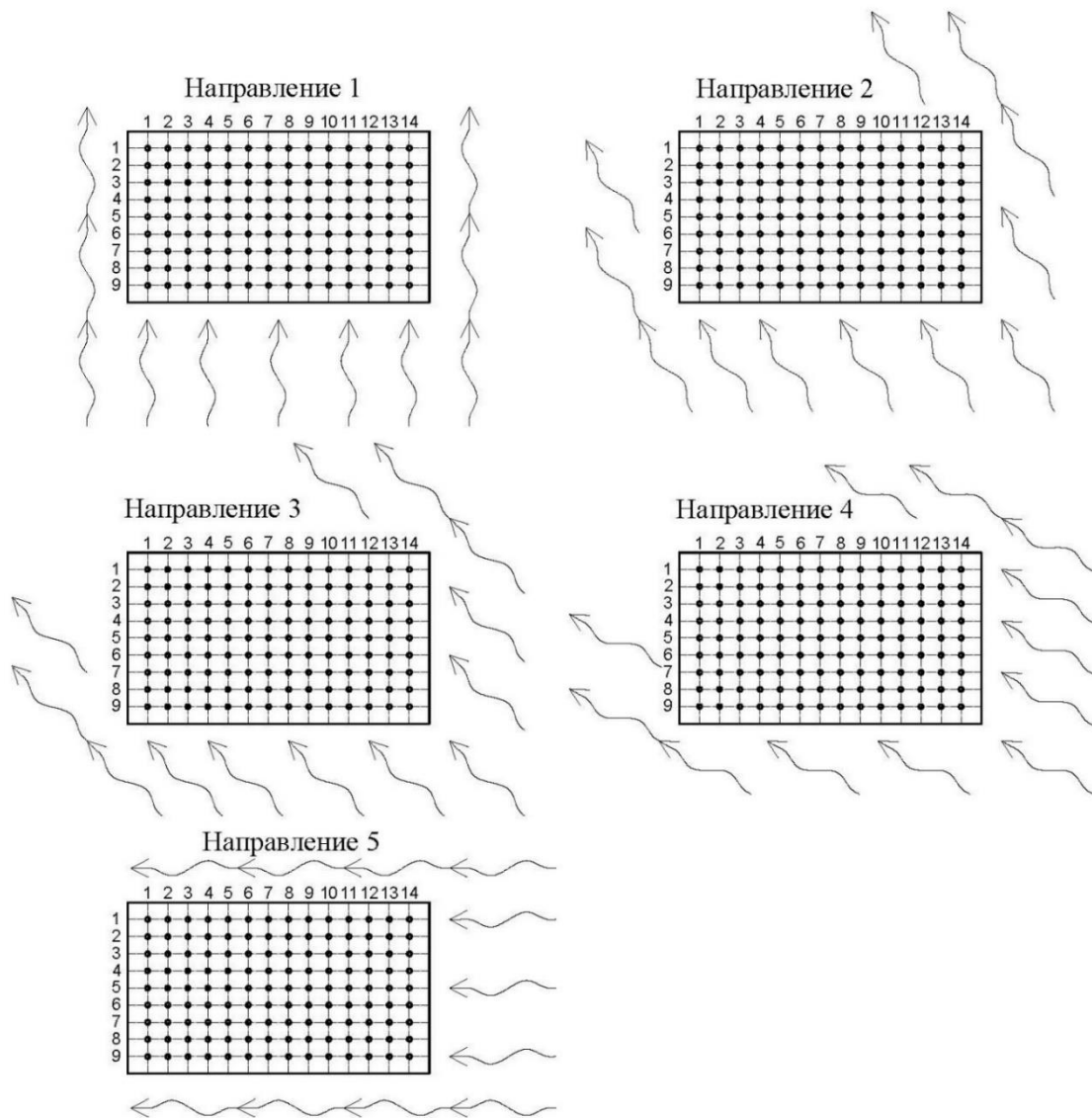


Рис. 2.9. Направления ветровых потоков, выбранные для проведения экспериментов

На основании полученных экспериментально значений были построены изополя распределения аэродинамических коэффициентов по поверхности большепролетного покрытия для каждого из выбранных направлений ветра, представленные на рисунке 2.10.

На рисунке 2.11 представлены полученные в модуле вычислительной гидрогазодинамики *ANSYS CFX* значения ветровых давлений для направлений 1 и 5, указанных на рисунке 2.9.

В результате анализа полученных экспериментально и численно аэродинамических коэффициентов и ветровых нагрузок можно сделать следующие выводы.

1) Картины распределения значений ветровых нагрузок, действующих на поверхность большепролетного здания, 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*.

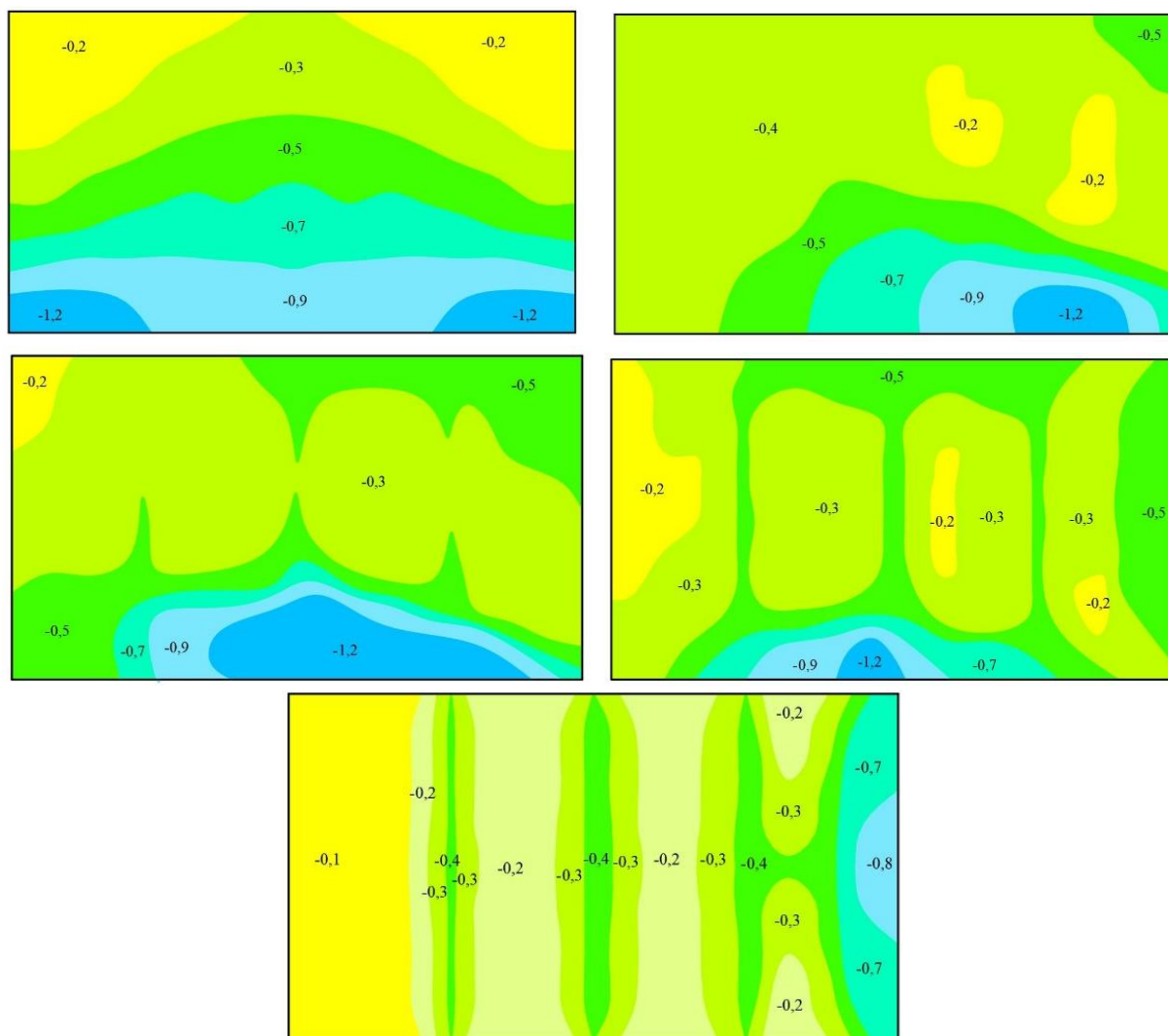


Рис. 2.10 Изополя распределения аэродинамических коэффициентов по большепролетному покрытию, полученные экспериментально

2) На поверхность данного большепролетного здания действует в основном отрицательное ветровое давление. При проведении расчетов зданий подобной формы необходимо учитывать наиболее неблагоприятные сочетания нагрузок, то есть максимальная ветровая и отсутствие снеговой, при которых возможен отрыв покрытия.

3) Максимальные по абсолютной величине значения достигаются со стороны граней здания, на которые направлены ветровые потоки, и в местах переломов сечений покрытия, что также должно учитываться при расчетах.

4) 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.

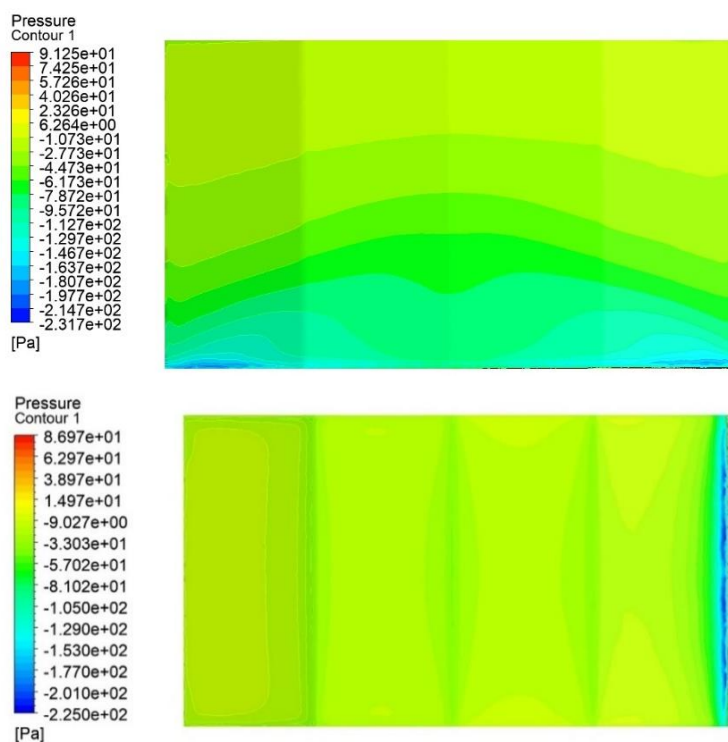


Рис. 2.11. Изополя распределения ветровой нагрузки по большепролетному покрытию для направления 1, 5 по результатам численного моделирования

Современные большепролетные конструкции представляют собой сложную систему, состоящую из комплекса различных подсистем, которые в процессе действия ветровой нагрузки путем обмена энергией связаны между собой процессами интенсивного динамического взаимодействия. В этой системе протекают сложные переходные процессы и возникают критические хаотические режимы, в результате которых могут протекать процессы самоорганизации, означающее, что реакции системы определяются не только внешними силами, а главным образом ее структурой и внутренними связями. Большое число взаимодействующих элементов, влияние множества плохо контролируемых

внешних факторов приводит к тому, что процессы, определяющие состояние таких конструкций, обнаруживают вероятностную природу и могут быть представлены статистической моделью (образом) в виде определенной на ограниченном интервале функцией плотности вероятности распределением Дирихле. Модель отражает результат совместной реализации $n-1$ независимых процессов x_j , протекающих со скоростями (интенсивностями) v_j , и противоположного им по смыслу процесса, протекающего со скоростью v_n . В этом смысле распределение информационно эквивалентно объекту любой природы и степени сложности [81]. Функция плотности вероятности распределения Дирихле, определенная на k -мерном симплексе, равна:

$$D(x_1, \dots, x_k) = \frac{\Gamma(a_n)}{\prod_{i=1}^n \Gamma(v_i)} \prod_{i=1}^k x_i^{v_i-1} \times (1 - \sum_{i=1}^k x_i)^{v_n-1} \quad (2.1)$$

$$0 \leq \sum x_i \leq 1; v_i \geq 0, \dots, v_n \geq 0; \sum_{i=1}^n v_i = a_n; n = k+1$$

В (2.1) $\Gamma(x)$ - гамма-функция. Энтропия распределения Дирихле согласно определению:

$$H = - \int_x \varphi(x) \log_{\alpha} \varphi(x) dx \quad (2.2)$$

с точностью до основания логарифма составляет:

$$H(v_1, \dots, v_n) = \prod_{i=1}^n \Gamma(v_i) - \ln \Gamma(a_n) + (a_n - n)\psi(a_n) - \sum_{i=1}^n (v_i - 1)\psi(v_i) \quad (2.3)$$

Здесь в (2.4) и (2.5) $\psi(x) = \frac{d}{dx} \ln \Gamma(x)$ - логарифмическая производная гамма-функции (пси-функция Эйлера). Энтропия распределения Дирихле может быть представлена в виде суммы:

$$H(D) = H_i(v_1, \dots, v_n) + H_e(a_n) \quad (2.4)$$

в которой всегда положительное слагаемое:

$$H_i(v_1, \dots, v_n) = \ln \prod_{i=1}^n \Gamma(v_i) - \sum_{i=1}^n (v_i - 1)\psi(v_i) \quad (2.5)$$

представляет собой, отвечающее второму закону термодинамики, производство энтропии, а слагаемое:

$$H_e(a_n) = - \ln \Gamma(a_n) + (a_n - n)\psi(a_n) \quad (2.6)$$

представляет собой характеризующий процессы взаимодействия с внешней средой поток энтропии. При $n \geq 3$ поток энтропии может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

При неограниченном росте числа процессов, протекающих с одинаковыми скоростями, распределение Дирихле может быть приближенно заменено гамма-распределением с плотностью:

$$\gamma(x) = \frac{x^{v_\gamma-1}}{\Gamma(v_\gamma)} \exp(-x), x \geq 0, v_\gamma \geq 0 \quad (2.7)$$

и энтропией:

$$H_\gamma = v_\gamma + \ln \Gamma(v_\gamma) - (v_\gamma - 1)\psi(v_\gamma) \quad (2.8)$$

Выражение для энтропии гамма-распределения не позволяет выделить какую-либо его часть, характеризующую поток энтропии. Поэтому модель, представленная гамма-распределением, соответствует изолированной системе. Следовательно, выбор этой модели при описании процессов в задачах зондирования атмосферы [81, 132] или в задачах обнаружения [50] некорректно, поскольку изолированная система не учитывает взаимодействия объекта с внешней средой. Как статистическая модель гамма-распределение представляет собой лишь в той степени удовлетворительную модель наблюдения состояния объекта, в какой возможна реализация неограниченно возрастающего числа процессов, протекающих с одинаковыми скоростями.

При $v_\gamma = 1$ (2.7) переходит в экспоненциальное распределение - модель наблюдения (но не механизма) радиоактивного распада.

Если скорости процессов принимают дискретные значения, а число процессов велико, но конечно, то модель будет соответствовать распределению Пуассона, которое имеет вид:

$$f_p = \frac{v^x}{x!} \exp(-v); v > 0; x = 1, 2, \dots \quad (2.9)$$

Как и гамма-распределение, распределение Пуассона представляет собой флуктуационную модель, так как математическое ожидание (пространственно-временная характеристика) для (2.9) по определению равно второму центральному

моменту (импульсно-энергетическая характеристика). Можно показать, что выражение для энтропии распределения (2.9):

$$H_p = v(1 - \ln v) + \ln \Gamma(1+v) + \frac{v}{2} \psi'(1+v) \quad (2.10)$$

не позволяет, как и в случае с гамма-распределением, выделить поток энтропии. Следовательно, модель (2.10) соответствует изолированной системе со всеми вытекающими из этого последствиями. Следует отметить, что определенное на неограниченном интервале нормальное распределение, как статистическая модель исследуемого процесса, предполагает наличие у исследуемого объекта физических свойств, параметры которых стремятся к неограниченно большой или малой величине. Очевидно, что таких свойств нет.

По результатам проведенного анализа, распределение Дирихле является демонстрирует оптимальное сочетание адаптивности и соответствия наблюдаемым явлениям по сравнению с моделями, базирующимися на основе нормального распределения, бета-, гамма- и пуассоновского распределения.

Решение поставленной задачи по определению интегральной оценки состояния процессов взаимодействия ветровой нагрузки со зданием заключалось в вычислении параметра самоорганизации распределения аэродинамических коэффициентов по поверхности модели здания. В качестве указанного параметра была принята величина [67]:

$$K_c = \frac{\sum iQ_{D-}^i}{\sum iQ_{D+}^i} \quad (2.11)$$

отношения суммарного взвешенного $\sum iQ_{D-}^i$ количества Q выявленных в анализируемом числовом ряде зарегистрированного сигнала моделей Дирихле i -ой размерности, имеющих отрицательное значение внешней (потока) энтропии, к суммарному взвешенному $\sum iQ_{D+}^i$ количеству моделей Дирихле, имеющих положительное значение внешней энтропии.

Значения параметра самоорганизации распределения аэродинамических коэффициентов для разных направлений ветровой нагрузки представлены на рисунке 2.12.

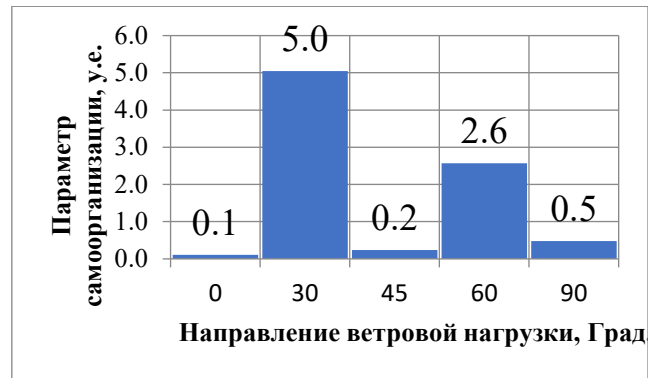


Рис. 2.12. Значения параметра самоорганизации распределения аэродинамических коэффициентов для здания при разных направлениях ветровой нагрузки

Если рассматривать самоорганизацию как процесс, сущность которого состоит в формировании совокупности действий, ведущих к созданию устойчивой реакции системы, то как следует из рисунков 2.12, 2.13 взаимодействие ветрового потока с объектом исследования носит сложный характер. Наибольшие значения это взаимодействие имеет при углах в 30 и 60 градусов, а наименьшее при продольном направлении ветрового потока. При фронтальном направлении ветрового потока процесс взаимодействия ветрового потока и конструкции максимален по торцам центральной части (рис. 2.13.а).

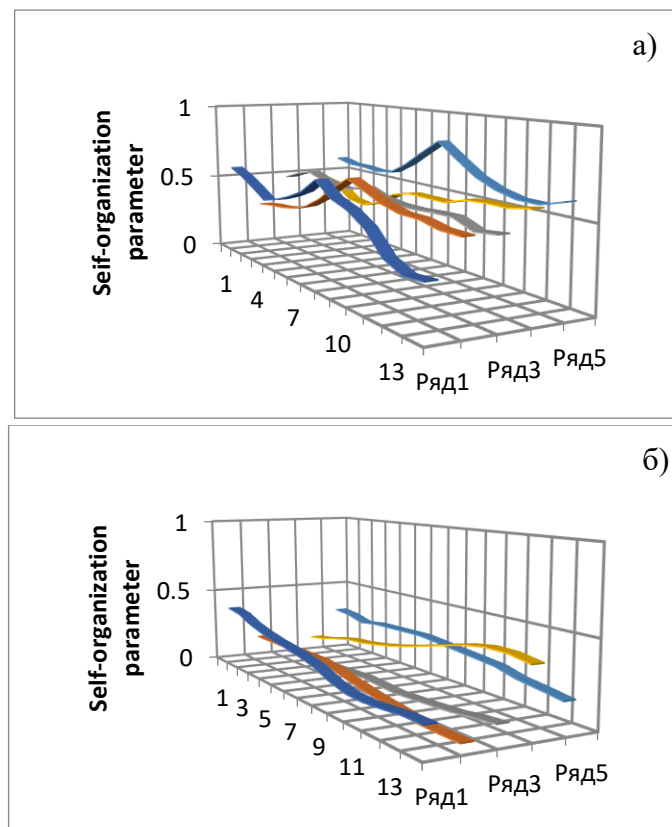


Рис. 2.13. Распределение по поверхности параметра самоорганизации для двух направлений ветрового потока: а) фронтальное направление; б) (продольное направление).

Результаты проведенного исследования демонстрируют, что безразмерный информационно-статистический показатель обеспечивает возможность унифицированной оценки состояний и динамики процессов, характеризующихся гетерогенностью внешних проявлений. Полученный интегральный показатель может быть применен для осуществления сравнительного ранжирования эффективности функционирующих систем, а также представляет практическую ценность при анализе процессов динамического взаимодействия приложенного давления и конструкций, различающихся по геометрическим характеристикам и функциональному назначению [8].

2.3 Криволинейное покрытие из нескольких частей

Следующим объектом исследования настоящей работы является проектируемое здание с покрытием из криволинейных ферм [125] (рис. 2.14). Здание в плане можно разделить на три объема: центральная трапециевидная часть с размерами оснований 90 и 18 метров и две симметрично расположенных к ней под углом 53 градуса боковых частей прямоугольной формы размерами 72 x 60 метров. Большепролетное покрытие аэровокзального комплекса выполняется с применением криволинейных стропильных ферм пролетом 60 метров в каркасе боковых частей здания, и с применением подстропильных и криволинейных стропильных ферм пролетом 40 – 60 метров в центральной части здания. Отметка верха конструкции покрытия: боковых частей – 22,050 м, центральной части – 28,600 м. Общие габариты здания по крайним его точкам: 206,8 x 91,8 метров.



Рис. 2.14. Главный фасад исследуемого здания с покрытием из криволинейных ферм

Для проведения исследований в аэродинамической трубе был разработан макет в масштабе 1:500, выполненный методом послойного наплавления (FDM) из

ABS-пластика на принтере для трехмерной печати (рис.2.15). В характерных точках модели выполнена система дренажных отверстий для подключения гибких силиконовых трубок и последующего измерения давления ветрового потока на поверхность модели.

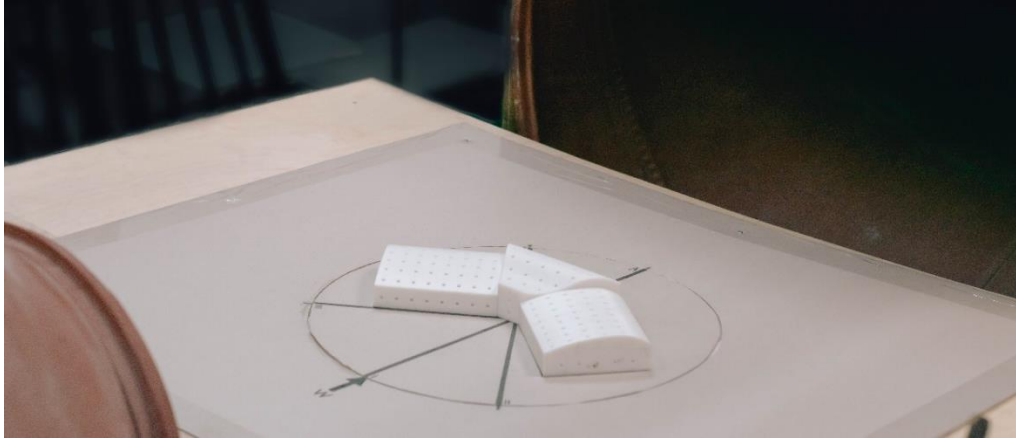


Рис. 2.15. Макет здания в аэродинамической трубе

Для проведения эксперимента после анализа геометрической формы здания были выбраны несколько наиболее характерных направлений ветра, вектор каждого из которых перпендикулярен основным фасадам здания – «основаниям» трапецевидной части здания, боковым и торцевой стенам прямоугольных частей. Схема принятых направлений ветровых потоков представлена на рисунке 2.16.

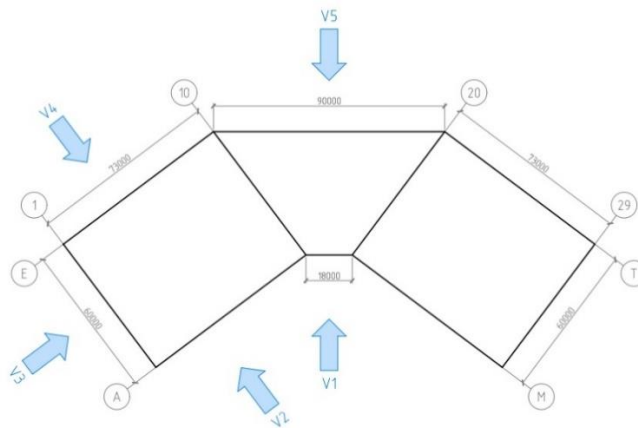


Рис. 2.16. Направления ветровых потоков, выбранные для проведения экспериментов

На основании полученных значений были построены изополя распределения аэродинамических коэффициентов по поверхности большепролетного покрытия здания терминала аэропорта для каждого из выбранных направлений ветра, представленные на рисунке 2.17.

Распределение аэродинамических коэффициентов по покрытию 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.

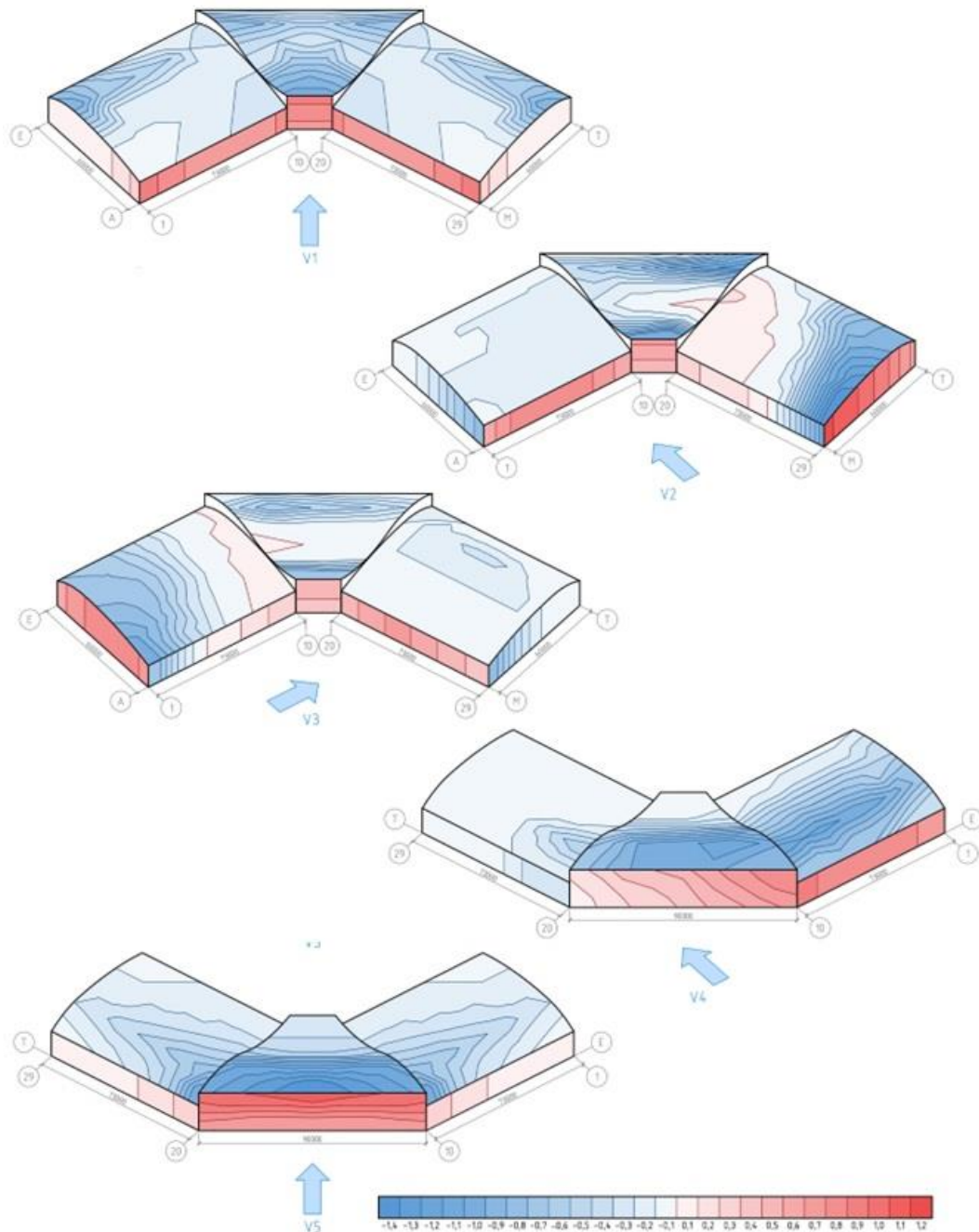


Рис. 2.17. Изополя аэродинамических коэффициентов по результатам эксперимента
Аэродинамическое давление на поверхности покрытия преимущественно отрицательно, несмотря на его переменный уклон, т.е. наблюдается «отсос» воздушных масс с поверхности. При неблагоприятном сочетании нагрузок

(наличие максимальной для данного ветрового района ветровой нагрузки и полное отсутствие снеговой в летний период) напряжения, возникающие в несущих конструкциях покрытия, в частности, поясах и раскосах ферм, могут заметно перераспределяться, что необходимо учитывать в дальнейших их расчетах по предельным состояниям.

На основании предыдущего заключения можно сделать вывод о том, что при сборе ветровой нагрузки на подобные покрытия невозможно рассматривать каждый блок здания отдельно только на основании типовых схем, представленных в нормативных документах [137].

Картина распределения аэродинамических коэффициентов по фасадам также не лишена своих особенностей. Так при направлениях ветра 2 и 3 на фасадах в осях 20-29 и 1-10 соответственно, расположенных параллельно движению ветровых потоков, возникают участки положительных значений аэродинамических коэффициентов. Это связано с тем, что ветровые потоки при столкновении с фасадом, перпендикулярным их движению (1-10 и 20-29 при направлениях ветра 2 и 3 соответственно) двигаются в обратном направлении и тем самым оказывают ветровое давление на участки фасада, изначально параллельные движению ветра.

Форма здания в плане также оказывает влияние на его аэродинамические характеристики. Особенно ярко это подтверждается при направлении ветра 5. В этом случае тупой угол, образуемый боковыми блоками здания, способствует рассеиванию ветровых потоков и возникновению разрежения с подветренной стороны здания, в результате чего значения аэродинамических коэффициентов на подветренных фасадах заметно ниже по модулю в сравнении с нормативными [137].

На рисунке 2.18 представлены результаты численного моделирования распределения давлений по большепролетному покрытию. На рисунке 2.19 приводятся картины обтекания здания воздушными потоками в виде разреза.

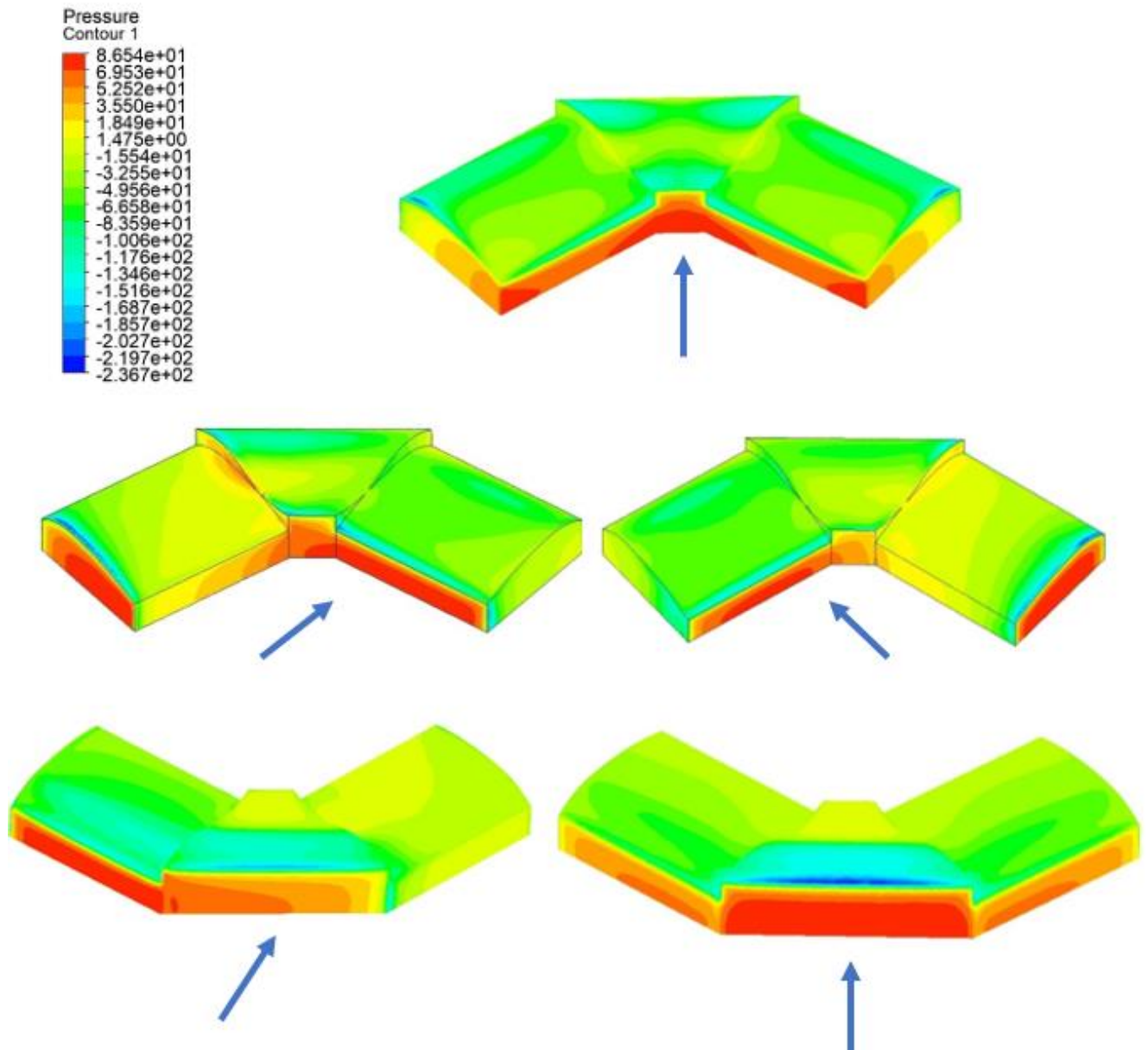
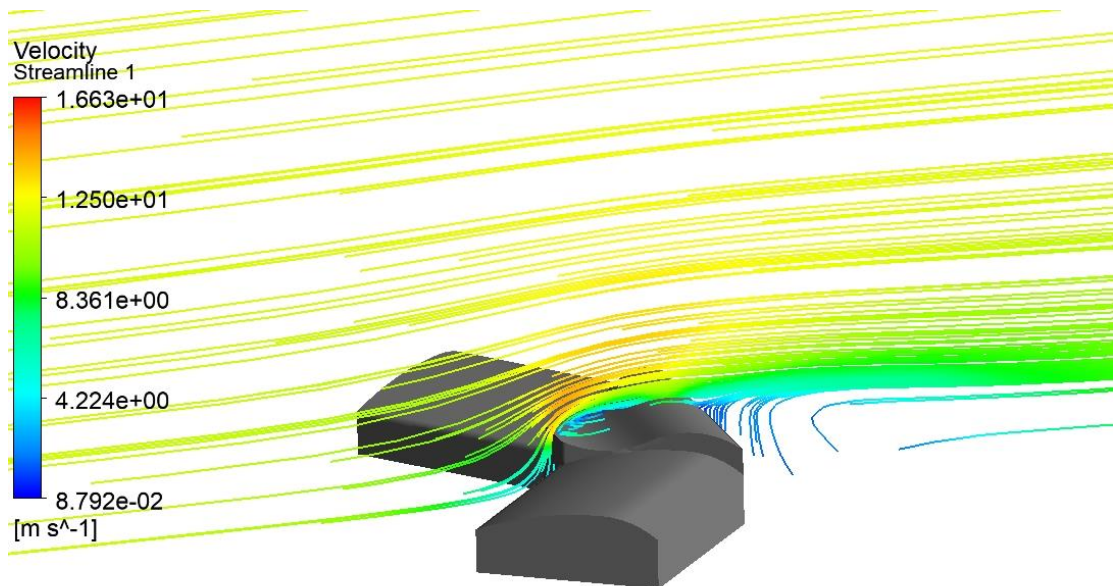
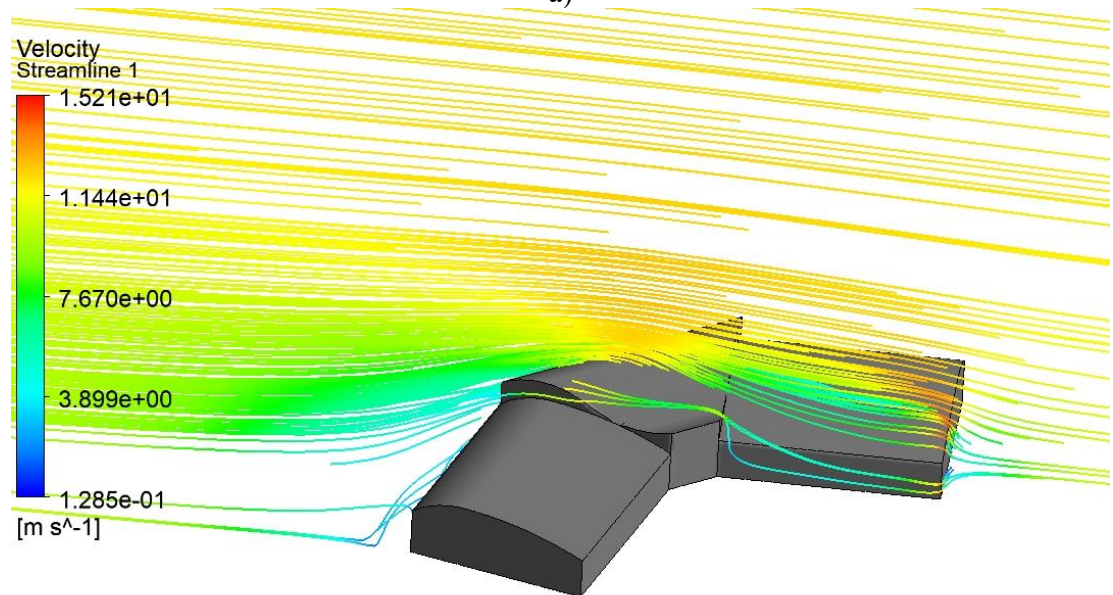


Рис. 2.18. Изополя распределения ветровой нагрузки по большепролетному покрытию для направления 1-5

При сопоставлении результатов, полученных физическими и численными методами, наблюдаются схожие значения аэродинамических характеристик, распределенных по покрытию. Однако, имеются более значительные расхождения в зонах максимальных по модулю значений давлений, которые более заметны по результатам численного моделирования.



a)



б)

Рис. 2.19. Визуализация обтекания здания ветровым потоком по результатам численного моделирования. Разрез потоков в плоскости параллельной направлению потоков. а) - направление 1; б) – направление 3

ГЛАВА 3. Моделирование взаимодействия твердых тел вертикальной конфигурации 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. 3.1).

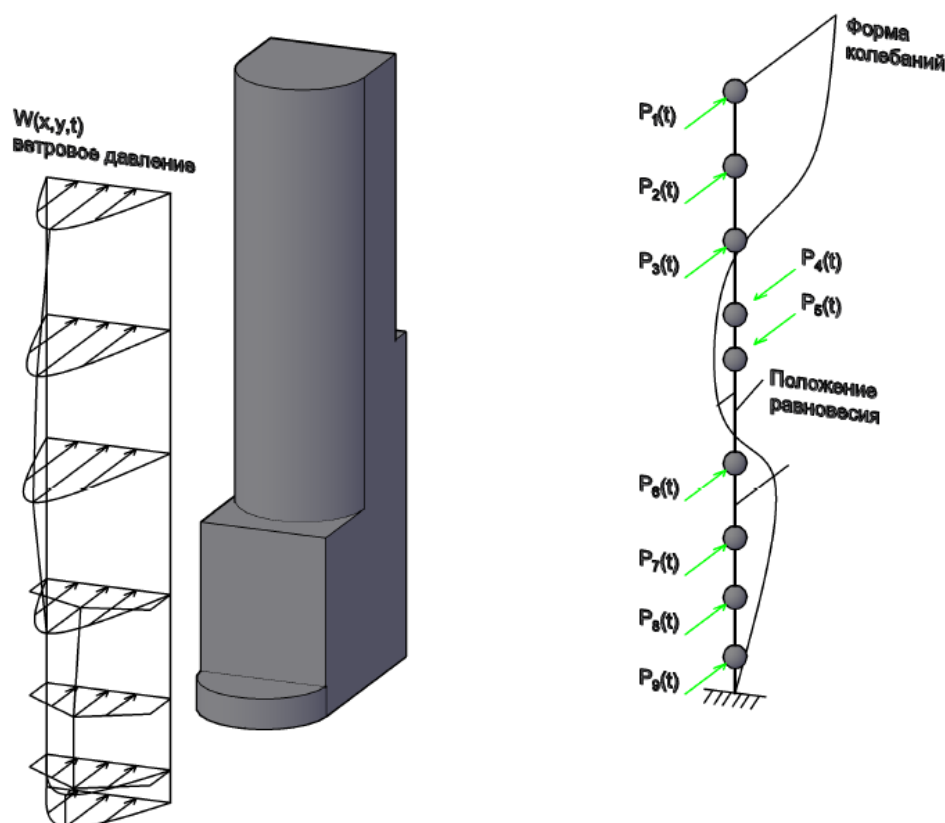


Рис. 3.1. Высотная конструкция и ее упрощенная многомассовая модель с вектором сил вынужденных колебаний системы при взаимодействии с аэродинамическими потоками

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. Для каждого из них определены аэродинамические характеристики экспериментальными и численными методами для нескольких характерных направлений ветровых потоков.

В последнее время строительство уникальных высотных зданий и сооружений набирает популярность в России и за рубежом. В первую очередь такие проекты подчеркивают престиж города и выводят его на новый уровень развития. Также объекты нетиповой постройки показывают высокий уровень образования и достижение больших результатов в сфере строительства и проектирования.

Современные высотные здания, по сравнению с построенными ранее, отличаются исключительной гибкостью, легкостью, и зачастую обладают слабыми демпфирующими свойствами. Такие сооружения, как правило, характеризуются повышенной чувствительностью к воздействию ветра. Для объектов, высота которых многократно превосходит поперечные в плане размеры, ветровая нагрузка является основной. При расчете на прочность и деформативность возникает необходимость оценки ветровых воздействий с большей степенью точности, чем это требовалось ранее.

При проектировании необходимо учесть реальное распределение давления от ветрового потока на здание в целом и получить количественную оценку значений ветровых нагрузок. Корректный анализ схемы распределения ветровых потоков поможет избежать ошибок в расчетах [23, 60, 137, 139].

Для высотных зданий характерно то, что их высота многократно превышает размеры в плане, в связи с чем в несущих конструкциях возникают значительные усилия и перемещения, вызванные горизонтальными нагрузками. Важной задачей является прогнозирование взаимодействия таких зданий с ветровыми потоками. Широкий диапазон изменения форм уникальных сооружений, их взаимного расположения и рост высоты зданий стимулируют развитие аэродинамических исследований в интересах строительства. При этом определение ветровых

нагрузок сводится к определению аэродинамических коэффициентов, учитывающих влияние формы объекта на изменение значений давления вследствие искажения воздушных потоков.

3.1 Многофункциональное высотное здание

В качестве первого объекта исследования данного раздела выступает проектируемое в научно-исследовательских целях 53-этажное высотное уникальное здание [41], высота которого вместе со шпилем от нулевой отметки составляет 263,5 м, а поперечные размеры здания в осях – 87,55 м х 42,30 м (рис. 3.2.а). Для проведения экспериментальной оценки аэродинамических коэффициентов на 3D-принтере был изготовлен макет (рис. 3.2.б). Эксперимент проводился для направлений, представленных на рисунке 3.2.в.

По полученным значениям были построены изополя распределения аэродинамических коэффициентов передней, боковых и задней поверхностей исследуемого здания для двух направлений ветровых потоков (рис. 3.3).

Для направлений ветровых потоков 1-3 было проведено численное моделирование в ПБК *Ansys CFX* (рис. 3.4 – 3.6). Анализ полученных значений показывает, что изополя распределения аэродинамических коэффициентов 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.

На основании полученных экспериментально значений аэродинамических коэффициентов можно сделать следующие выводы.

1) С наветренной стороны осредненное значение аэродинамического коэффициента для обоих направлений ветровых потоков в целом соответствует предложенному в нормативных документах [137] значению, равному 0.8.

2) Для направления 1 в прямоугольной в плане нижней части здания на боковых поверхностях значения аэродинамических коэффициентов соответствуют нормативным, однако в верхней, скругленной в плане части, значительно

отличаются, что необходимо учитывать при расчетах. Для подветренной задней части здания значения немного ниже нормативных, что объясняется сложной формой исследуемого здания.

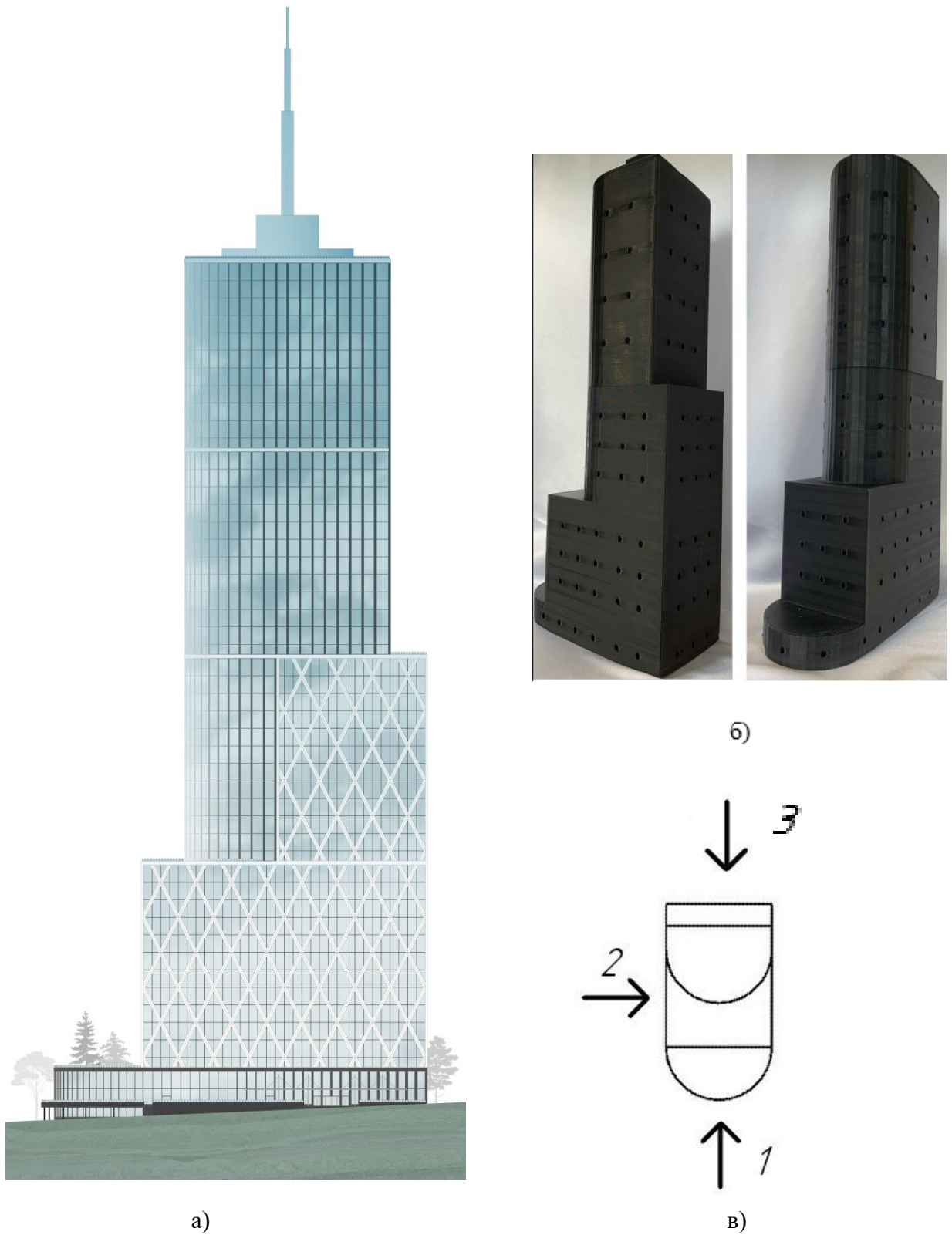
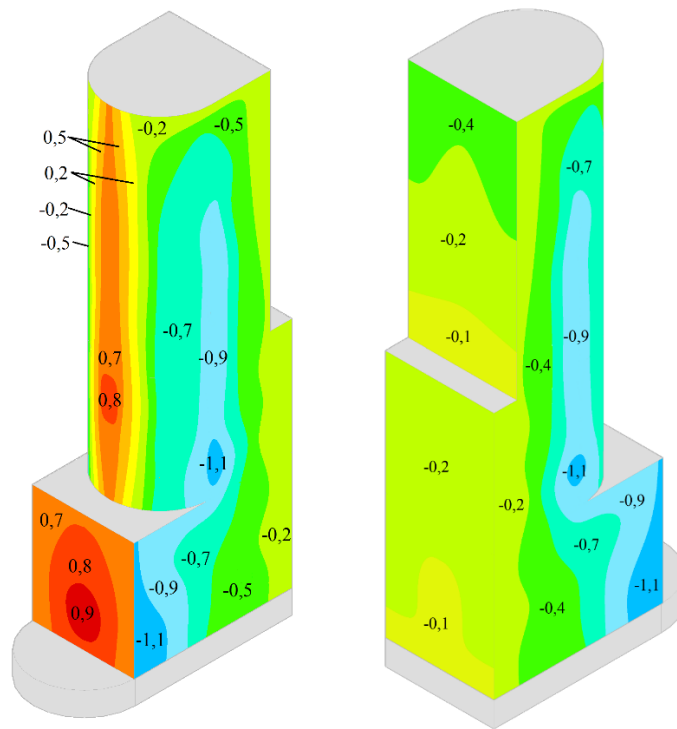
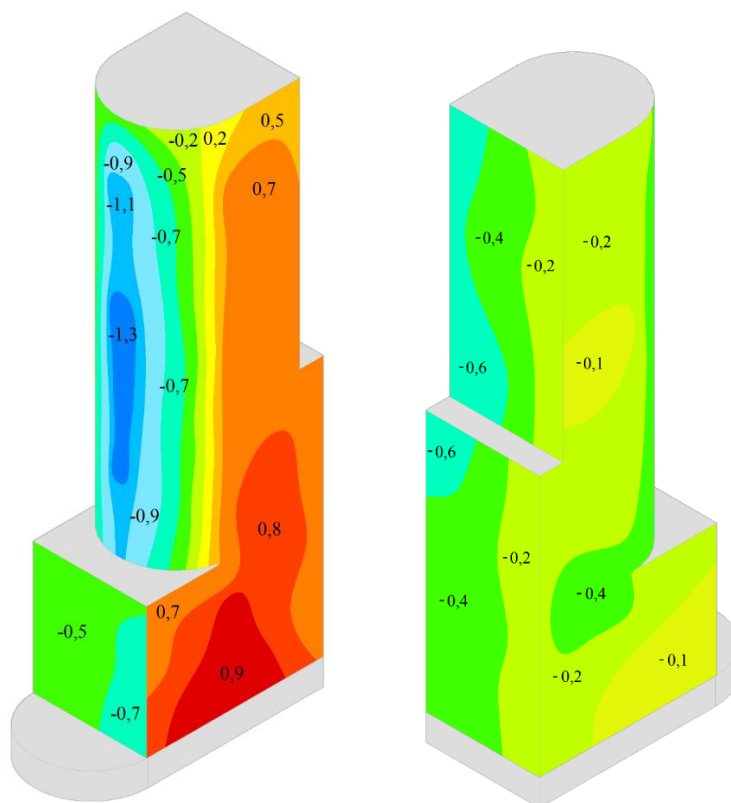


Рис. 3.2. а) Боковой фасад высотного здания. б) Макет исследуемого здания. в) Направления ветровых потоков, принятые при моделировании



а)



б)

Рис. 3.3. Изополя распределения аэродинамических коэффициентов по результатам эксперимента а) для направления 1 б) для направления 1

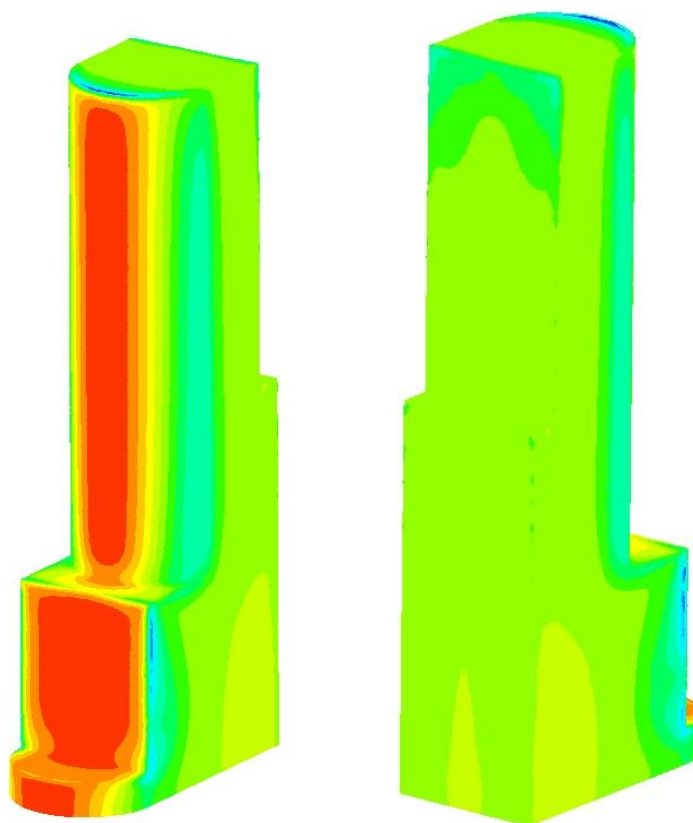
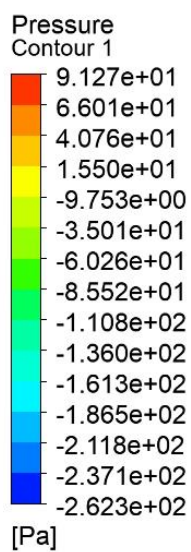


Рис. 3.4. Изополя распределения ветровых давлений по результатам численного моделирования для направления 1

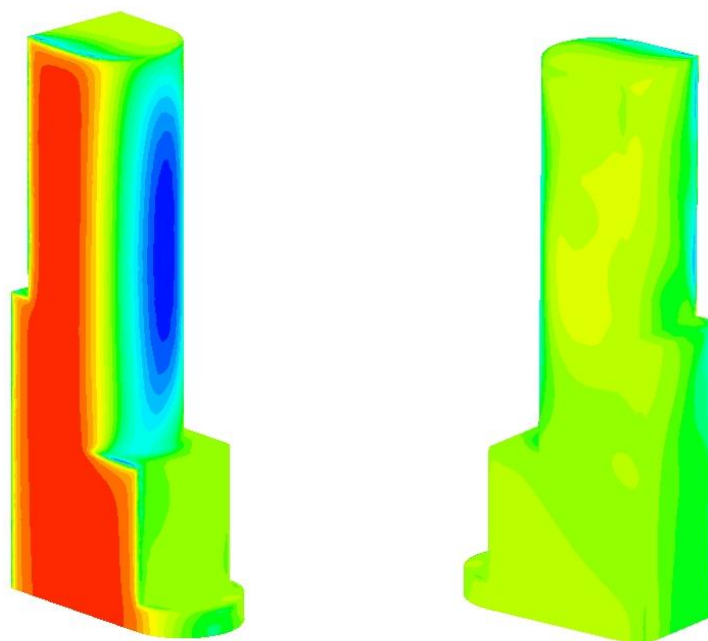
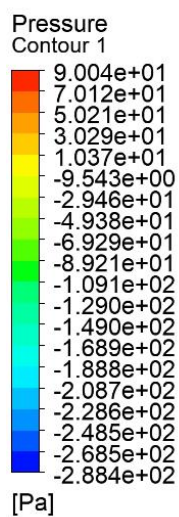


Рис. 3.5. Изополя распределения ветровых давлений по результатам численного моделирования для направления 2

3) Для направления 2 в прямоугольной в плане нижней части здания на боковых и задней поверхностях значения аэродинамических коэффициентов ниже нормативных, что также объясняется сложной формой исследуемого здания. В верхней, скругленной в плане части, значения аэродинамических коэффициентов имеют более сложный характер распределения и могут превышать нормативные, что необходимо учитывать при расчетах.

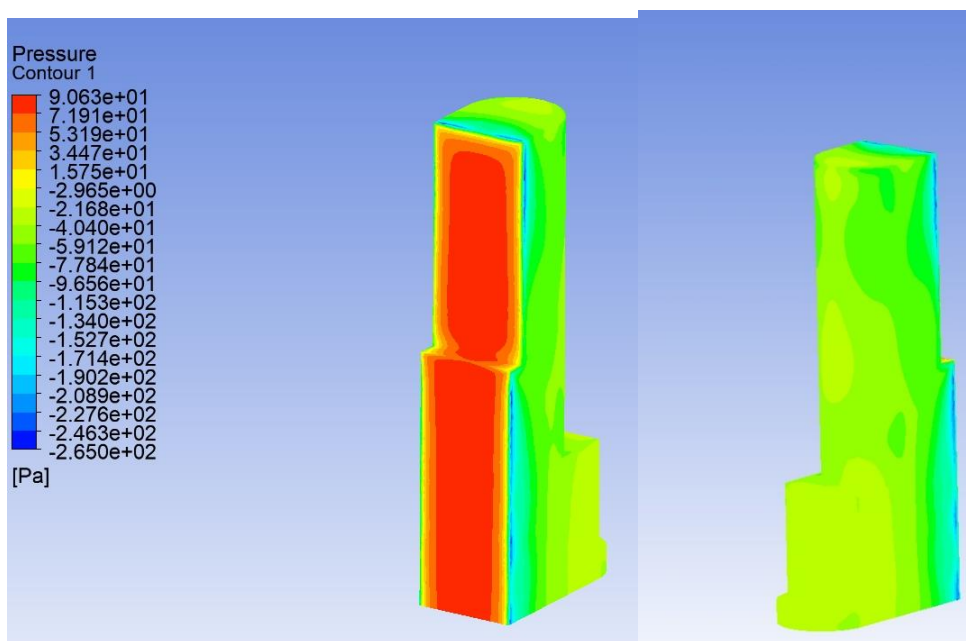


Рис. 3.6. Изополя распределения ветровых давлений по результатам численного моделирования для направления 3

3.2 Аэродинамическое взаимодействие связанной системы тел

Современные нормативные документы рассматривают, как правило, аэродинамические эффекты, связанные с влиянием окружающего пространства, введением дополнительных коэффициентов, учитывающих тип местности. Тем не менее в ряде случаев, особенно при возведении уникальных объектов, данные упрощения являются неудовлетворяющими по отношению к ряду требований. В частности, не учитываются локальные изменения давлений по поверхностям, приводящие к сдвигу общего равнодействующего вектора нагрузки, а также к локальным повреждениям конструкций в результате пикового взаимодействия. Для оценки влияния близкорасположенных объектов было проведено численное аэродинамическое моделирование некоторых конструкций, рассмотренных ранее в изолированном виде.

Было проведено моделирование распределения нагрузок системы из зданий, рассмотренных в разделах 2.2 и 3.1, при их различном взаимном положении. Результаты для высотного здания представлены на рисунке 3.7, а для большепролетного на рисунке 3.8. На рисунке 3.9 показано обтекание системы зданий ветровыми потоками [121].

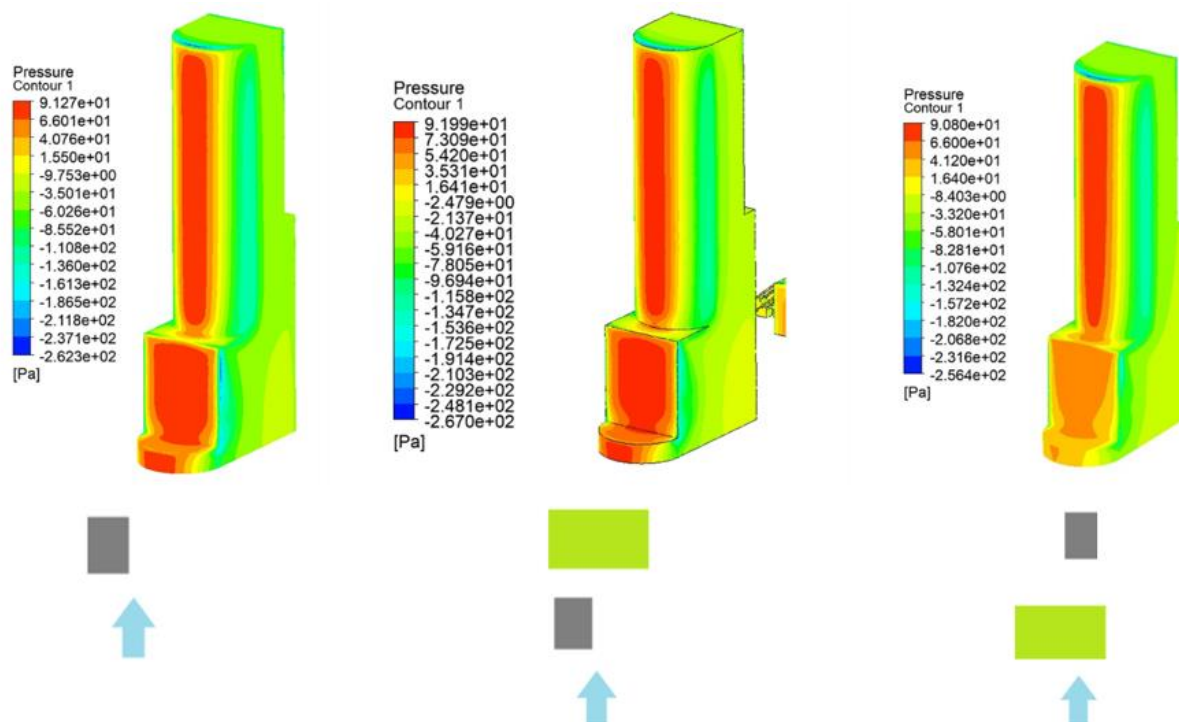


Рис. 3.7. Изополя распределения ветровых давлений по результатам численного моделирования для направления при различных положениях в системе

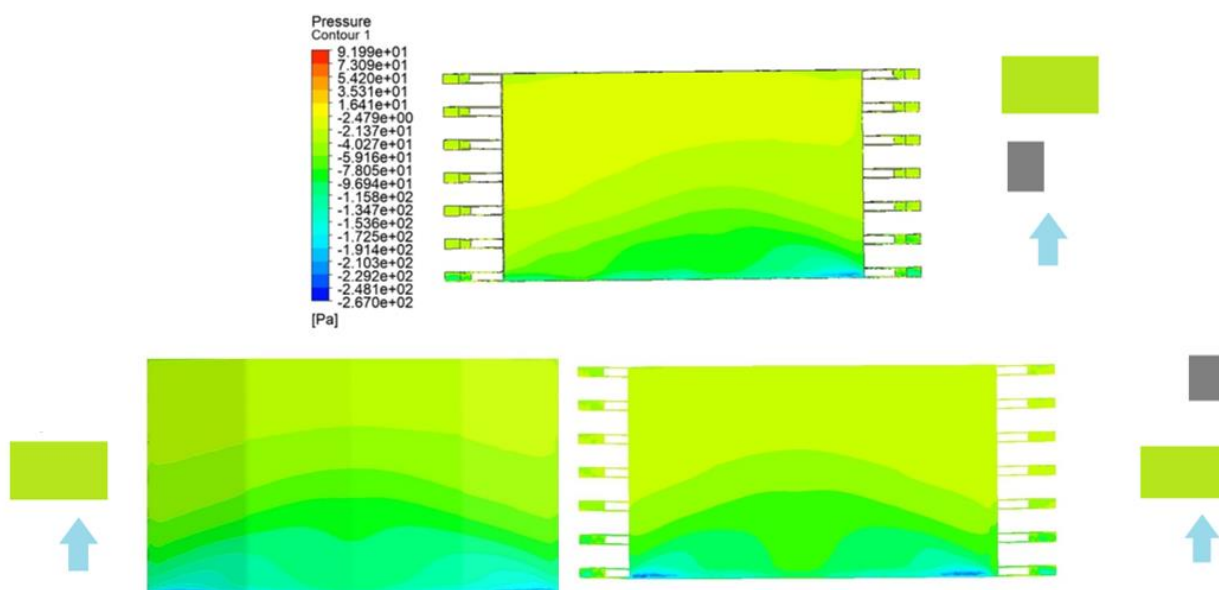


Рис. 3.8. Изополя распределения ветровых давлений по результатам численного моделирования для направления при различных положениях в системе

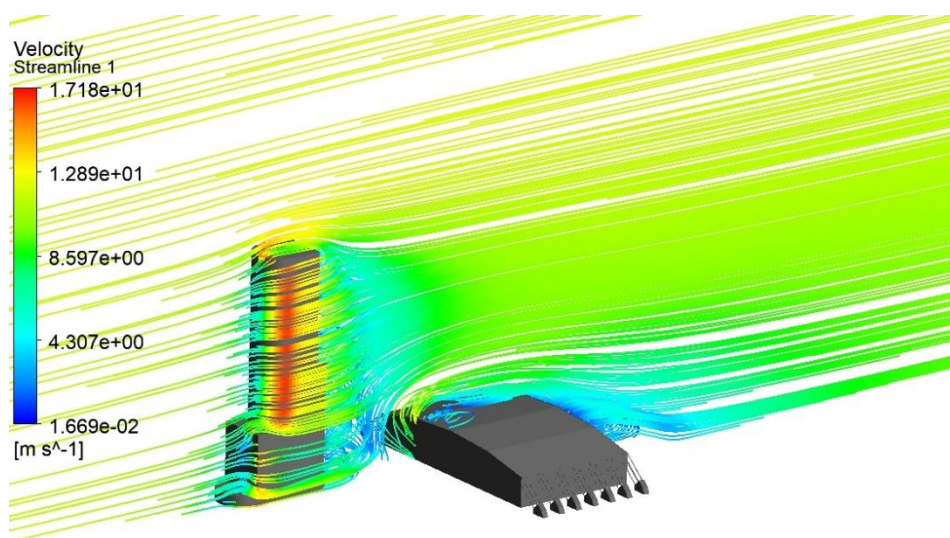
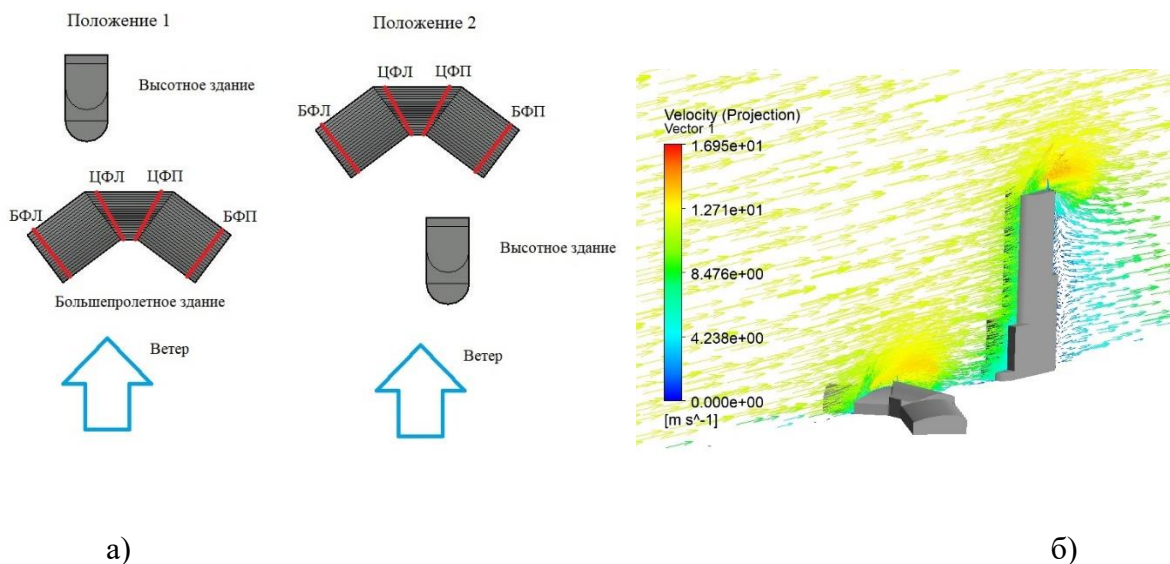


Рис. 3.9. Визуализация обтекания системы зданий ветровым потоком по результатам численного моделирования. Разрез потоков в плоскости, параллельной направлению потоков

Также было проведено моделирование распределения нагрузок системы из зданий, рассмотренных в разделах 2.3 и 3.1. На рисунке 3.10 показано обтекание системы тел ветровыми потоками, а также схема расположения зданий относительно друг друга. Результаты для высотного здания представлены на рисунке 3.11, а для большепролетного на рисунке 3.12.



а)

б)

Рис. 3.10. а) Схема расположения зданий относительно друг друга, принятые для исследования, маркировка ферм большепролетного здания. б) Визуализация обтекания тел ветровым потоком при положении 1. Разрез потоков в плоскости, параллельной направлению потоков

На основе эмпирического анализа изополей установлено, что наличие объекта, расположенного в наветренной зоне, вызывает существенное преобразование воздушных потоков, характеризующееся изменением их

направления и скорости. Данный эффект приводит к модификации распределения аэродинамического давления на поверхности подветренного объекта. Наиболее ярко выраженные изменения наблюдаются в областях, частично или полностью затененных наветренным объектом при ортогональном проецировании системы на плоскость XOZ.

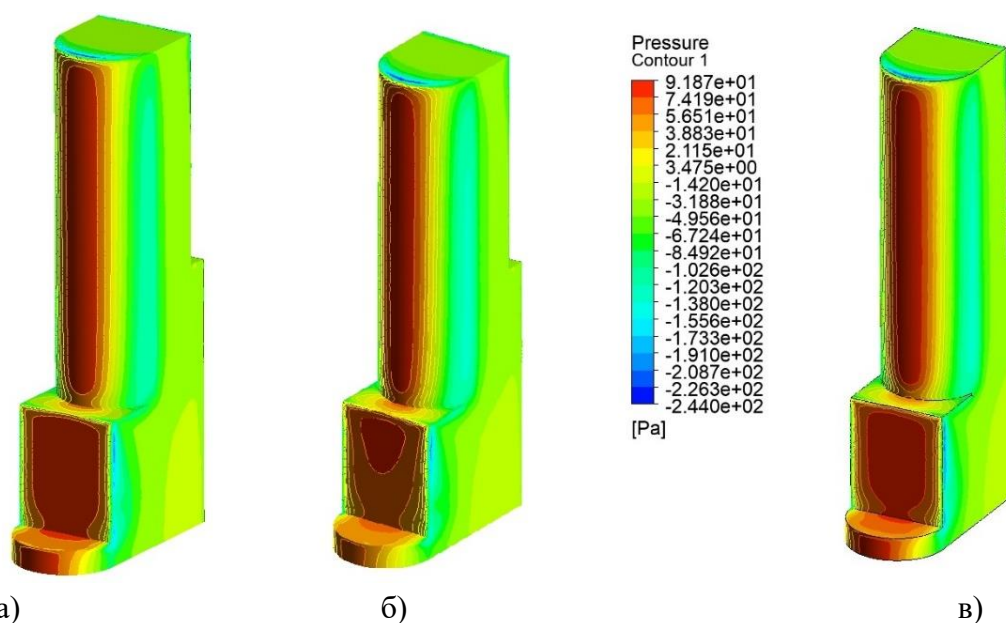


Рис. 3.11. Визуализация распределения ветрового давления по поверхностям высотного тела: а) отдельностоящее (изолированное); б) положение 1 (рис.3.10.а); в) положение 2 (рис.3.10.а)

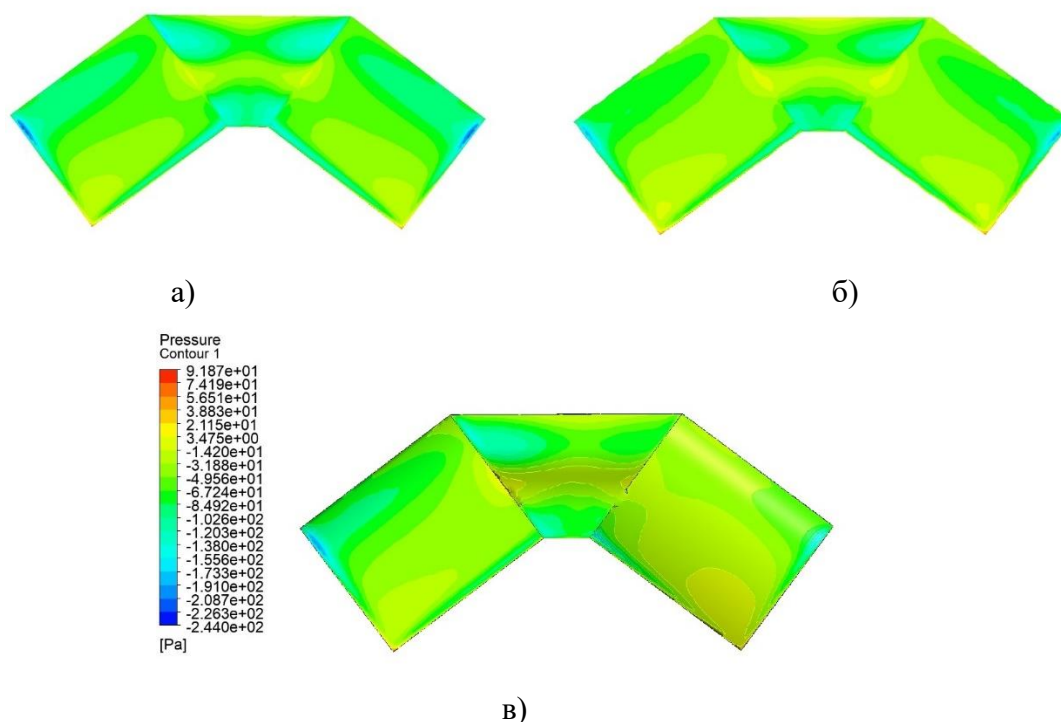


Рис. 3.12. Визуализация распределения ветрового давления по поверхностям большепролетного тела: а) отдельностоящее (изолированное); б) положение 1 (рис.3.10.а); в) положение 2 (рис.3.10.а)

В отличие от изолированного расположения объектов в потоке воздуха, картина распределения давления демонстрирует наличие локализованных областей с повышенным или резко пониженным давлением. Варьирование параметров, определяющих конфигурацию системы, таких как межосевое расстояние, углы ориентации объектов и их геометрические характеристики, способно приводить к увеличению пространственной протяженности данных областей или к росту абсолютной величины градиента ветрового давления в пределах этих зон.

Обратное влияние подветренного объекта на систему, обусловленное отражением воздушных потоков от его поверхности и образованием связанных с этим вихревых структур, визуально оценить затруднительно. Однако такое влияние имеет место и требует учета при анализе аэродинамических характеристик.

Для более точной количественной оценки влияния сложной геометрии объектов на их аэродинамические характеристики был введен параметр, представляющий собой вектор равнодействующей сил ветрового давления. В случае объектов с горизонтальной конфигурацией дополнительно рассчитывался момент силы относительно основания, обусловленный приложением данной равнодействующей.

Для ранее рассмотренной системы (рисунок 3.13) значения равнодействующих сил и координаты точек их приложения к объектам представлены графически на рисунке 3.14. Числовые значения модуля равнодействующей силы и момента относительно основания для объекта № 1 приведены в таблице 3.1 и зависят от взаимного расположения объектов в системе.

Представленный вариант анализа подтверждает присутствие взаимного влияния объектов друг на друга в составе аэродинамической системы.

Вне зависимости от пространственной конфигурации объектов в системе, модуль вектора результирующей силы ветрового давления, действующей на каждый объект, демонстрирует устойчивое снижение [121]. Данное явление оказывает значимое влияние на величину результирующего опрокидывающего момента, приложенного к основанию объекта № 1, вызывая его уменьшение по

сравнению с изолированным размещением объекта. Снижение опрокидывающего момента наблюдается как при расположении объекта № 1 в подветренной (позиция № 1, рис. 3.13.а), так и в наветренной (позиция № 2, рис. 3.13.б) позициях относительно других объектов в системе. Экспериментальные результаты согласуются с предположением о наличии феномена отражения и реверсивного движения воздушных потоков, вызванного объектами, находящимися в подветренной зоне. Подобное изменение испытывает и результирующая сила ветрового воздействия на объект № 2 в зависимости от расположения объекта № 1: будь то с подветренной стороны (конфигурация № 1, рис. 3.13.а) или с наветренной (конфигурация № 2, рис. 3.13.б).

Таблица 3.1

Равнодействующие сил (моментов) ветрового давления

№ объекта	Значения равнодействующих сил, кН (моментов, МНм)		
	Одиночное расположение	Положение № 1	Положение № 2
1	672 (68)	601 (65)	636 (65)
2	709	606	515

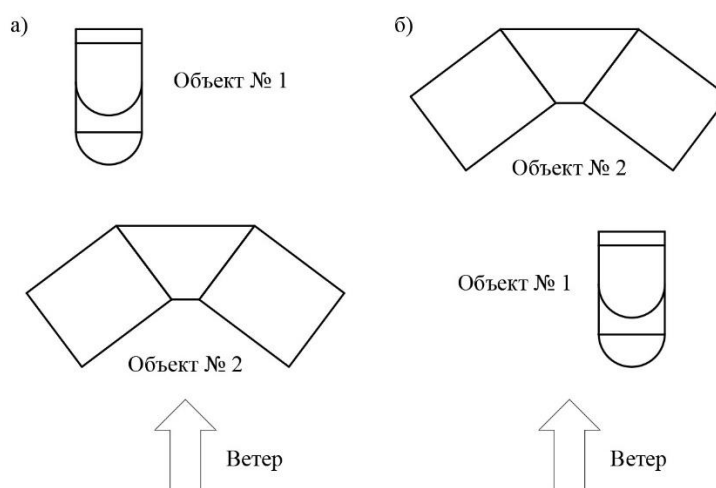


Рис. 3.13. Схема расположения объектов, относительно друг друга, принятые для исследования:
а) – положение № 1; б) – положение № 2

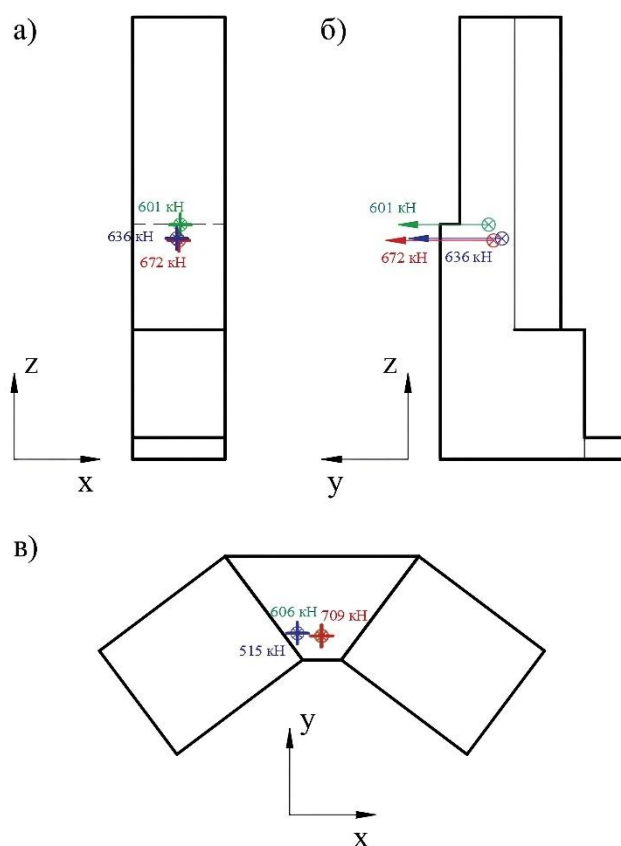


Рис. 3.14. Равнодействующие сил ветрового давления: а) для объекта № 1 (проекция XOZ); б) для объекта № 1 (проекция YOZ); в) для объекта № 2

Интенсивность снижения модуля равнодействующей силы ветрового давления в подветренной позиции объекта, относительно его изолированного состояния, количественно превосходит аналогичное снижение при наветренном расположении, и данная закономерность наблюдается в обоих анализируемых случаях. В частности, данное явление ярко выражено для объекта № 2 (рис. 3.14.б) и объясняется увеличением площади зоны снижения давления, как это визуализировано на картине распределения ветрового давления для конфигурации № 2 (рис. 3.12.б).

Точка приложения равнодействующей силы ветрового давления демонстрирует большую зависимость от позиции объекта в составе системы, чем модуль этой равнодействующей силы. В частности, в положении № 1, центр приложения сил ветрового давления на объект № 1 (обозначен зеленым вектором на рис. 3.14) смещается в вертикальном направлении вверх по сравнению с аналогичной точкой при изолированном расположении объекта (обозначен

красным вектором). Однако, при положении № 2, данное явление не наблюдается: точка приложения равнодействующей силы (обозначена синим вектором) практически не изменяет своего положения относительно изолированного объекта, при этом существенное изменение претерпевает только модуль результирующей силы.

Аналогичная закономерность справедлива и для объекта № 2: координаты центра приложения сил ветрового давления значительно изменяются в плоскости ХОУ при положении № 2 (обозначено синим вектором). В отличие от этого, при положении № 1 (обозначено зеленым вектором) координаты центра приложения сил демонстрируют незначительные изменения по сравнению с одиночным расположением объекта № 2 (обозначено красным вектором).

Равнодействующая сил ветрового давления, воздействующая на стационарный объект, являющийся частью системы объектов сопоставимых размеров и объединенных общим аэродинамическим полем, характеризуется меньшим модулем, чем в случае изолированного объекта, независимо от конфигурации системы. Величина снижения модуля равнодействующей силы зависит как от относительного расположения объектов, так и от геометрических параметров рассматриваемого и смежных с ним объектов

Координаты точки приложения равнодействующей силы ветрового давления на объект в системе, в большей степени зависят от взаимного расположения объектов, чем модуль этой силы. Совместное изменение координат точки приложения и модуля равнодействующей может значительно влиять на величину равнодействующего момента в основании объекта.

Равенство равнодействующих моментов в основании объекта № 1 в положениях № 1 и № 2, зафиксированное в рамках данного исследования, может являться случайным, обусловленным конкретной комбинацией параметров объектов и их пространственной конфигурации. Увеличение модуля равнодействующего момента в основании объекта, интегрированного в систему, может быть вызвано значительным смещением центра приложения

равнодействующей сил ветрового давления вдоль оси Z , что приводит к увеличению плеча момента.

Представленные заключения акцентируют потребность в проведении комплексного анализа систем статичных объектов, взаимодействующих посредством аэродинамической среды. При этом, необходимо учитывать не только геометрические параметры объекта, представляющего первостепенный практический или научный интерес, но и характеристики окружающих его объектов, а также особенности их пространственного расположения.

3.3 Интеграция ветрогенераторов в высотное здание

В области энергоснабжения крупных потребителей доминирующим решением является использование крупногабаритных ветроэлектростанций, расположенных в зонах с оптимальными ветровыми характеристиками, удаленных от плотной городской застройки. Вместе с тем, для децентрализованного энергообеспечения маломощных потребителей, отдельных зданий и инфраструктурных объектов, отмечается тенденция к интеграции ветрогенераторов различной конфигурации в городскую инфраструктуру. Глобальный опыт демонстрирует варианты размещения автономных ветроэнергетических установок в пределах городской среды, их монтажа на существующих строениях, а также полной архитектурной интеграции ветровых турбин в структуру зданий.

Архитектурная интеграция ветровых турбин представляет особый интерес для данного исследования в силу уникального набора технических решений, необходимых как при строительстве, так и при проектировании самих ветрогенераторов. Данный подход к интеграции аккумулирует знания из различных научных областей, включая машиностроение, приборостроение, гидрогазодинамику и строительную механику.

Помимо технических требований, предъявляемых к объектам с интегрированными ветрогенераторами, следует учитывать географические факторы и ориентацию относительно преобладающих ветровых потоков в

выбранной местности. Это необходимо для оптимизации выработки электроэнергии ветрогенераторами.

Оптимизация выбора конструкции ветрогенератора для интеграции в объект произвольной формы сводится к определению ориентации оси ротора. [30, 65].

Горизонтальные ветрогенераторы, требующие ориентации по направлению ветра с помощью флюгера и систем слежения, обычно размещаются в наивысшей точке объекта для обеспечения максимального доступа к невозмущенному ветровому потоку. Однако, в условиях городской застройки, особенно для объектов малой и средней этажности, ветровые потоки могут быть турбулентными и иметь переменную направленность, что снижает эффективность горизонтальных ветрогенераторов. Фиксированная ориентация оси ротора в таких условиях также не является оптимальным решением. В подобных ситуациях, ветрогенераторы с вертикальной осью вращения представляют собой более эффективную альтернативу. Они не зависят от направления ветра и демонстрируют устойчивую работу в условиях турбулентного потока, что упрощает их интеграцию и расширяет возможности размещения, включая зоны с ограничениями на высоту сооружений.

Гораздо более перспективным решением видится применение ветровых установок с вертикальной осью ротора (рис. 3.15), основным преимуществом которых является отсутствие необходимости учета направления потока ветра. Генератор с вертикальной осью вращения более чувствителен к низким скоростям ветра, свойственным городской среде. Меньшая энергоэффективность его конструкции в сравнении с ветрогенераторами с горизонтальной осью, компенсируется меньшим шумовым загрязнением среды, что немаловажно в городской черте, и, что еще более важно, большая свобода в выборе геометрической формы объекта, позволяет разместить такой ветрогенератор в отверстиях на его поверхности, очертания которой способствуют значительному увеличению скорости ветра в них, и как следствие, увеличению энергетического потенциала ветровой установки.

Ветровые установки с вертикальной осью ротора (рис. 3.15) представляют собой перспективное решение, особенно в городских условиях, благодаря их

независимости от направления ветра. Вертикальные ветрогенераторы обладают повышенной чувствительностью к низким скоростям ветра, что делает их подходящими для городской среды. Несмотря на меньшую энергоэффективность по сравнению с горизонтальными ветрогенераторами, они характеризуются сниженным уровнем шумового загрязнения, что является важным фактором в городской среде. Кроме того, гибкость в выборе геометрической формы позволяет интегрировать такие ветрогенераторы в различные архитектурные элементы, например, в отверстия на поверхности зданий, где конфигурация способствует увеличению скорости ветра и, как следствие, повышению энергетического потенциала установки.

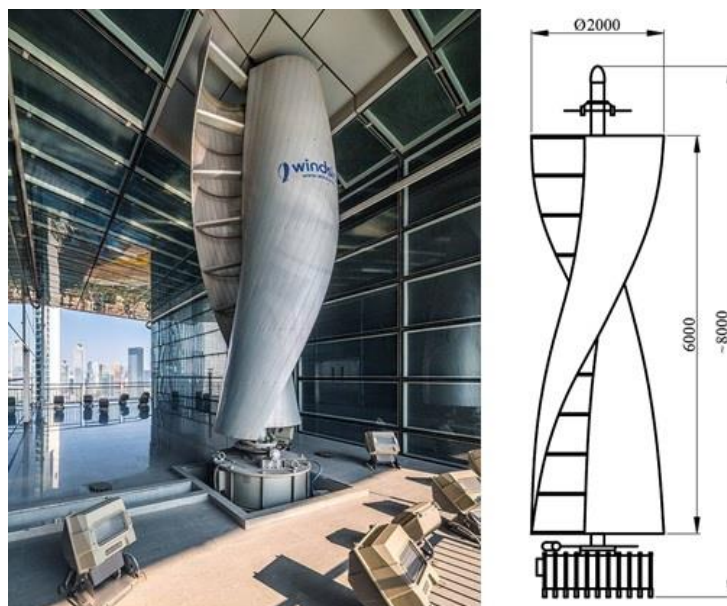


Рис. 3.15. Принципиальная конструкция ветрогенератора с вертикальной осью ротора.

Задачи увеличения скорости ветровых потоков в области турбины ветрогенератора и обеспечения возможности эффективного нагнетания в нее ветра являются приоритетными при выборе геометрической формы объекта.

Исследование проводилось для объекта симметричного горизонтального сечения с изогнутой формой внешней оболочки, способствующей эффективному вовлечению ветровых потоков в рабочую область турбины ветровой установки [17].

Геометрические размеры поперечного сечения объекта параметризованы таким образом, чтобы при изменении угла наклона его грани, площадь поперечного

сечения оставалась неизменной за счет изменения длины сегмента поверхности объекта (рис. 3.16.а). Таким образом, при изменении угла наклона были получены шесть исследуемых моделей внешней оболочки объекта (рис. 3.16.б).

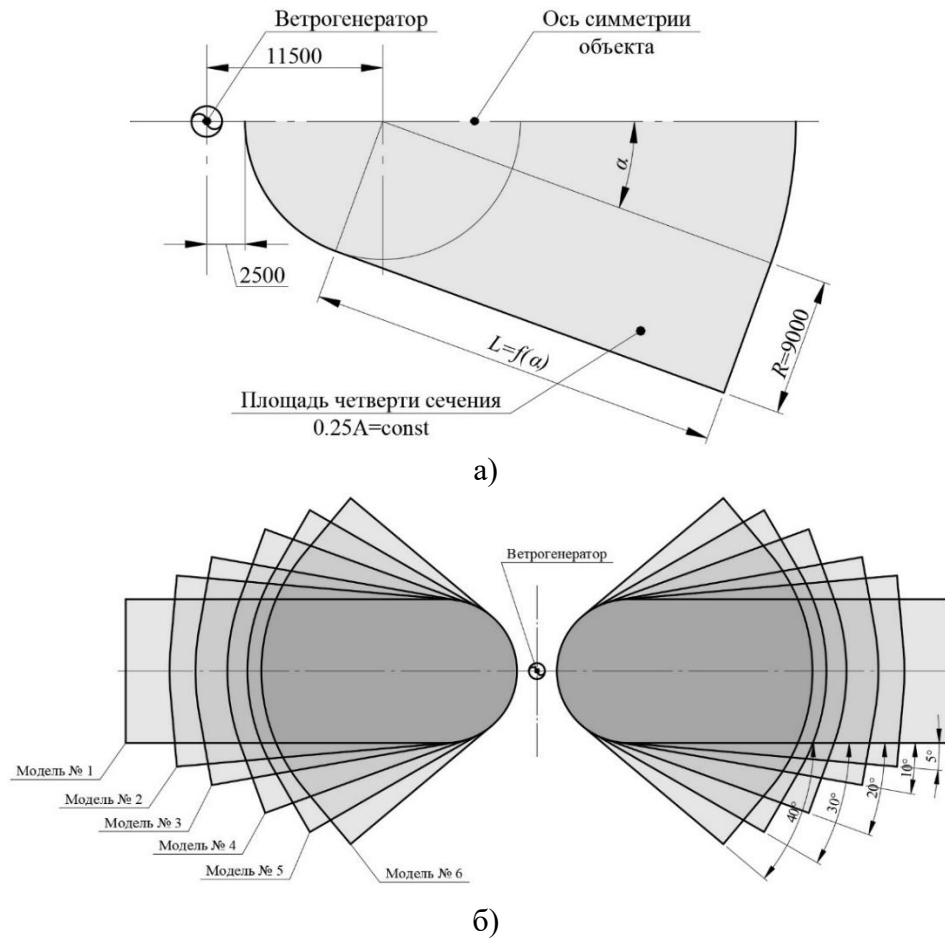


Рис. 3.16. а) Параметризация геометрических размеров поперечного сечения модели.
б) Исследуемые модели внешней оболочки объекта.

Исследование обтекания объема здания ветровым потоком сводится к решению нестационарного уравнения Навье-Стокса [37, 38]:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \mu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}, \quad (3.1)$$

где ∇ – оператор набла, Δ – векторный оператор Лапласа, t – время, μ – коэффициент кинематической вязкости, ρ – плотность, p – давление, $\vec{v}$ – векторное поле скорости, $\vec{f}$ – векторное поле массовых сил. Неизвестные p и $\vec{v}$ являются функциями времени и координаты.

Оптимальным методом решения данного уравнения является численное моделирование процесса обтекания здания ветровым потоком в программном комплексе *Ansys Discovery 2021 R1*, модуль *Fluent*. Расчетная область при этом

разбивается на конечные объемы со сгущением сетки конечных элементов к поверхности исследуемой модели [36], что связано с более быстрым изменением градиента скорости в пристеночной области, чем в основном расчетном объеме (рис. 3.17).

Для дальнейшего анализа результатов расчета необходимо ввести значение коэффициента увеличения скорости ветра в канале с ветрогенератором в сравнении с исходной: $k = v_k / v_{исх}$.

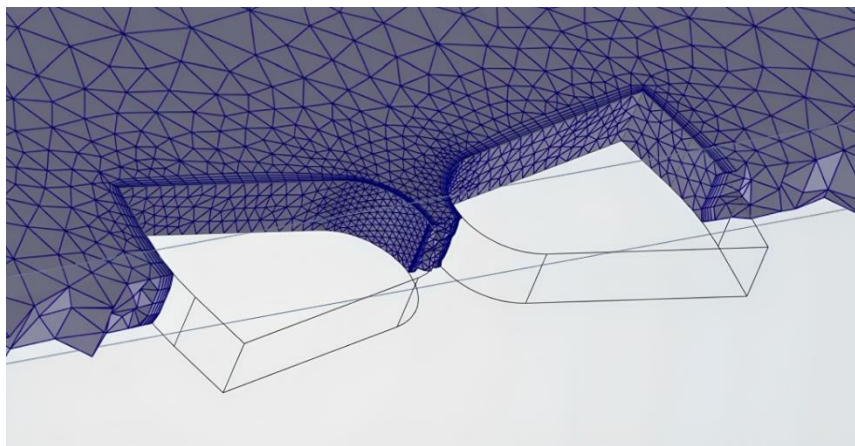


Рис. 3.17. Фрагмент расчетной области с разбивкой на конечные элементы.

С целью анализа поведения потока в расчетной области визуализируется поле направления движения ветра с выделением точек деления потока и характерных групп направлений (рис. 3.18).

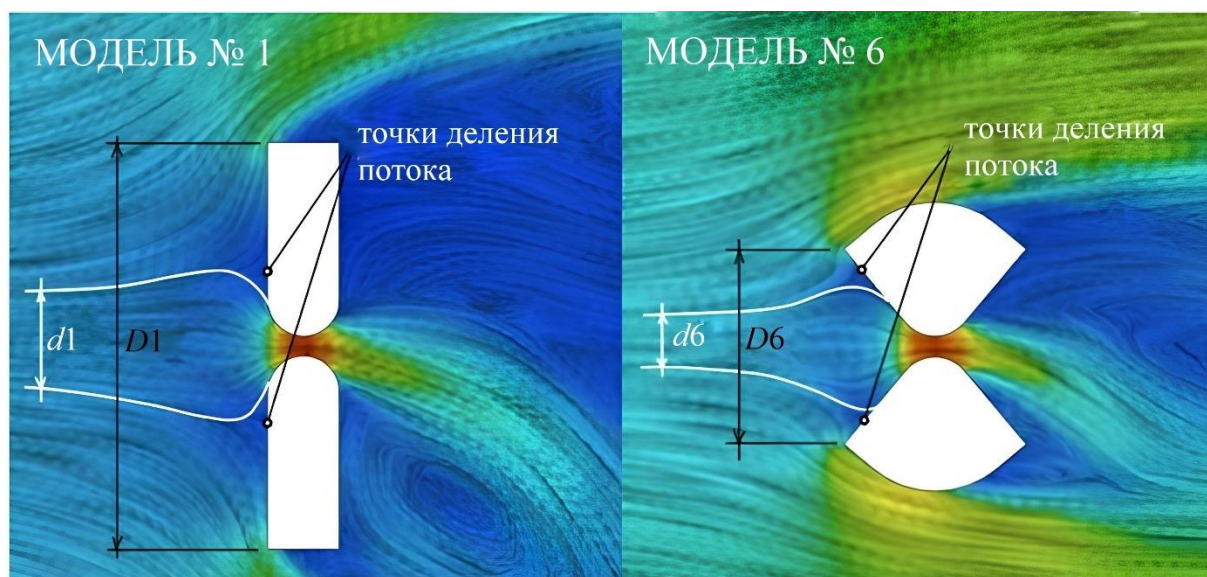


Рис. 3.18. Поля направлений обтекания моделей № 1 и № 6.

Далее приводятся графики зависимости коэффициента увеличения скорости k от угла ветровой атаки Θ для каждой из 6-ти моделей, а также график зависимости

того же коэффициента от угла наклона поверхности объекта α для каждого из направлений ветра (рис.3.19).

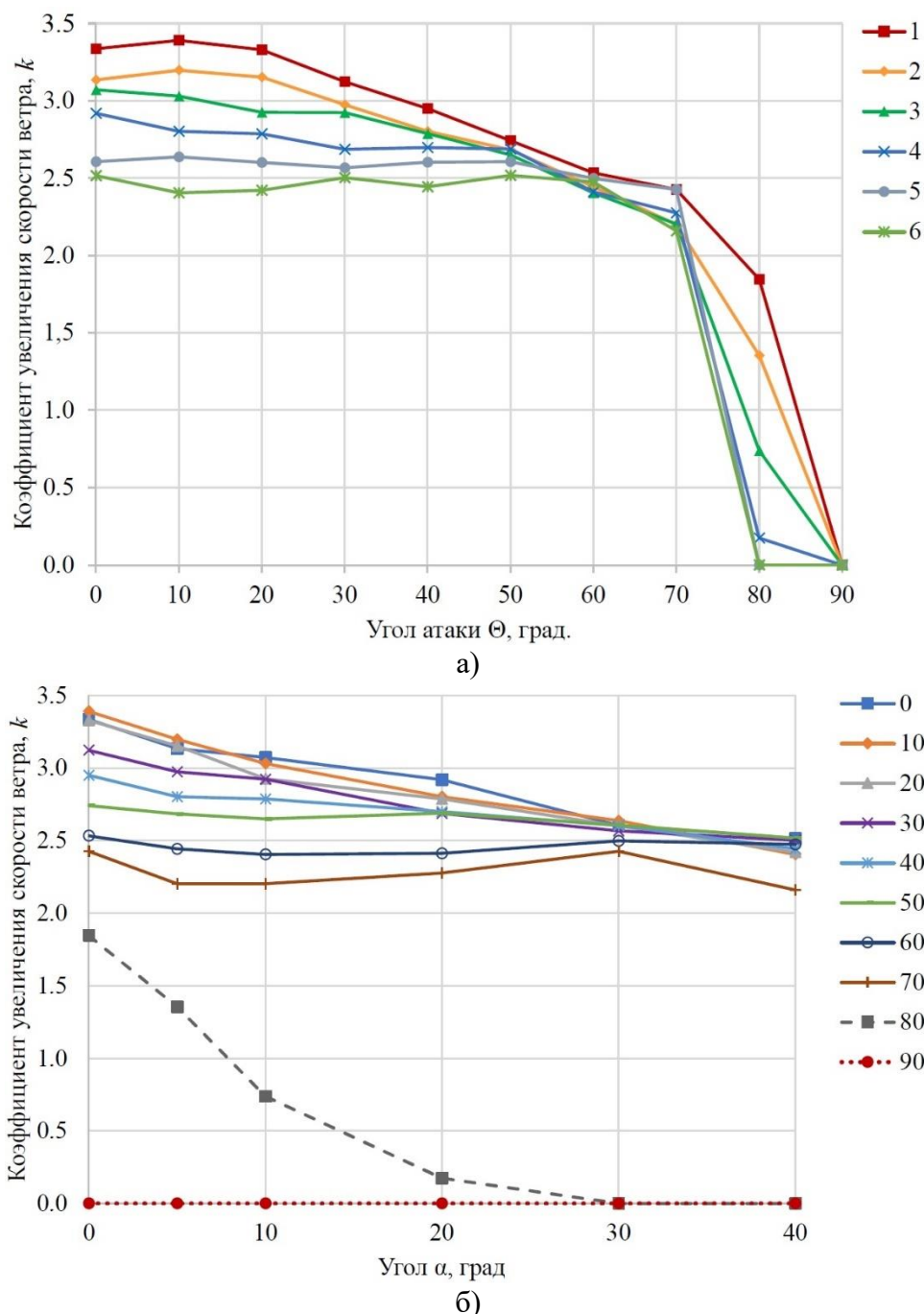


Рис. 3.19. Графики: а) - зависимости коэффициента увеличения скорости k от угла α для всех углов атаки Θ ; б) - зависимости коэффициента увеличения скорости k от угла атаки Θ для моделей 1–6.

При оценке энергоэффективности объектов, использующих альтернативные источники энергии, необходимо учитывать географическое местоположение и его соответствие конкретному источнику энергии. Для максимизации выработки электроэнергии ветрогенераторами целесообразно размещать объекты в районах с высоким нормативным ветровым давлением [137].

На основании статистических данных метеостанции получены сведения о повторяемости направлений ветра и штилей, значениях средних скоростей ветра по его направлениям, что в дальнейшем может позволить определить наиболее выгодную ориентацию поперечного сечения объекта по отношению к ветровым потокам с точки зрения максимизации мощности, вырабатываемой ветрогенераторами.

Для анализа применяется зависимость коэффициента усиления ветра k в канале с ветрогенераторами от угла атаки Θ , полученная методами вычислительной гидрогазодинамики и численным моделированием в программном комплексе *Ansys Discovery 2021 R1*.

Результаты исследования коэффициентов усиления ветра k получены с шагом 10° , что отличается от климатических данных, доступных для восьми направлений с шагом 22.5° . В связи с этим, возникает необходимость усреднения значений k для соответствующих румбов (рис. 3.20).

Ориентация объекта считается оптимальной если при ней достигается максимальная годовая выработка энергии ветрогенераторами с учетом розы ветров.

Вырабатываемая мощность P турбины пропорциональна кубу скорости ветра V в канале с размещенным ветрогенератором: $P \propto V^3$.

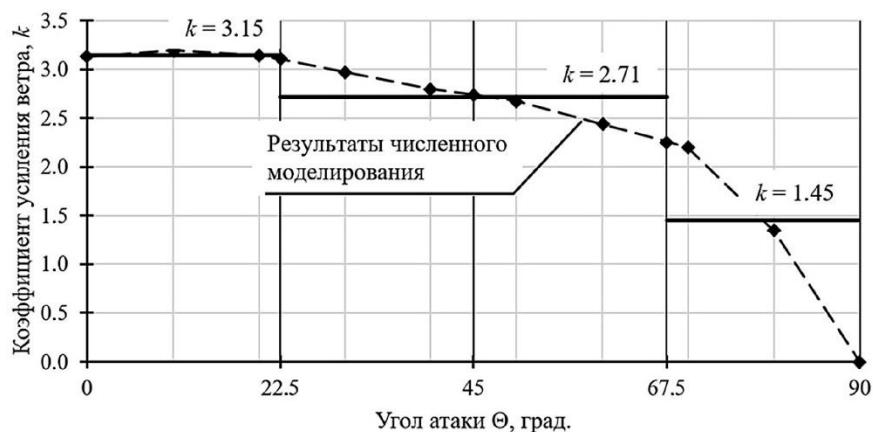


Рис. 3.20. График зависимости коэффициента увеличения скорости k от угла атаки Θ по результатам численного моделирования и значения усредненных величин.

В данном случае, вырабатываемая кумулятивная мощность P_{Σ} (при коэффициенте пропорциональности равным единице) за годовой период определяется для каждой ориентации здания по формуле:

$$P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \bar{r}_i (k_i \bar{V}_i)^3, \quad (3.2)$$

где $n = 8$ – количество направлений ветра, $\bar{r}_i$ – среднее арифметическое повторяемости i -ого направления за год, д.ед., k_i – коэффициент усиления ветра для i -ого направления ветра, д.ед., $\bar{V}_i$ – среднее арифметическое значение скорости по i -ому направлению за год, м/с.

Для проведения количественной оценки эффективности функционирования турбин при каждой j -ой ориентации здания, вводится понятие потенциала мощности p , определяемого как процентное отношение к максимальной кумулятивной мощности, что позволяет численно выразить данную эффективность:

$$p_j = \frac{P_{\Sigma j}}{P_{\Sigma \max}} \cdot 100\%. \quad (3.3)$$

Расчет кумулятивной мощности и потенциала мощности для каждого направления сведены в таблицы 3.2 и 3.3. Графики соответствующих величин в полярных координатах представлены на рисунке 3.21.

Таблица 3.2

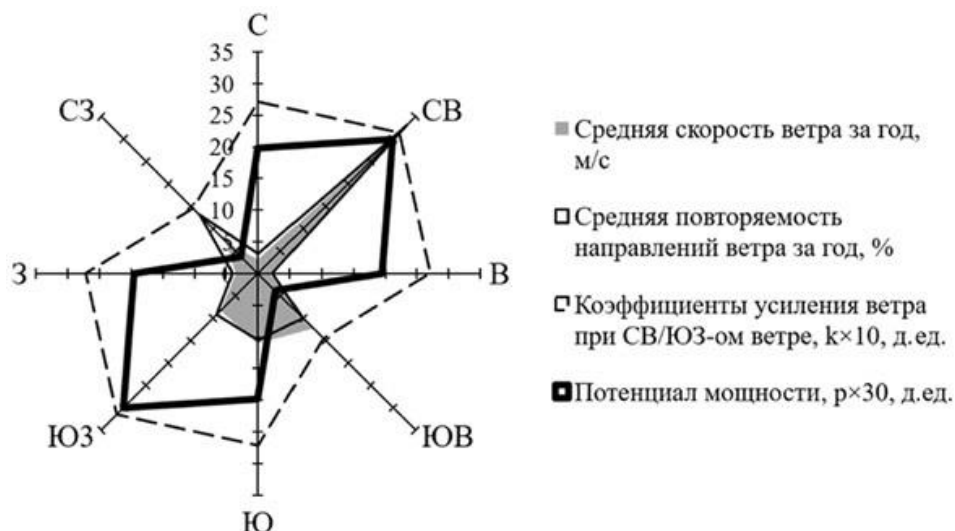
Величины к определению кумулятивной мощности

Направление ветра	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Средняя повторяемость по направлениям за год $\bar{r}_i$, %	2.18	33.67	1.85	12.25	11.04	8.35	3.50	7.08
Средняя скорость ветра по направлениям $\bar{V}_i$, м/с	3.1	33	2.2	10	10.5	9.2	4	13
Коэффициенты усиления ветра k_i в канале при ориентации здания по направлениям								
С/Ю	3.15	2.71	1.45	2.71	3.15	2.71	1.45	2.71
СВ/ЮЗ	2.71	3.15	2.71	1.45	2.71	3.15	2.71	1.45
В/З	1.45	2.71	3.15	2.71	1.45	2.71	3.15	2.71
ЮВ/СЗ	2.71	1.45	2.71	3.15	2.71	1.45	2.71	3.15

Таблица 3.3

Кумулятивная мощность за год по направлениям при определенной ориентации объекта

Ориентация	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	P_{Σ}	p , %
С/Ю	0.020	241.75	0.001	2.45	3.98	1.30	0.007	3.11	252.61	66
СВ/ЮЗ	0.013	376.81	0.004	0.38	2.55	2.03	0.045	0.48	382.30	100
В/З	0.002	241.75	0.006	2.45	0.39	1.30	0.070	3.11	249.08	65
ЮВ/СЗ	0.013	37.08	0.004	3.82	2.55	0.20	0.045	4.85	48.55	13

Рис. 3.21. Определение потенциала мощности p при различной ориентации объекта.

В ходе исследования оптимальной формы объекта [74] выяснилось, что наиболее эффективной является модель с углом наклона поверхности $\alpha=0^\circ$ при заданном размере поперечного сечения. Тем не менее, такая форма приведет к снижению жесткости конструкции из-за увеличения ее размера в направлении ветра. Поэтому, учитывая конструктивные требования, оптимальным компромиссом будет угол $\alpha=6^\circ$. Он обеспечивает высокую скорость ветра в рабочей зоне ветрогенератора при разных углах атаки и значительно уменьшает длину поперечного сечения, сохраняя его площадь.

Для максимальной годовой выработки электроэнергии ветрогенератором, установленным на здании с двумя осями симметрии, оптимально ориентировать здание по оси СВ-ЮЗ. Ориентация в пределах секторов С-СВ-В или Ю-ЮЗ-З приводит к снижению потенциальной выработки не более чем на 35%. В то же время, другие направления ориентации приводят к значительным потерям мощности, достигающим 87%.

Данная методика определения рациональной ориентации объектов с интегрированными ветрогенераторами, при наличии соответствующих исходных данных и возможности к проведению аналогичных численных расчетов и модельных экспериментов, может быть применима для объектов любых форм и габаритов, вне зависимости от их планируемого географического расположения.

3.4 Экспериментальное моделирование аэродинамики высотного здания с ветрогенераторами

Было проведено аэродинамическое исследование проектируемого с учетом выбранной в предыдущем разделе формы 67-этажное высотное уникального здания с ветрогенераторами высотой 304,7 м [130]. Макет здания представлен на рисунке 3.22. Форма здания имеет воронкообразное очертание в плане для эффективного вовлечения потоков воздуха к ветрогенераторам и их стабилизации для уменьшения усталостных нагрузок на лопасти турбин [41].



Рис. 3.22. Макет здания в аэродинамической трубе

Значения аэродинамических коэффициентов, полученные при проведении эксперимента, представлены на рисунке 3.23.

Также были рассмотрены значения аэродинамических коэффициентов, представленные в приложении В [137], как для эквивалентного по внешним габаритам прямоугольного здания $87,4 \times 27,0 \times 277,2$ м (п. В.1.2 «Прямоугольные в

плане здания с двускатными покрытиями») и арочного покрытия эквивалентного размера в плане $87,4 \times 27,0$ м с переменной стрелой подъема $27,3 \dots 12,6$ м (п. В.1.3 «Прямоугольные в плане здания со сводчатыми и близкими к ним по очертанию покрытиями»).

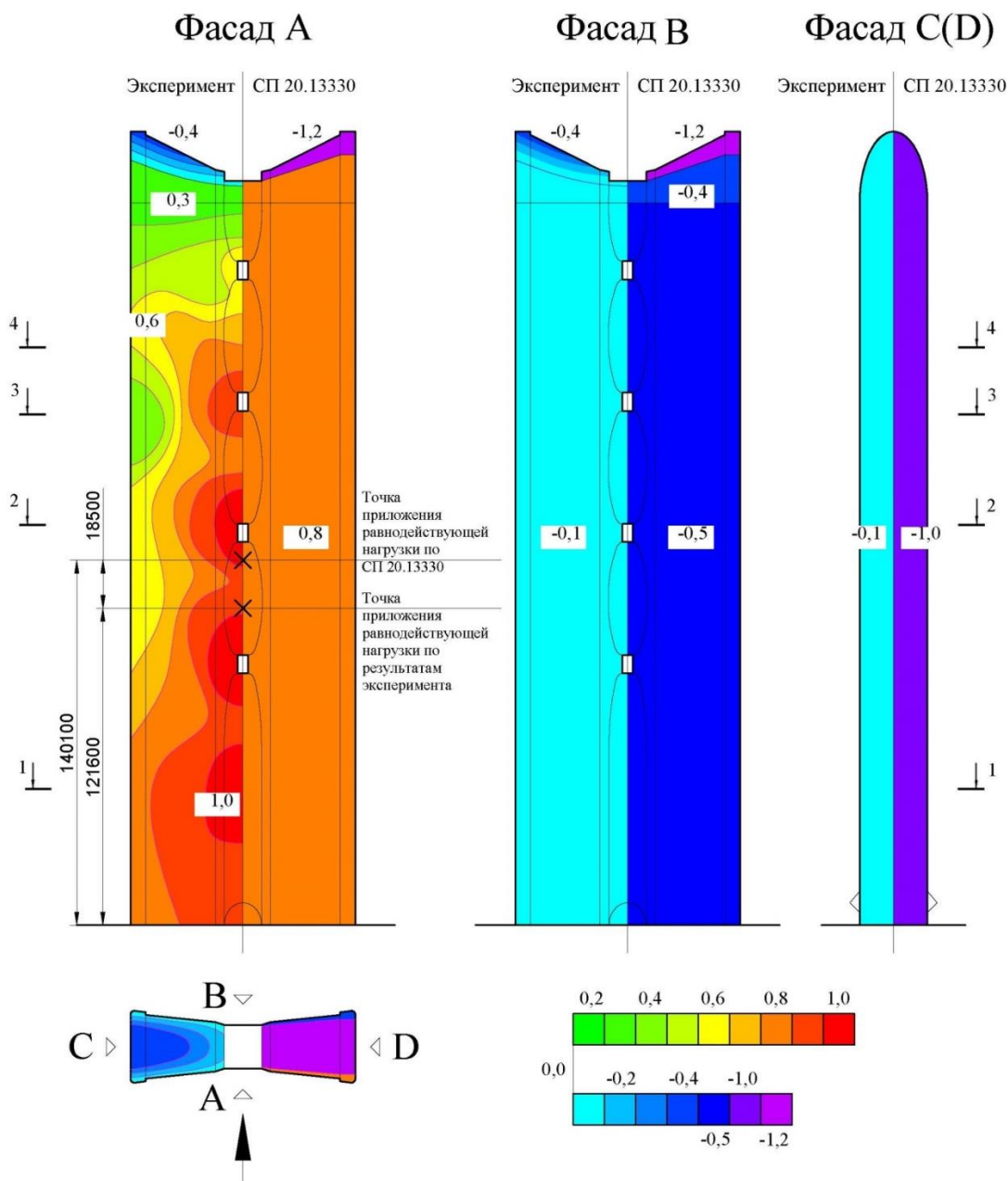


Рис. 3.23 Изополя распределения аэродинамических коэффициентов по результатам эксперимента и согласно данным СП 20.13330.2016 для эквивалентного по внешним габаритам прямоугольного здания $87,4 \times 27,0 \times 277,2$ м и арочного покрытия эквивалентного размера в плане $87,4 \times 27,0$ м с переменной стрелой подъема $27,3 \dots 12,6$ м

На рисунке 3.24 показаны эпюры нормативных ветровых давлений в характерных сечениях на высотах 55, 155, 195 и 225 метров, вычисленных согласно

[137]. Увеличение давлений к середине сечения может быть обусловлено формой здания, способствующей «сгущению» ветровых потоков к центральной оси здания.

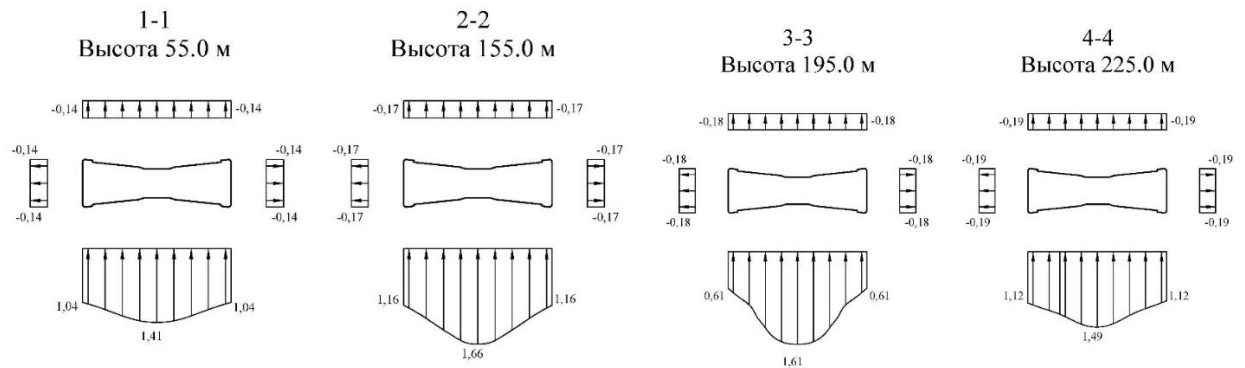


Рис. 3.24. Эпюры нормативных ветровых давлений в характерных сечениях здания (места расположения сечений показаны на рис. 3.25)

В результате анализа полученных экспериментально аэродинамических коэффициентов можно сделать следующие выводы.

1) Осредненное по площади значение аэродинамического коэффициента для наветренной части здания составляет 0,76 и соответствует значению 0,8, представленному в нормативных документах [137]. Распределение ветрового давления, в связи с наличием сквозных проемов в верхней части здания, неравномерно по высоте и изменяется от 1,0 до 0,3. В следствии этого уменьшается значение равнодействующей нагрузки, а точка приложения смещается ниже и, соответственно, создаваемый опрокидывающий момент в основании здания уменьшается. Уменьшение значения опрокидывающего момента говорит о повышении общей способности объекта сопротивляться воздействию ветровых нагрузок, что в свою очередь, позволяет сделать заключение о том, что внедрение ветрогенераторов в тело объекта, помимо повышения его энергоэффективности, зачастую может благоприятно влиять и на его аэродинамические параметры.

2) Локальное увеличение аэродинамических коэффициентов в месте расположения проемов для установки ветрогенераторов говорит об увеличении давления и скорости внутри проемов и, соответственно, эффективном вовлечении ветрового потока к расположенным внутри ветрогенераторным установкам, подтверждая результаты ранее проведенного численного исследования.

3) Осредненное по площади значение аэродинамического коэффициента для подветренной части здания составляет 0,1 в абсолютном выражении, что много меньше нормативного значения, равного 0,5. Данное явление может быть связано с частичным «сбросом давления» за счет наличия проемов с наветренной части фасада, как это показано для объектов-аналогов [16-18, 23].

4) Интегральное значение лобового сопротивления по результатам эксперимента составило 0,9, что меньше значения 1,3 по нормативным документам [137] как для прямоугольного в плане здания эквивалентных габаритных размеров, что говорит об эффективном применении метода дренирования фасада здания для уменьшения ветрового давления.

5) Значения аэродинамических коэффициентов для арочной части здания в области пониженного давления составляют 0,4 в абсолютном выражении, что в 3 раза меньше нормативного значения 1,2. С учетом работ [138 - 140], в которых для такого типа покрытий прогнозируются значения, превосходящие нормативные, в качестве расчетных рекомендуется принимать значения коэффициентов, представленные в нормативных документах [137] в целях обеспечения надежности и безопасности работы строительных конструкций.

По результатам проведенного исследования можно заключить, что корректировка внешней оболочки высотных зданий может значительно снизить ветровое воздействие на здание – в работе показан один из таких способов – устройство сквозных проемов «сброса давления». Использование нормативных методик при определении ветровых нагрузок на такие здания ведет к избыточности принимаемых в дальнейшем конструктивных решений, а вынужденное повышение жесткости здания в результате этого – к увеличению динамических нагрузок на здание за счет резонансных эффектов.

ГЛАВА 4. Динамические расчёты конструкций зданий при обтекании газодинамической средой

4.1 Методика определения собственных динамических характеристик сложных систем при помощи многомассовых моделей

В качестве объекта исследования рассматривалось 8-этажное проектируемое здание гостиницы в городе Елизово Камчатского края (рис. 4.1). Несущие конструкции здания представлены стальными двутавровыми колоннами №30К3, монолитными железобетонными перекрытиями и ядром жесткости. Моделирование каркаса производилось в ПК *SCAD Office* с применением стержневых и пластинчатых элементов [155].

Для расчета частотных характеристик здания необходимо определить сосредоточенные в уровнях перекрытий массы, включающие в себя массу конструктивных элементов (колонны, диафрагмы, плиты перекрытий), а также все действующие полезные нагрузки [62, 90].

Сосредоточенные массы в уровнях перекрытия от постоянных и временных нагрузок определяются выражением:

$$M_i = \frac{\sum Q_i \cdot A_i}{g}, \quad (4.1)$$

где Q_i – суммарная нагрузка на i -перекрытие;

A_i – площадь i -го перекрытия;

g – ускорение свободного падения.



Рис. 4.1. Проектируемое каркасное здание фасад, пространственная конечно-элементная модель

При определении частот собственных колебаний каркасного здания, приводимого при расчете к схеме в виде консольного стержня с n сосредоточенными массами, составляется система уравнений (4.2), определитель которой (4.3) приравнивается к 0.

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\delta_{11}M_1 - \frac{1}{\omega^2} \right) a_1 + \delta_{12}M_2a_2 + \delta_{13}M_3a_3 + \delta_{14}M_4a_4 + \delta_{15}M_5a_5 + \delta_{16}M_6a_6 + \delta_{17}M_7a_7 + \delta_{18}M_8a_8 = 0 \\ \delta_{21}M_1a_1 + \left(\delta_{22}M_2 - \frac{1}{\omega^2} \right) a_2 + \delta_{23}M_3a_3 + \delta_{24}M_4a_4 + \delta_{25}M_5a_5 + \delta_{26}M_6a_6 + \delta_{27}M_7a_7 + \delta_{28}M_8a_8 = 0 \\ \delta_{31}M_1a_1 + \delta_{32}M_2a_2 + \left(\delta_{33}M_3 - \frac{1}{\omega^2} \right) a_3 + \delta_{34}M_4a_4 + \delta_{35}M_5a_5 + \delta_{36}M_6a_6 + \delta_{37}M_7a_7 + \delta_{38}M_8a_8 = 0 \\ \delta_{41}M_1a_1 + \delta_{42}M_2a_2 + \delta_{43}M_3a_3 + \left(\delta_{44}M_4 - \frac{1}{\omega^2} \right) a_4 + \delta_{45}M_5a_5 + \delta_{46}M_6a_6 + \delta_{47}M_7a_7 + \delta_{48}M_8a_8 = 0 \\ \delta_{51}M_1a_1 + \delta_{52}M_2a_2 + \delta_{53}M_3a_3 + \delta_{54}M_4a_4 + \left(\delta_{55}M_5 - \frac{1}{\omega^2} \right) a_5 + \delta_{56}M_6a_6 + \delta_{57}M_7a_7 + \delta_{58}M_8a_8 = 0 \\ \delta_{61}M_1a_1 + \delta_{62}M_2a_2 + \delta_{63}M_3a_3 + \delta_{64}M_4a_4 + \delta_{65}M_5a_5 + \left(\delta_{66}M_6 - \frac{1}{\omega^2} \right) a_6 + \delta_{67}M_7a_7 + \delta_{68}M_8a_8 = 0 \\ \delta_{71}M_1a_1 + \delta_{72}M_2a_2 + \delta_{73}M_3a_3 + \delta_{74}M_4a_4 + \delta_{75}M_5a_5 + \delta_{76}M_6a_6 + \left(\delta_{77}M_7 - \frac{1}{\omega^2} \right) a_7 + \delta_{78}M_8a_8 = 0 \\ \delta_{81}M_1a_1 + \delta_{82}M_2a_2 + \delta_{83}M_3a_3 + \delta_{84}M_4a_4 + \delta_{85}M_5a_5 + \delta_{86}M_6a_6 + \delta_{87}M_7a_7 + \left(\delta_{88}M_8 - \frac{1}{\omega^2} \right) a_8 = 0 \end{array} \right. ; \quad (4.2)$$

$$\left| \begin{array}{cccccccc} \delta_{11}M_1 - \frac{1}{\omega^2} & \delta_{12}M_2 & \delta_{13}M_3 & \delta_{14}M_4 & \delta_{15}M_5 & \delta_{16}M_6 & \delta_{17}M_7 & \delta_{18}M_8 \\ \delta_{21}M_1 & \delta_{22}M_2 - \frac{1}{\omega^2} & \delta_{23}M_3 & \delta_{24}M_4 & \delta_{25}M_5 & \delta_{26}M_6 & \delta_{27}M_7 & \delta_{28}M_8 \\ \delta_{31}M_1 & \delta_{32}M_2 & \delta_{33}M_3 - \frac{1}{\omega^2} & \delta_{34}M_4 & \delta_{35}M_5 & \delta_{36}M_6 & \delta_{37}M_7 & \delta_{38}M_8 \\ \delta_{41}M_1 & \delta_{42}M_2 & \delta_{43}M_3 & \delta_{44}M_4 - \frac{1}{\omega^2} & \delta_{45}M_5 & \delta_{46}M_6 & \delta_{47}M_7 & \delta_{48}M_8 \\ \delta_{51}M_1 & \delta_{52}M_2 & \delta_{53}M_3 & \delta_{54}M_4 & \delta_{55}M_5 - \frac{1}{\omega^2} & \delta_{56}M_6 & \delta_{57}M_7 & \delta_{58}M_8 \\ \delta_{61}M_1 & \delta_{62}M_2 & \delta_{63}M_3 & \delta_{64}M_4 & \delta_{65}M_5 & \delta_{66}M_6 - \frac{1}{\omega^2} & \delta_{67}M_7 & \delta_{68}M_8 \\ \delta_{71}M_1 & \delta_{72}M_2 & \delta_{73}M_3 & \delta_{74}M_4 & \delta_{75}M_5 & \delta_{76}M_6 & \delta_{77}M_7 - \frac{1}{\omega^2} & \delta_{78}M_8 \\ \delta_{81}M_1 & \delta_{82}M_2 & \delta_{83}M_3 & \delta_{84}M_4 & \delta_{85}M_5 & \delta_{86}M_6 & \delta_{87}M_7 & \delta_{88}M_8 - \frac{1}{\omega^2} \end{array} \right| = 0. \quad (4.3)$$

В результате раскрытия определителя (4.3) были получены значения первой и второй частот собственных колебаний: $\omega_1 = 15,868 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 92,130 \text{ с}^{-1}$.

Деление всех величин, входящих в уравнения (4.2), на значение амплитуды a_i , позволяет ввести параметр следующего вида:

$$\varphi_{ik} = \frac{a_{ik}}{a_{1k}}, \quad (4.4)$$

где i – номер массы M_i ;

k – номер формы собственных колебаний.

В итоге система уравнений (4.2) будет иметь 8 уравнений с семью неизвестными:

$$\begin{cases} (\delta_{11}M_1 - \frac{1}{\omega^2})\varphi_{1k} + \delta_{12}M_2\varphi_{2k} + \dots + \delta_{18}M_8\varphi_{8k} = 0 \\ \delta_{21}M_1\varphi_{1k} + (\delta_{22}M_2 - \frac{1}{\omega^2})\varphi_{2k} + \dots + \delta_{28}M_8\varphi_{8k} = 0 \\ \dots \\ \delta_{81}M_1\varphi_{1k} + \delta_{82}M_2\varphi_{2k} + \dots + (\delta_{88}M_8 - \frac{1}{\omega^2})\varphi_{8k} = 0 \end{cases} \quad (4.5)$$

Решение (4.5) позволяет определить величины φ_{ik} , необходимые для построения k -ой формы собственных колебаний (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Формы собственных колебаний 8-этажного каркасного 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
15,868	2,5256	0,39595	92,1204	14,663	0,0682
$\varphi_{11} = 1$			$\varphi_{12} = 1$		
$\varphi_{21} = 0,827$			$\varphi_{22} = 0,394$		
$\varphi_{31} = 0,657$			$\varphi_{32} = -0,145$		
$\varphi_{41} = 0,492$			$\varphi_{42} = -0,533$		
$\varphi_{51} = 0,339$			$\varphi_{52} = -0,7$		
$\varphi_{61} = 0,205$			$\varphi_{62} = -0,64$		
$\varphi_{71} = 1$			$\varphi_{72} = -0,407$		

В рамках исследований производилась оценка влияния ветрового давления на напряженно-деформируемое состояние несущих конструкций, а также оценка накоплений повреждений от данного воздействия [68]. В качестве объекта исследования рассматривалась колонна здания двутаврового сечения (№30К3) из стали С440.

Для осуществления расчётов был разработан алгоритм математического моделирования синтезированных анемограмм, основанный на псевдослучайных приращениях временных интервалов и приращении скорости ветровых порывов по Гауссовскому распределению.

Природа возникновения ветра лежит в перемещения воздуха из областей высокого давления в области более низкого давления. Преграды, расположенные на поверхности земли, вызывают турбулентность воздушного потока. Закрепившейся формой представления турбулентности ветра является разложение его скорости на две составляющие: средняя скорость ветра и скорость пульсации потока. Пульсационная составляющая, отвечающая за динамическую природу ветра, прикладывается квазистатически, то есть значение и характер распределения величины определяется динамическими параметрами системы (положением частот форм собственных колебаний в спектре), однако при расчете нагрузка учитываются как статическая, в следствие этого не учитываются вероятные резонансные эффекты, возникающие при приближении частоты ветровых пульсаций к собственным частотам конструкций.

Ветровое воздействие является случайным процессом, то есть в общем виде оно представляет собой функцию случайных значений скорости от времени. В связи с этим рационально изучать ветровые воздействия путем вероятностного анализа. Анемограмма (график зависимости скорости ветра от времени) представляется обычно в виде стационарного эргодического случайного процесса [3]. Математическое ожидание данного процесса является средней составляющей ветровой скорости:

$$m_x(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{r=1}^N x_r(t) = M[x(t)] \rightarrow M[V(t)] = V_m \quad (4.6)$$

Резонансная пульсационная составляющая скорости представляет собой центрированную случайную величину, для которой математическое ожидание равно нулю.

При стохастическом подходе задачей построения синтезированных анемограмм является моделирование реального поведения ветрового потока и

получение расчетного случая возникновения пиковых значений скорости ветровых потоков, когда частоты ветровых пульсаций оказываются близки к собственным частотам проектируемой конструкции. Таким образом на выходе мы имеем наименее выгодное ветровое воздействие, при котором возникают резонансные явления, расчет на которые гарантирует безопасную эксплуатацию здания или сооружения.

Далее описан алгоритм моделирования расчетных анемограмм, реализованный в виде программы для ЭВМ [163].

На первом этапе задаются начальные параметры анемограммы, параметры расчета, допустимые диапазоны значений расчетных величин:

- время измерения в секундах (рабочий диапазон);
- характеристическая скорость ветра v_{char} , определяемая в зависимости от ветрового района и равная скорости, задаваемой при модельных исследованиях в аэродинамической трубе или компьютерном исследовании в программно-вычислительных комплексах, реализующих CFD-метод;
- точность округления;
- максимальные и минимальные значения пиковых скоростей ветра (с учетом пульсационного приращения скорости). При расчете на однонаправленное ветровое воздействие минимальное значение пиковой скорости принимается равным 0, максимальное значение принимается исходя из данных многолетних метеорологических наблюдений площадки строительства объекта.

Далее вводятся динамические характеристики исследуемой конструкции:

- круговые частоты первой ω_1 и второй ω_2 форм собственных колебаний, которые могут быть получены в результате модального анализа расчётных программ, например, ПК Scad Office, ПК ЛИРА-САПР и т.д;
- коэффициент неупругого сопротивления, зависящий от применяемых конструкционных материалов (для стали $\gamma = 0,025$).

Рабочий временной диапазон анемограммы разбивается на интервалы случайным образом с граничными значениями от 0.1 до 0.7 секунды. Данные

интервалы представляют собой половину периода колебаний мгновенных ветровых пульсаций.

Для создания массива начальных значений реальных скоростей ветровых потоков используется функция генерации случайной равновероятной величины из заданного диапазона граничных условий – к характеристической скорости ветра v_{char} добавляется слагаемое в диапазоне от $-v_{char}/2$ до $+v_{char}$ (границы заданы из цели генерации наихудшей расчетной ситуации, когда будут получены максимальные напряжения в конструкции). Затем формируется список случайных приращений скоростей (ветровых порывов) по Гауссову распределению с математическим ожиданием равным нулю и контролируемым среднеквадратичным отклонением (в первом приближении, на основании статистического анализа реальных анемограмм, принимается равным 3). Суммируя вышеобозначенные компоненты скорости, получаем список реальных скоростей ветрового потока во времени. При получении значений скоростей, не соответствующих заданным максимальным и минимальным ограничениям, данные скорости корректируются путем изменения порядка значения среднеквадратичного отклонения Гауссова распределения при назначении пульсационных приращений.

На основании полученного массива реальных скоростей создается массив квазистатической составляющей скорости по формуле:

$$v_{stat,i} = \frac{v_{stat,i-2} + v_{stat,i-1} + v_{stat,i}}{4} \quad (4.7)$$

Используя полученные для каждого временного интервала значения реальной скорости, ее квазистатической составляющей, а также изначально заданной характеристической скорости ветра формируется синтезированная анемограмма, имеющая вид, представленный на рис. 4.

Для каждого временного интервала находится значение круговой частоты порывов ветра по формуле:

$$\theta_i = \frac{2 \cdot \pi}{2 \cdot t_{int,i}} \quad (4.8)$$

Зная круговые частоты форм собственных колебаний конструкции и мгновенные значения круговой частоты вынуждающей силы, для каждого временного интервала определяется динамический коэффициент по вышеупомянутой формуле.

В роли качественной оценки получившейся расчетной анемogramмы приводятся три максимальных динамических коэффициента по первой и второй формам собственных колебаний (проверка на вхождение в резонансный режим) и соответствующие отношения частот собственных и вынужденных колебаний. На рис. 4.2 приведена блок-схема описанного алгоритма.

По результатам анализа скоростного и частотного спектров ветровых порывов заданного региона были построены анемogramмы (рис. 4.3).

По данным гидрометцентра по Камчатскому краю штормовые ветры повторяются в среднем 2-3 раза в год, скорость порывов ветра может достигать 36 м/с, а постоянная скорость ветра – 28 м/с. Такой ветер может продолжаться на протяжении нескольких часов (до 5 часов) [137].

Динамические напряжения, возникающие в колонне, зависят от двух факторов:

- реальной скорости ветра, увеличивающей статическую составляющую напряжения;
- соотношения частоты ветровых порывов и собственной частоты здания.
- Таким образом, динамическое напряжение может быть определено по формуле:

$$\sigma_d = \sigma_{ст} \cdot \frac{(V_{ст} + V_d \cdot \mu)^2}{V_0^2}, \quad (4.9)$$

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;

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

соотношение круговой частоты ветровых порывов θ и круговой частоты собственных колебаний здания ω .

$\gamma = 0,025$ — коэффициент неупругого сопротивления.

Алгоритм математического моделирования расчетных синтезированных анемограмм

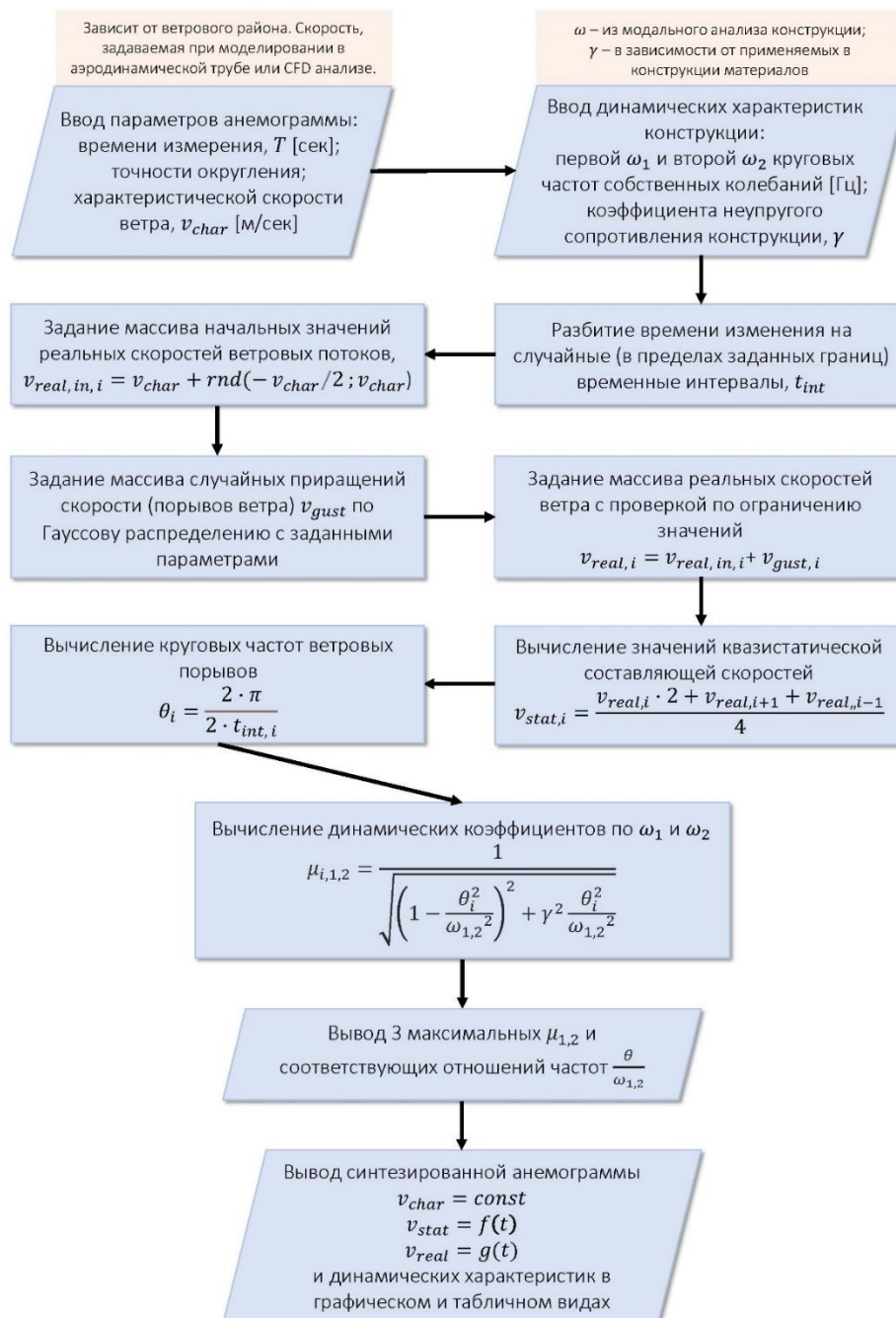
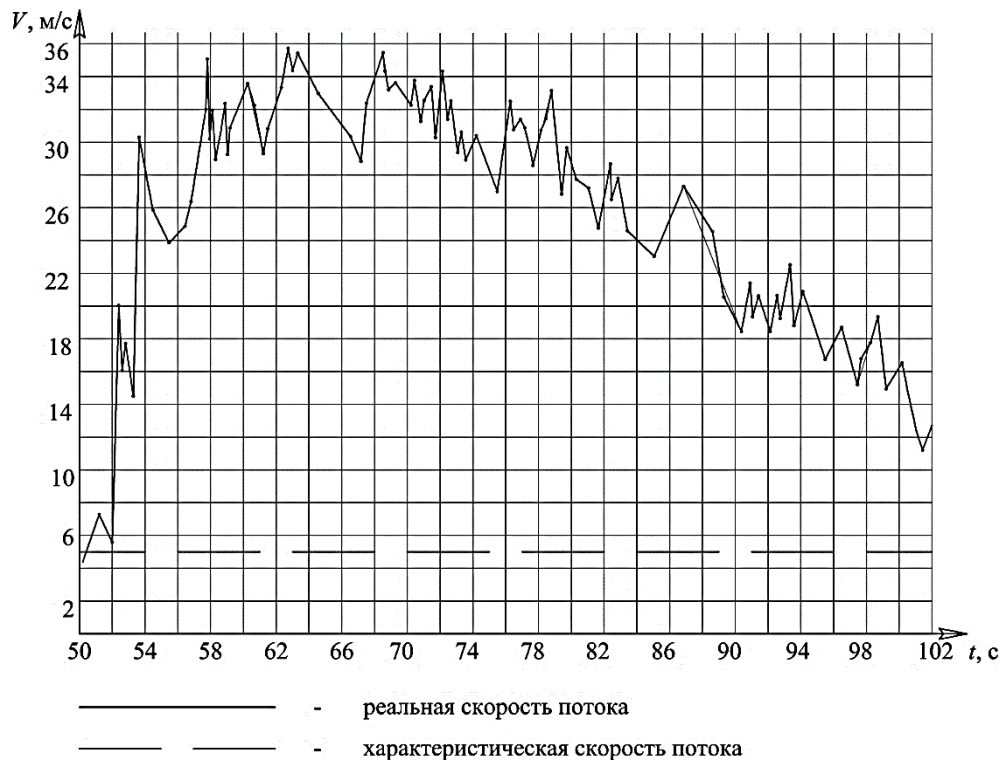


Рис. 4.2. Алгоритм математического моделирования расчетных синтезированных анемограмм



а)



б)

Рис. 4.3. Инструментальная запись изменения скорости ветра во времени

а) спокойного ветра б) штормового ветра

На рис. 4.4 приводится история напряжений, определенная для рис. 4.2 с помощью соотношения (4.9).

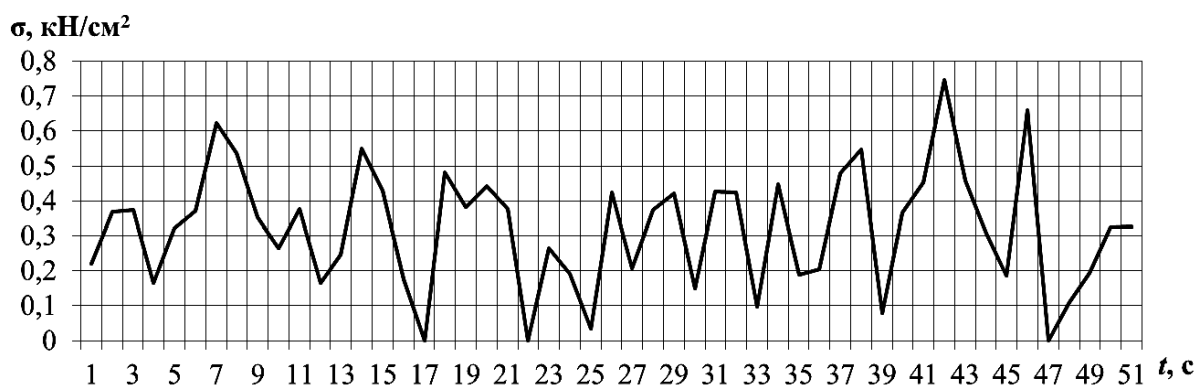


Рис. 4.4. График изменения реальных напряжений

Для определения количества циклов до разрушения может быть использована методика, предложенная в [102], основанная на построении кривой усталости Веллера для стали С440 (рис. 4.5).

По сопоставлению истории напряжений с наибольшим размахом $0,8 \text{ кН/см}^2$ (рис. 4.4) и кривой усталости Веллера, можно сделать вывод, что при действии только характеристической ветровой нагрузки, накопления повреждений в колонне не происходит, несмотря на динамические эффекты, а материал обладает условно-неограниченным ресурсом.

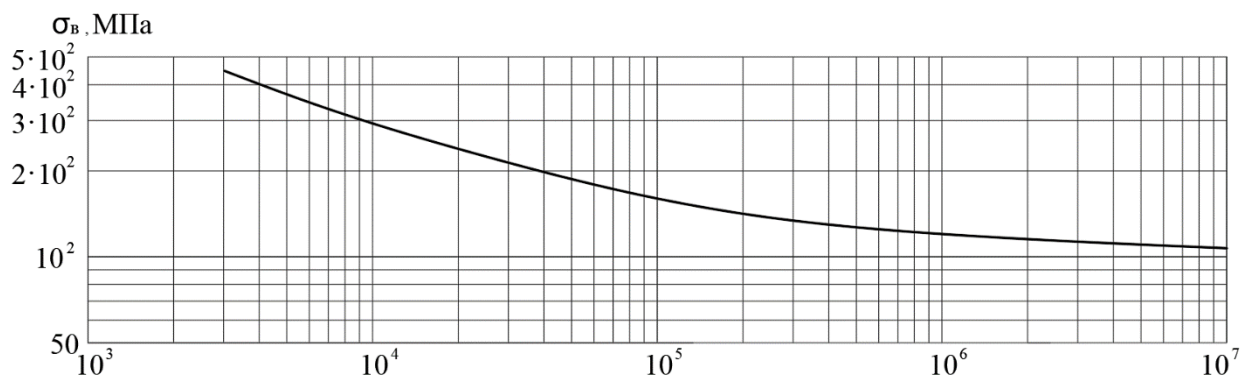


Рис. 4.5. Диаграмма Веллера для углеродистой стали С440 (по оси абсцисс указано число циклов нагружения)

В то же время, в районе строительства наблюдаются частые штормовые ветры со скоростью до 35-40 м/с, что может привести к увеличению коэффициента v . При этом собственная частота здания лежит в диапазоне возможных частот штормовых порывов, в результате чего здание находится в околорезонансной зоне.

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 (рис. 4.6) имеет ряд максимальных значений, каждому из которых будет соответствовать определенно приращение поврежденности. По сопоставлению диаграммы и построенной кривой усталости Веллера, приращение поврежденности за 140 секунд составляет $5,0169 \cdot 10^{-4}$.

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. 4.6). При близости частот приращение поврежденности за время штормового ветра может достичь 0,0376. Иначе говоря, ресурс материала в опасном сечении снижается на 3-4%.

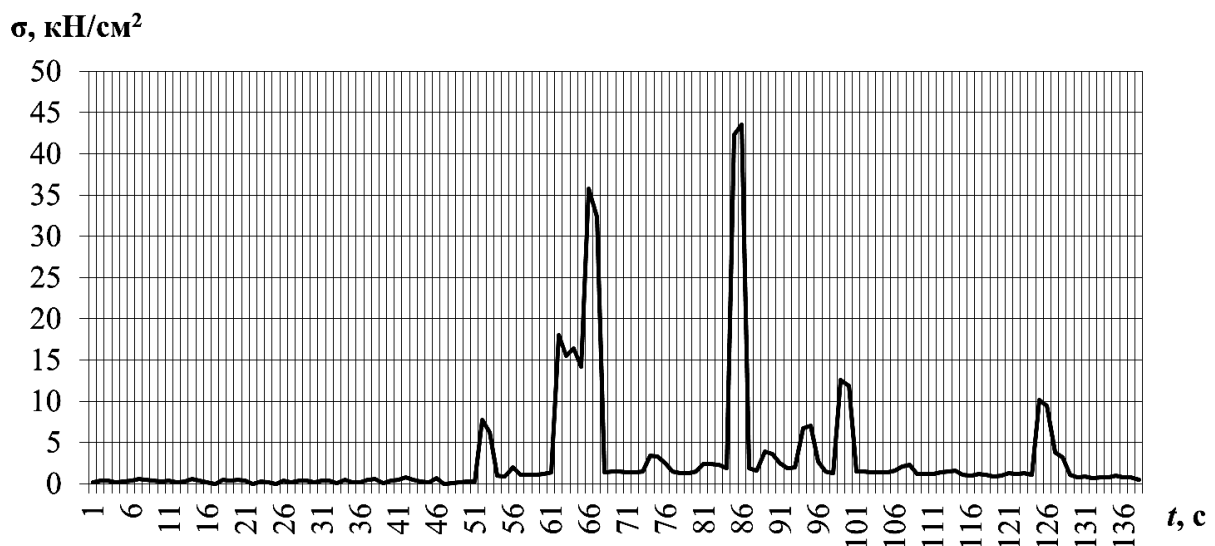


Рис.4.6. График изменения реальных напряжений при штормовых порывах

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).

4.2 Колебания фермы здания с покрытием в виде криволинейной оболочки двоякой кривизны

Для проектируемого здания с покрытием в виде криволинейной оболочки двоякой кривизны, рассмотренного в разделе 2.1 осуществлялось определение частот и форм собственных колебаний с использованием ранее предложенной методики с применением двух видов расчетных схем [155]:

- точная схема с сосредоточением масс в каждый узел верхнего пояса фермы (23 степени свободы) (рис. 4.7.а);
- упрощенная схема с сосредоточением масс через 2 узла верхнего пояса (8 степеней свободы) (рис. 4.7.б).

При этом анализировалось 2 распределения масс – с учетом снеговой нагрузки для холодного времени года и без учета для теплого времени года.

Собственные колебания системы с n степенями свободы описываются системой уравнений (4.2).

- На рис. 4.8 показана схема определения удельных перемещений δ_{ij} , входящих в систему уравнений (4.2).

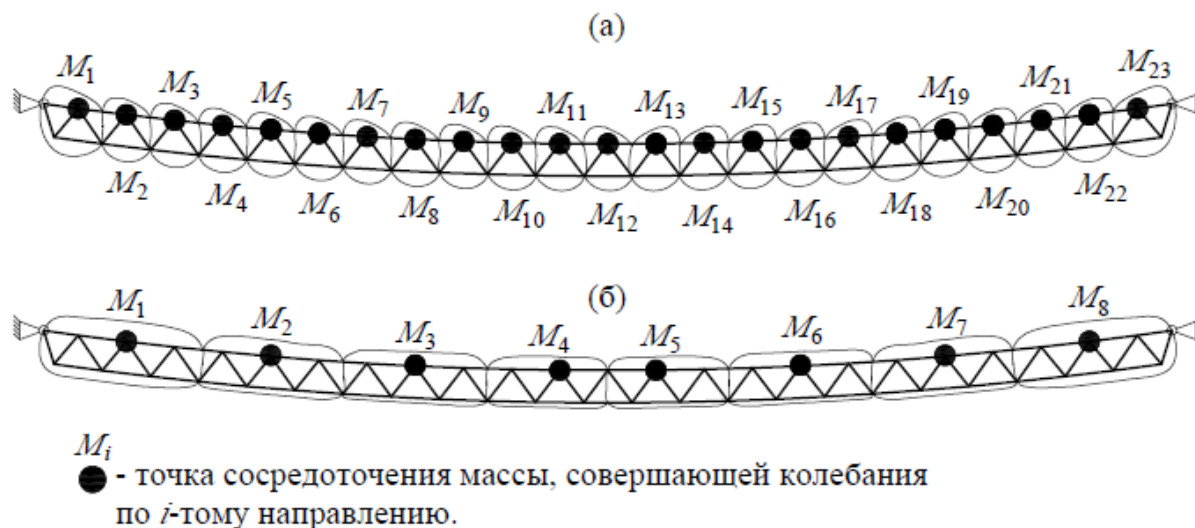


Рис. 4.7 Схема фермы с приложенными массами: а) точная схема с 23 массами; б) упрощенная схема с 8 массами

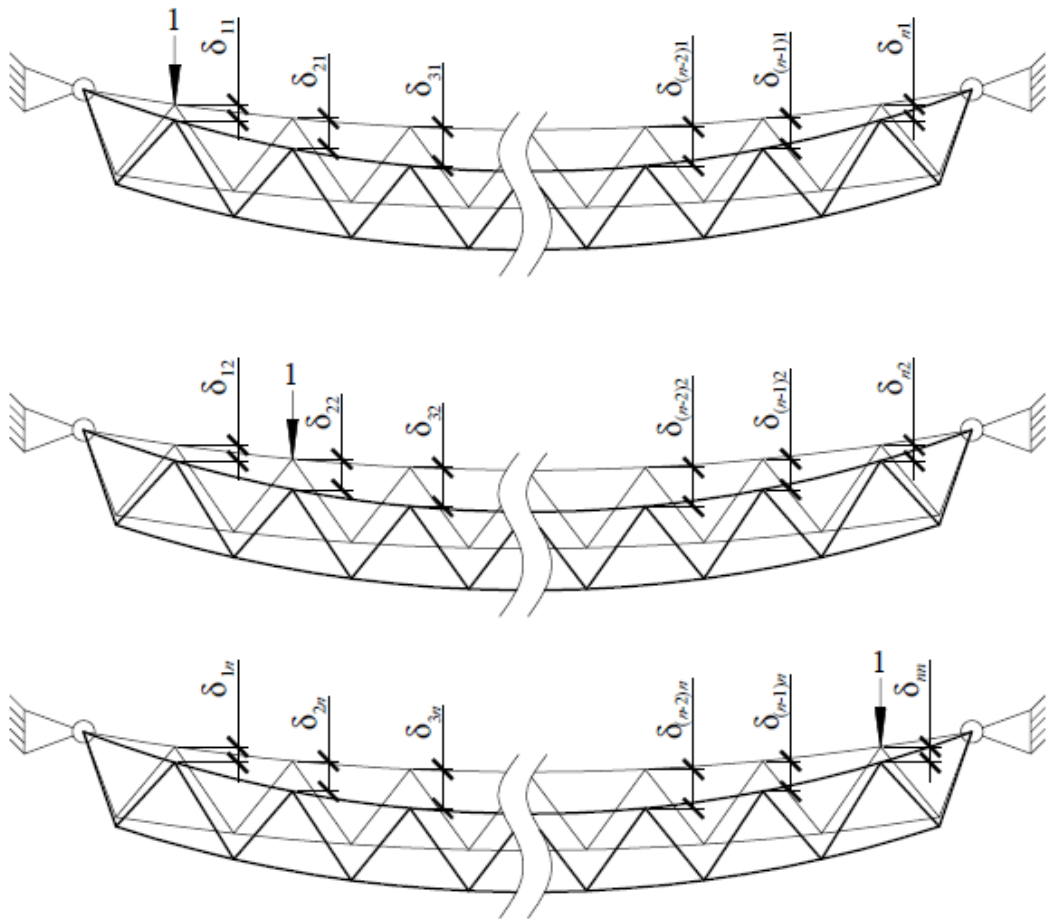


Рис. 4.8. Схема к определению удельных перемещения точек сосредоточения

В соответствии с методикой, описанной в разделе 4.1, после раскрытия определителя (4.3) были получены значения трех собственных частот и построены соответствующие им формы колебаний (рис. 4.9). Результаты расчетов частот и форм собственных колебаний и их сравнение для двух типов расчетных схем, приведены в таблице 4.2. Для инженерной оценки первой частоты собственных колебаний, имеющей наиболее важное прикладное значение, может быть предложен метод эквивалентной массы, когда система с n степенями свободы заменяется одномассовой системой (рис. 4.10). Основная трудность при этом возникает при определении эквивалентной массы $M_{\text{экв}}$.

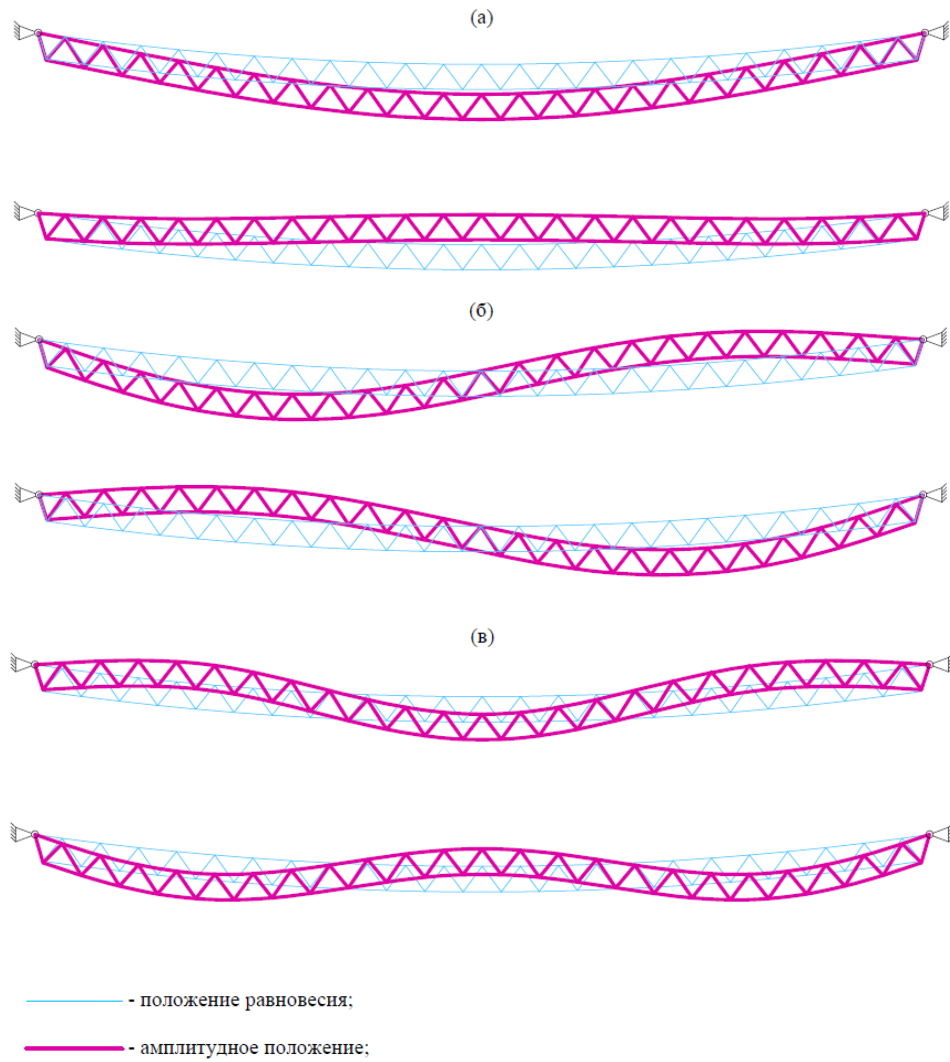


Рис. 4.9. Формы колебаний стальной большепролетной фермы

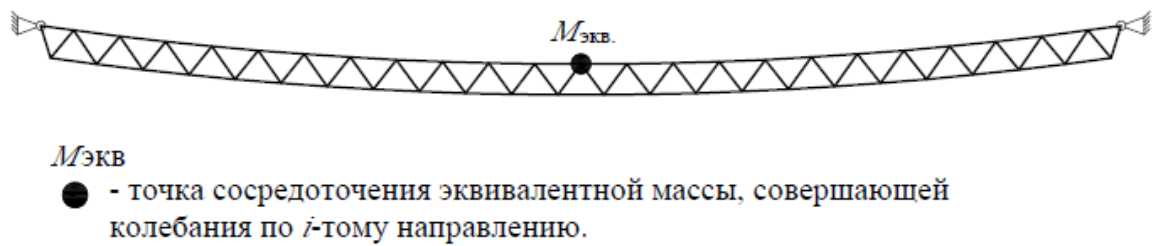
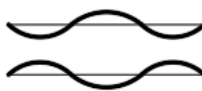


Рис. 4.10. Приведение расчетной схемы фермы к одномассовой системе

По определенному описанным выше способом численному значению первой частоты может быть проведена оценка значения эквивалентной массы.

Таблица 4.2

Результаты определения частот и форм собственных колебаний

Пар-р	Сочетание 1		
	упрощенная схема точная схема		(погрешность)
	Iформа собственных колебаний	IIформа собственных колебаний	IIIформа собственных колебаний
ω (рад/с)	$\frac{7,8105}{7,8304}$ (<0,5%)	$\frac{10,6041}{10,5562}$ (<0,5%)	$\frac{22,5651}{22,9483}$ (1,7%)
f (Гц)	$\frac{1,243}{1,246}$ (<0,5%)	$\frac{1,688}{1,680}$ (<0,5%)	$\frac{3,591}{3,652}$ (1,7%)
T (с)	$\frac{0,804}{0,802}$ (<0,5%)	$\frac{0,593}{0,595}$ (<0,5%)	$\frac{0,278}{0,274}$ (1,4%)
Форма			
Пар-р	Сочетание 2		
	упрощенная схема точная схема		(погрешность)
	Iформа собственных колебаний	IIформа собственных колебаний	IIIформа собственных колебаний
ω (рад/с)	$\frac{4,4209}{4,4322}$ (1,1%)	$\frac{6,0022}{5,9751}$ (<0,5%)	$\frac{12,7725}{12,9894}$ (1,7%)
f (Гц)	$\frac{0,704}{0,705}$ (<0,5%)	$\frac{0,955}{0,951}$ (<0,5%)	$\frac{2,033}{2,067}$ (1,6%)
T (с)	$\frac{1,421}{1,418}$ (<0,5%)	$\frac{1,047}{1,052}$ (<0,5%)	$\frac{0,492}{0,484}$ (1,6%)
Форма			
Принятые обозначения: ω – круговая частота собственных колебаний; f – частота собственных колебаний; T – период собственных колебаний.			

Для системы с одной степенью свободы круговая частота собственных колебаний определяется по следующей формуле:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{\delta_{11} M_{\text{ЭКВ}}}}, \quad (4.10)$$

откуда величина эквивалентной массы:

$$M_{\text{эkv}} = \frac{1}{\omega^2 \delta_{11}}. \quad (4.11)$$

По определенным ранее значениям первых частот при первом и втором сочетании масс (7,8105 и 4,4209 рад/с соответственно) были найдены эквивалентные массы для каждого случая:

$$M_{\text{эkv}}^I = 0,4090 M_{\Sigma}^I, \quad (4.12)$$

$$M_{\text{эkv}}^{II} = 0,4089 M_{\Sigma}^{II}, \quad (4.13)$$

где $M_{\Sigma}^I, M_{\Sigma}^{II}$ - сумма всех масс, сосредоточенных в узлах фермы, при первом и втором сочетаниях, соответственно.

Таким образом, для оценки первой собственной частоты изучаемой конструкции при любом равномерном распределении масс может быть использована формула:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{\delta_{11} 0,41 M_{\Sigma}}}, \quad (4.14)$$

где ω_1 - первая собственная частота системы;

M_{Σ} - сумма всех масс, сосредоточенных в узлах фермы, при изучаемом сочетании.

В результате проведенного расчета параметров собственных колебаний для двух сочетаний нагрузок по различным схемам были получены результаты, которые имеют малое расхождение (не более 2%). Это позволяет говорить о пригодности к использованию при проведении динамических расчетов и резонансного анализа упрощенной расчетной схемы, работа с которой является значительно менее трудоемкой, чем с точной схемой. Полученная формула оценки первой собственной частоты конструкции является более удобной для практических инженерных расчетов, чем системы уравнений с большим числом неизвестных, а также универсальна для различных видов нагрузок [155].

По данным гидрометцентра был произведен анализ изменения скоростного и частотного спектра ветровых порывов, на основании чего были построены синтезированные анемограммы для спокойного и штормового ветров.

Для определения количества циклов до разрушения может быть использована методика, основанная на построении кривой усталости Веллера [68] для стали 09Г2С (рис. 4.11).

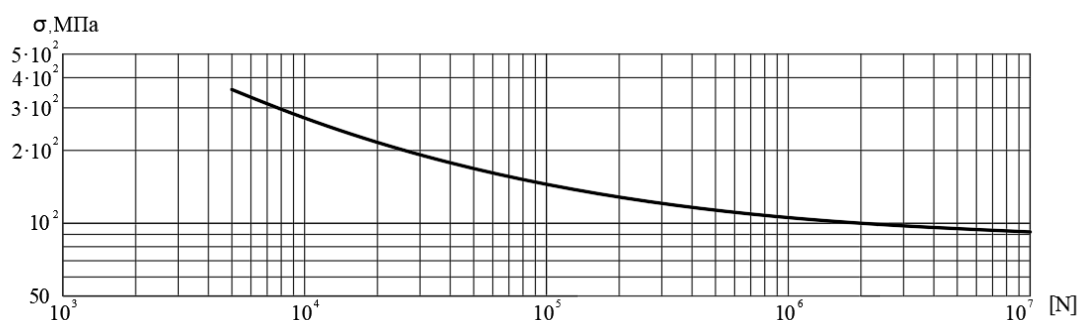


Рис. 4.11. Диаграмма Веллера для углеродистой стали 09Г2С. [N] – количество циклов до разрушения при размахе напряжений σ_B .

По сопоставлению истории напряжений от спокойных ветровых воздействий с наибольшим размахом 5,2 кН/см² и кривой усталости Веллера, можно сделать вывод, что при действии только характеристической ветровой нагрузки, накопления повреждений конструкциях фермы не происходит, несмотря на динамические эффекты, а материал обладает условно неограниченным ресурсом.

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 (рис. 4.12) имеет ряд максимальных значений, каждому из которых будет соответствовать определенно приращение поврежденности. По сопоставлению диаграммы и построенной кривой усталости Веллера, приращение поврежденности в поясах является незначительным, а в раскосе за 26 секунд составляет $1,01 \cdot 10^{-4}$.

Такой ветер может продолжаться на протяжении нескольких часов. За это время происходит примерно 50 циклов. При близости частот приращение поврежденности за время штормового ветра может достичь 0,0057, что составляет менее 1 % ресурса конструкции. В рассматриваемом регионе штормовые ветра являются редким явлением, поэтому влияние динамических ветровых нагрузок практически не сказывается на ресурсе рассматриваемой конструкции.

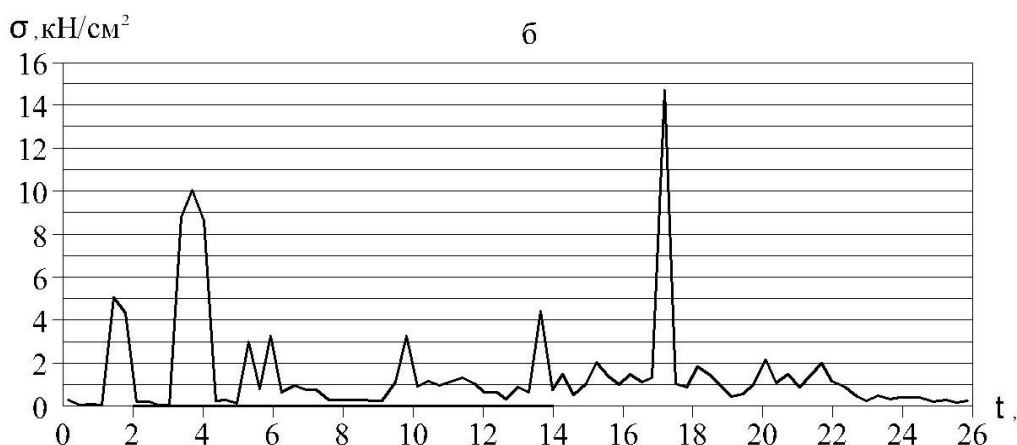


Рис. 4.12 График изменения реальных напряжений при штормовых порывах в нижнем поясе фермы

В то же время при динамических воздействиях, в следствии колебаний конструкций в местах и элементах соединений возникает эффект трениях скольжения, которое необходимо контролировать и уменьшать для снижения износа материалов болтовых соединений.

4.3 Резонансный анализ здания аквапарка с учетом податливости основания

В рамках исследований осуществлялся резонансный анализ двух конструктивных схем проектируемого здания аквапарка в г. Нижний Новгород [155] (рис. 4.13): схема с жестким защемлением колонн (рис. 4.14а) и с учетом податливости основания (рис. 4.14б). Рассматриваемый объект имеет монолитный железобетонный каркас: вертикальные колонны сечением 500×500 мм, диафрагмы жесткости, перекрытия толщиной 250 мм. Пространственная конечно-элементная модель здания задавалась в программно-вычислительном комплексе *SCAD*.

На первоначальном этапе расчета была определена частота собственных колебаний здания:

- без учета податливости основания - $\omega = 18,44$ рад/с;
- с учетом податливости основания - $\omega = 7,64$ рад/с.

Расчет напряжений сжатой зоны бетона в наиболее опасном сечении колонны проводился при характеристическом значении скорости ветра, равном 3 м/с.

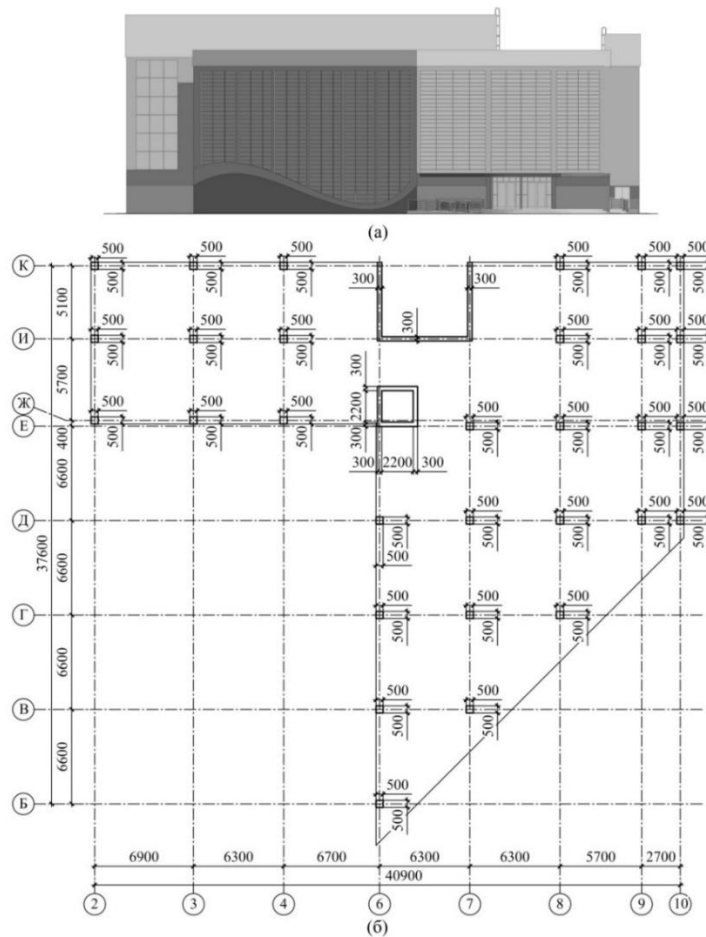


Рис. 4.13. Проектируемое здание аквапарка: а) фасад; б) план расположения несущих конструкций

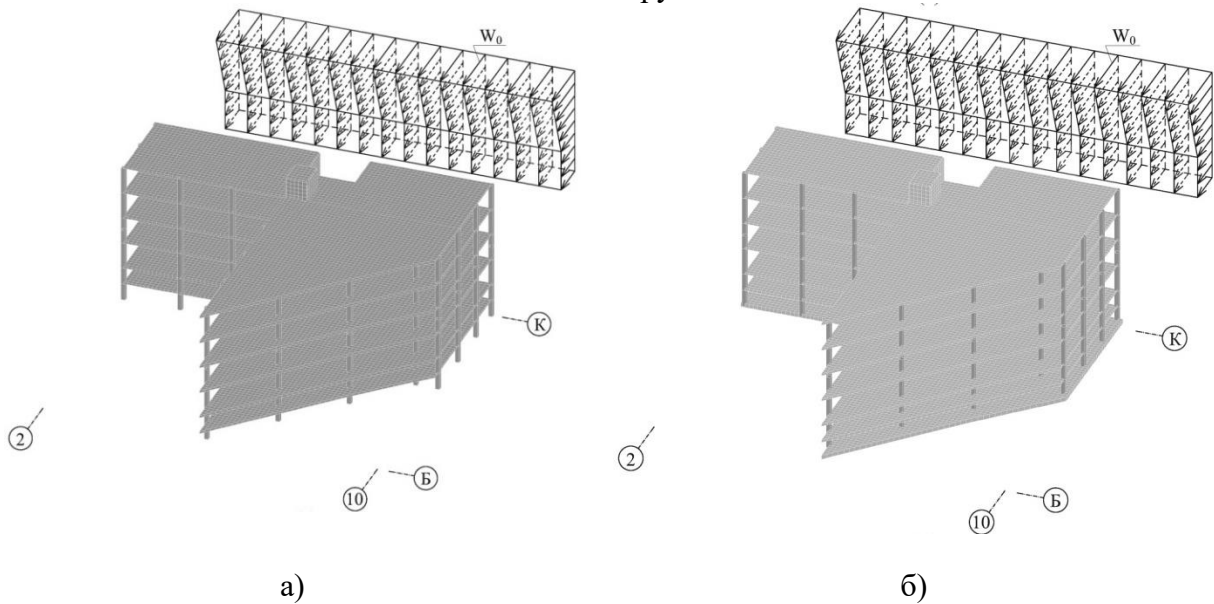


Рис. 4.14. Расчетная схема здания: а) без учета упругого основания; б) с учетом упругого основания (W_0 – характеристическое значение ветрового давления)

По данным гидрометцентра был произведен анализ скоростного и частотного спектров ветровых порывов в Нижнем Новгороде. На основании этих данных были построены синтезированные анемограммы для спокойного (рис. 4.15а) и

штормового (рис. 4.15б) ветров. На рисунках 4.16 и 4.17 показаны истории напряжений в сжатой зоне бетона изучаемой колонны, определенные с помощью рис. 4.15 по формуле (4.6).

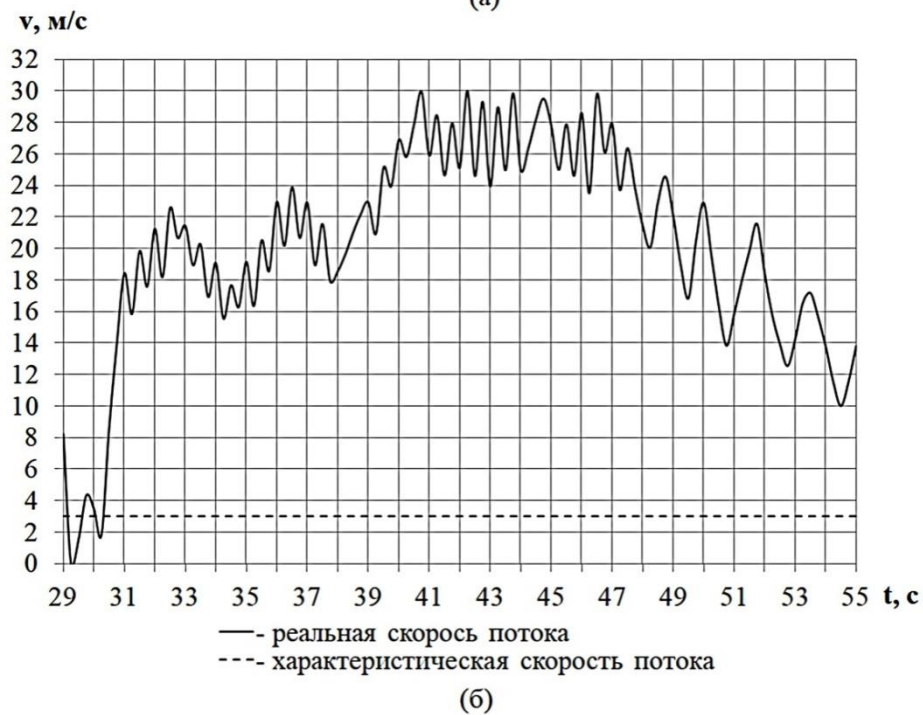
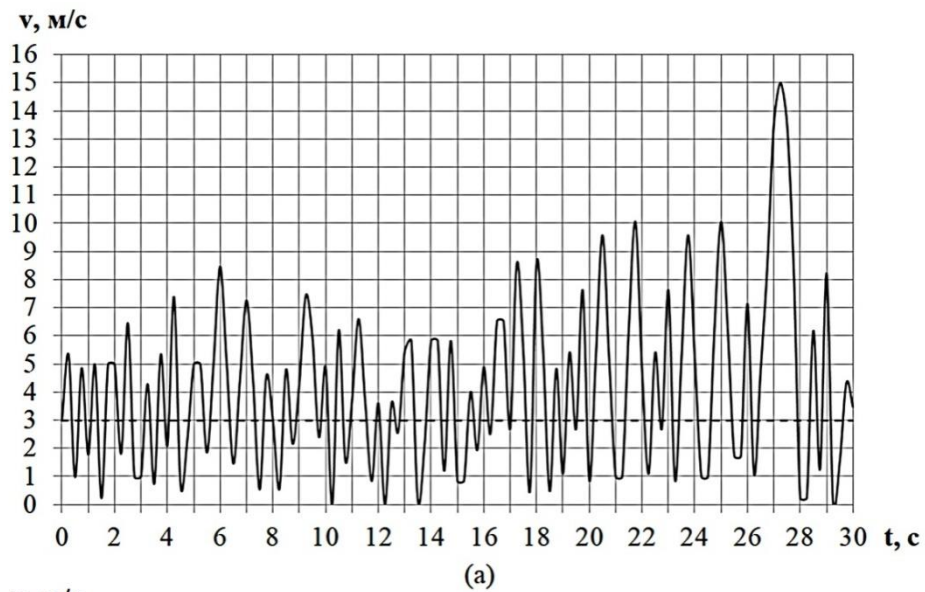


Рис. 4.15. Синтезированные анемограммы а) ветровой, б) штормовой нагрузок для г. Н. Новгорода

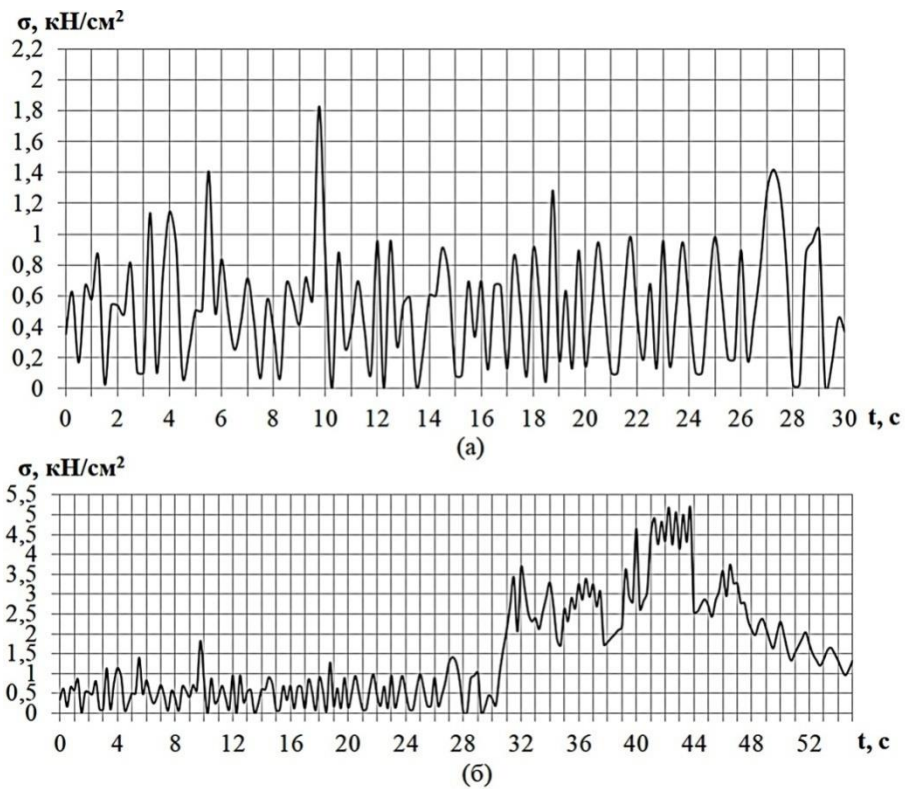


Рис. 4.16. История напряжений в опасном сечении колонны для здания с жестким защемлением: а) при спокойном ветре; б) при штормовом ветре (первая конструктивная схема)

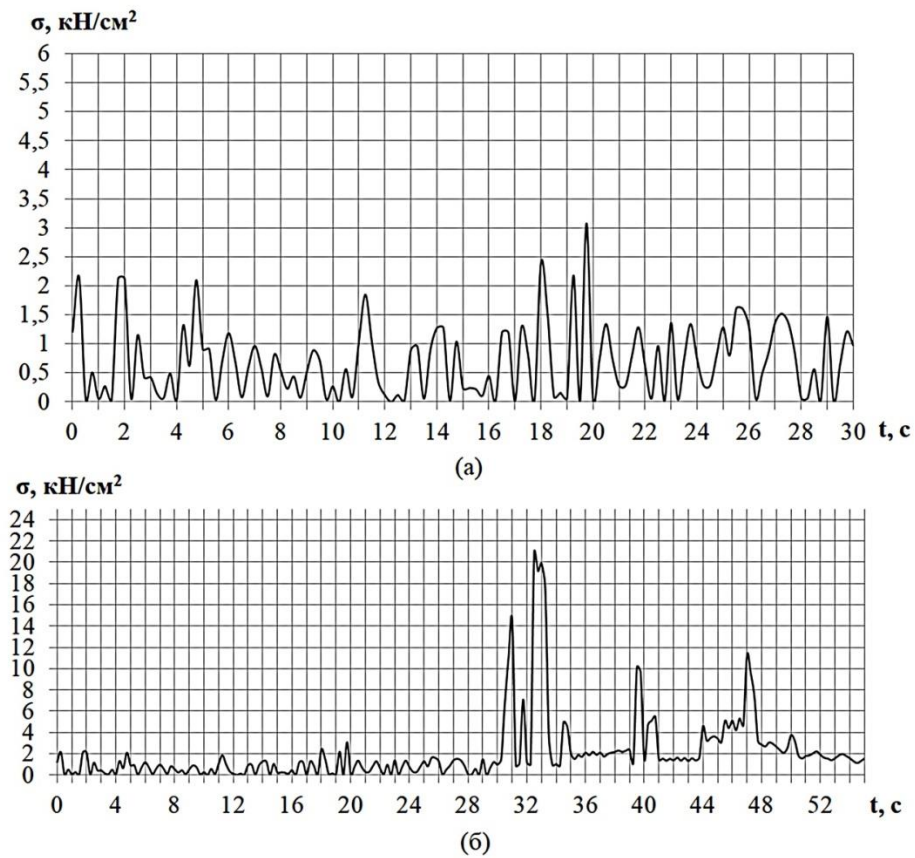


Рис. 4.17. История напряжений в опасном сечении колонны для здания с податливым основанием: а) при спокойном ветре; б) при штормовом ветре (первая конструктивная схема)

Для конструктивной схемы здания с жестким защемлением колонн максимальное напряжение, возникающее в сжатой зоне бетона от ветровой нагрузки, составляет $1,83 \text{ кН/см}^2$, при штормовых порывах оно увеличивается до $5,19 \text{ кН/см}^2$. При учете податливости основания максимальные напряжения, возникающие от ветровой и штормовой нагрузок, соответственно равны $3,08 \text{ кН/см}^2$ и $20,94 \text{ кН/см}^2$.

Для увеличения несущей способности каркаса здания были введены дополнительные несущие элементы – монолитные железобетонные стены в осях 2/Ж-К, 2-6/Ж, 7-10/Ж и 10/Д-К (рис. 4.18). Расчет также выполнен для схемы с жестким защемлением колонн и схемы с податливым основанием.

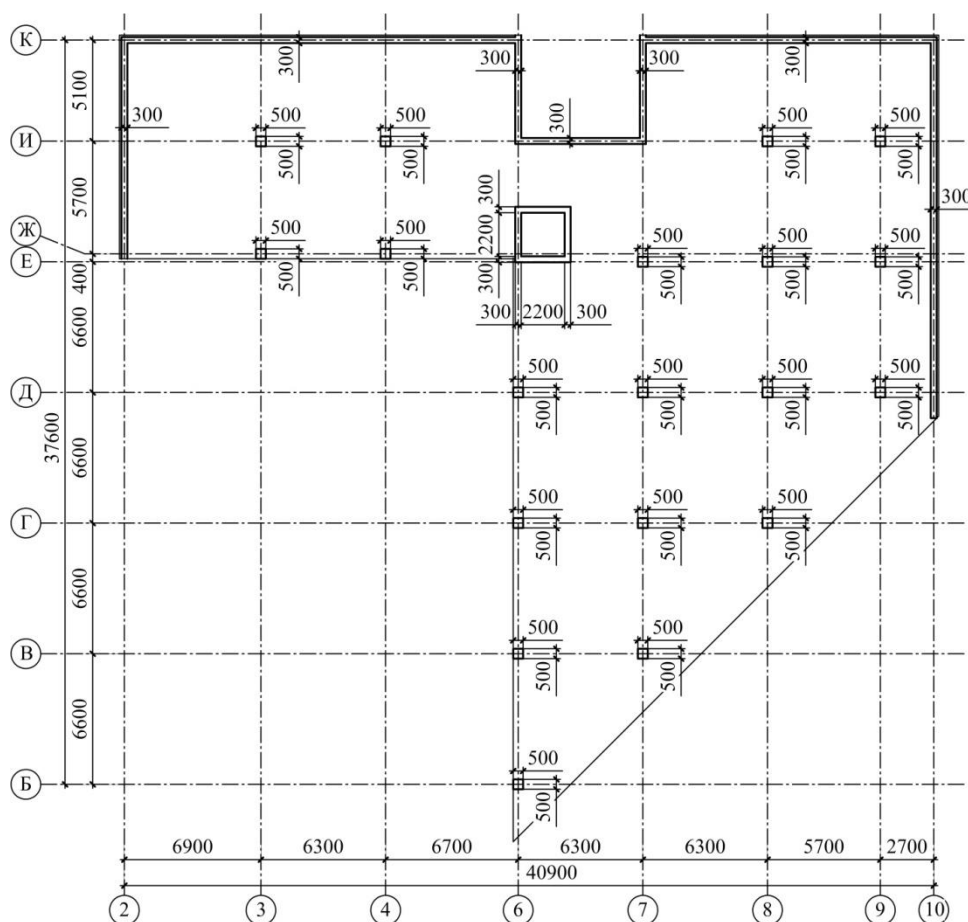


Рис. 4.18. План здания с введенными монолитными железобетонными стенами

По результатам расчета круговая частота собственных колебаний второй конструктивной схемы составила:

- для схемы без учета податливости основания - $\omega = 34,96 \text{ рад/с}$;
- для схемы с учетом податливости основания - $\omega = 10,8 \text{ рад/с}$.

При увеличении прочности каркаса для здания с жестким защемлением колонн произошло уменьшение динамических напряжений при спокойном (рис. 4.19а) и штормовом (рис. 4.19б) ветре, при этом прочность колонны при штормовом ветре по-прежнему не обеспечивается.

Для конструктивной схемы здания на упругом основании произошло резкое увеличение максимального значения и числа скачков напряжений (рис. 4.20). Такой результат обусловлен тем, что круговая частота собственных колебаний здания на податливом основании, равная $\omega = 10,8$ рад/с, близка к круговым частотам ветровых порывов - здание находится в околорезонансной зоне. В результате происходит резкое увеличение динамических напряжений в наиболее опасном сечении конструкции.

Итоговые результаты резонансного анализа для двух конструктивных схем здания с различными граничными условиями представлены в таблице 4.3. Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что увеличение прочности каркаса здания, влекущее изменение жесткости, не всегда является гарантией увеличения несущей способности при динамических воздействиях [155].

Таблица 4.3

Результаты определения частот и форм собственных колебаний

Параметр	Конструктивная схема без монолитных стен		Конструктивная схема с монолитными стенами	
	Жесткое защемление	Упругое основание	Жесткое защемление	Упругое основание
ω (рад/с)	18,44	7,64	34,96	10,8
f (Гц)	2,93	1,22	5,56	1,72
T (с)	0,34	0,82	0,18	0,58
σ_d^{max} , спокойный ветер (кН/см ²)	1,83	3,08	1,39	5,56
штормовой ветер	5,19	20,94	3,2	22,3
Принятые обозначения: ω – круговая частота собственных колебаний, f – техническая частота собственных колебаний, T – период собственных колебаний, σ_d^{max} – максимальное динамическое напряжение в бетоне сжатой зоны изучаемой колонны				

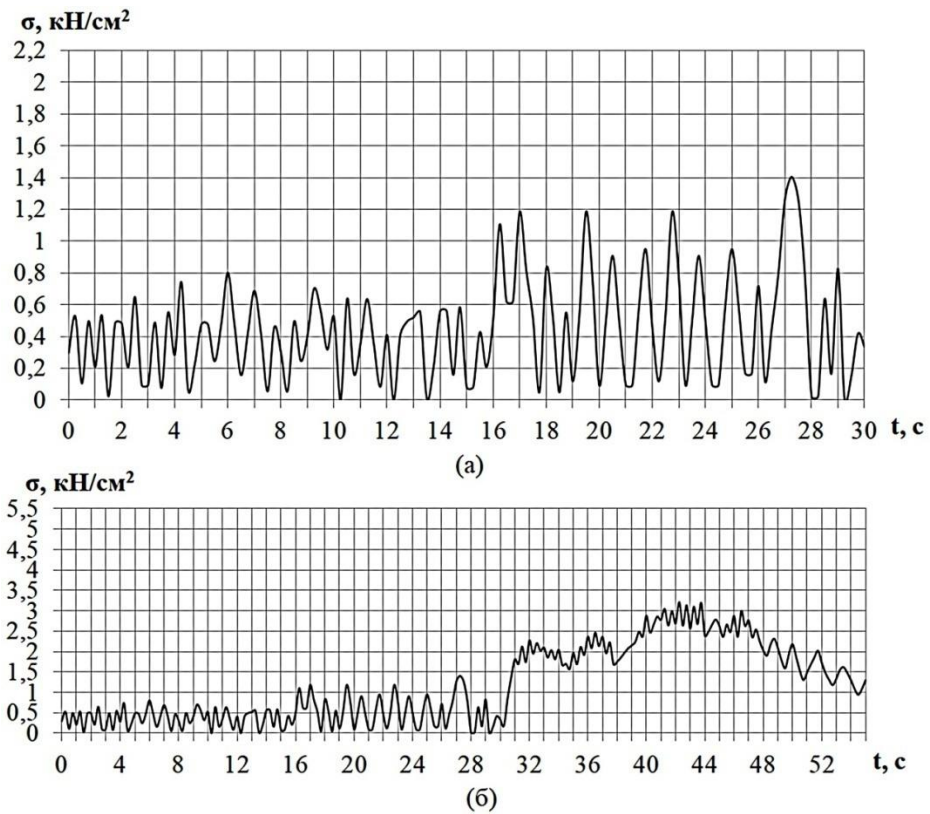


Рис. 4.19. История напряжений в опасном сечении колонны для здания с жестким защемлением колонн: а) при спокойном ветре; б) при штормовом ветре (вторая конструктивная схема)

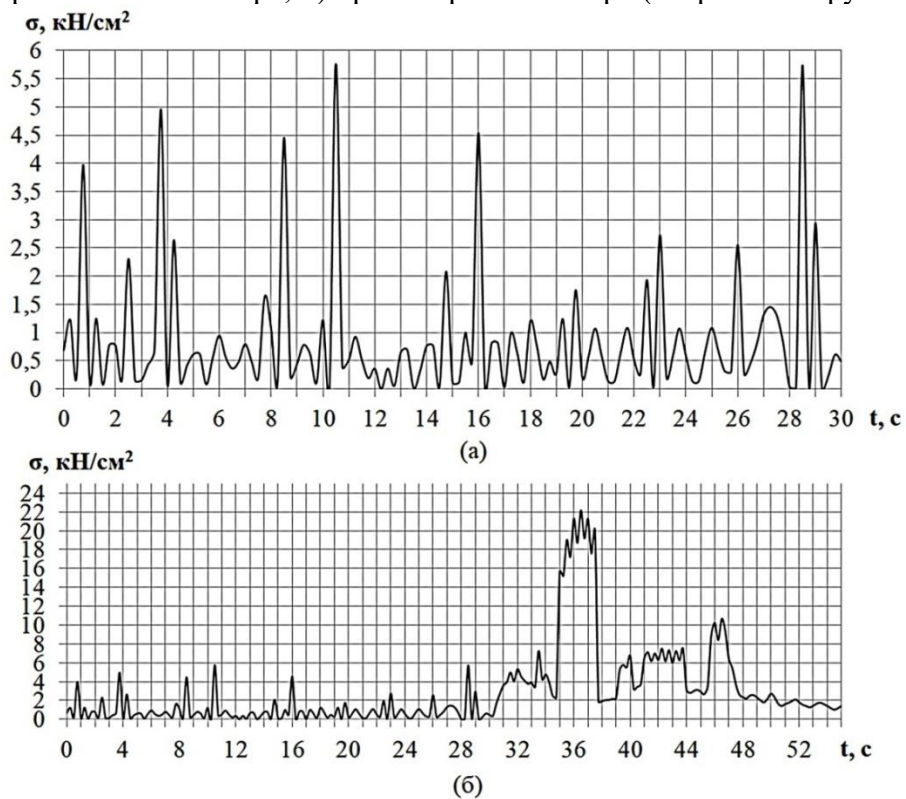


Рис. 4.20. История напряжений в опасном сечении колонны для здания с податливым основанием: а) при спокойном ветре; б) при штормовом ветре (вторая конструктивная схема)

4.4 Анализ сейсмостойкости уникального высотного здания

Теория сейсмостойкости в связи с активизацией уникального строительства получает в последние годы новый стимул для своего развития. Повышенный уровень ответственности проектируемых объектов, сложные объемно-планировочные решения, как правило, не применяемые ранее в сейсмоопасных районах, требуют от инженеров новых смелых технических решений.

В рамках исследований приводился анализ сейсмостойкости уникального здания высотой 218 м (рис. 4.21), проектируемого в городе Владивосток на максимальное расчетное землетрясение [76]. Основными несущими конструкциями являются стальные двутавровые колонны, соединенные системой балок с монолитным железобетонным ядром жесткости. Междуэтажные перекрытия и покрытия выполнены в монолитном железобетоне по несъемной опалубке из стального профилированного настила. В конструктивную схему здания для обеспечения пространственной жесткости введены аутригерные этажи. Несущие конструкции опираются на монолитную фундаментную плиту.



Рис. 4.21. Проектируемое высотное здание

Согласно действующим нормативным документам при проектировании могут учитываться проектное землетрясение (период повторяемости – 1 раз в 100 лет) и максимальное расчетное землетрясение (период повторяемости – 1 раз в 1000 лет). Расчет на ПЗ ведется по картам ОСР-А, В [136], при этом расчетная модель

здания, а также принимаемые предельные состояния не отличаются от используемых при основных сочетаниях нагрузок. При расчете на МРЗ модель здания может допускать серьезные повреждения второстепенных конструкций, могут не выполняться проверки по второй группе предельных состояний, если данные отклонения не угрожают жизни и здоровью людей. Также могут игнорироваться предельные состояния первой группы, если это не приведет к непосредственному обрушению здания во время землетрясения: допускаются серьезные трещины, пластические шарниры, разрушения выключающихся связей, пластические деформации несущих элементов и пр. При этом конструкции, которые могут быть подвержены описанным воздействиям, должны проходить обязательную проверку расчетом.

После любого землетрясения средней или высокой интенсивности здание должно проходить динамическую паспортизацию, позволяющую уточнить его текущие динамические характеристики и готовность к эксплуатации.

В результате данной процедуры может быть сделано 4 принципиальных вывода:

- 1) здание может эксплуатироваться без внесения каких-либо изменений в конструкции;
- 2) здание находится в аварийном состоянии, но работы по восстановлению могут быть проведены в плановом порядке без эвакуации людей;
- 3) здание находится в аварийном состоянии, работы по восстановлению могут быть проведены при обязательной эвакуации людей;
- 4) здание находится в аварийном состоянии и подлежит сносу.

Для анализа сейсмостойкости был выполнен расчет конечно-элементной модели здания (рис. 4.22) на собственные и сейсмические колебания.

При проектировании с учетом ПЗ могут быть допущены пункты 1, 2 и, в исключительных случаях, 3. При расчете на МРЗ допустимы все пункты, хотя пункты 1 и 2 являются маловероятными.

Несущие конструкции здания и фундаментная плита были замоделированы в ПБК *SCAD Office*, а грунтовые условия строительной площадки в программе-

сателлите *КРОСС*. Данная механическая система имеет большое число степеней свободы, при этом преобладающими будут являться изгибные колебания, соответствующие первой и второй формам. Динамические характеристики здания определены согласно методике, изложенной в разделе 4.1 по упрощенной схеме. Сейсмическая нагрузка определялась спектральным методом согласно [136]. Динамические характеристики, формы собственных колебаний, а также сейсмические нагрузки приведены в таблице 4.4.

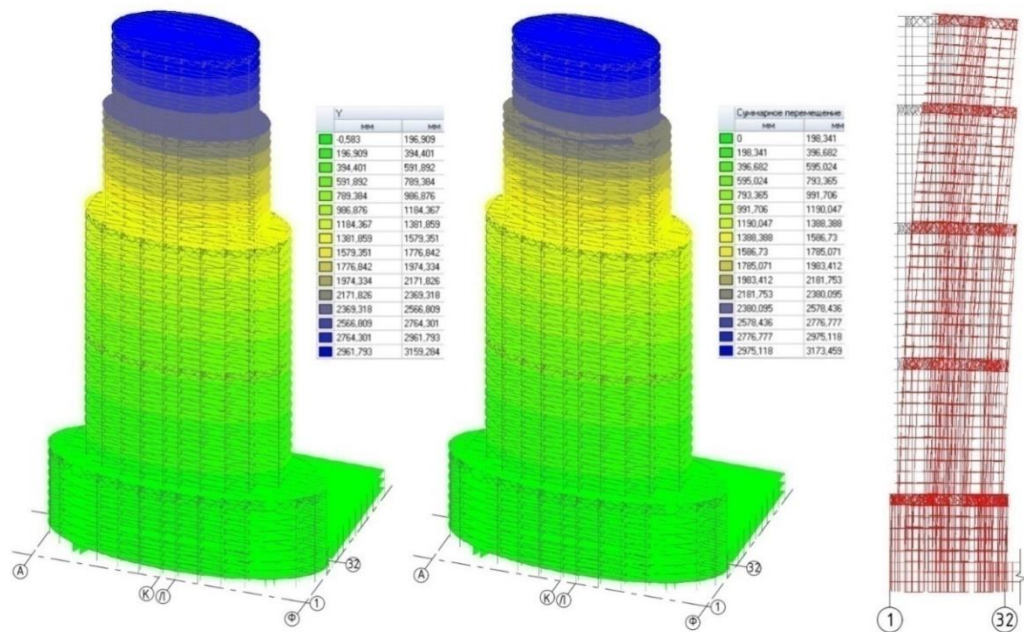


Рис. 4.22. Расчетная модель проектируемого здания

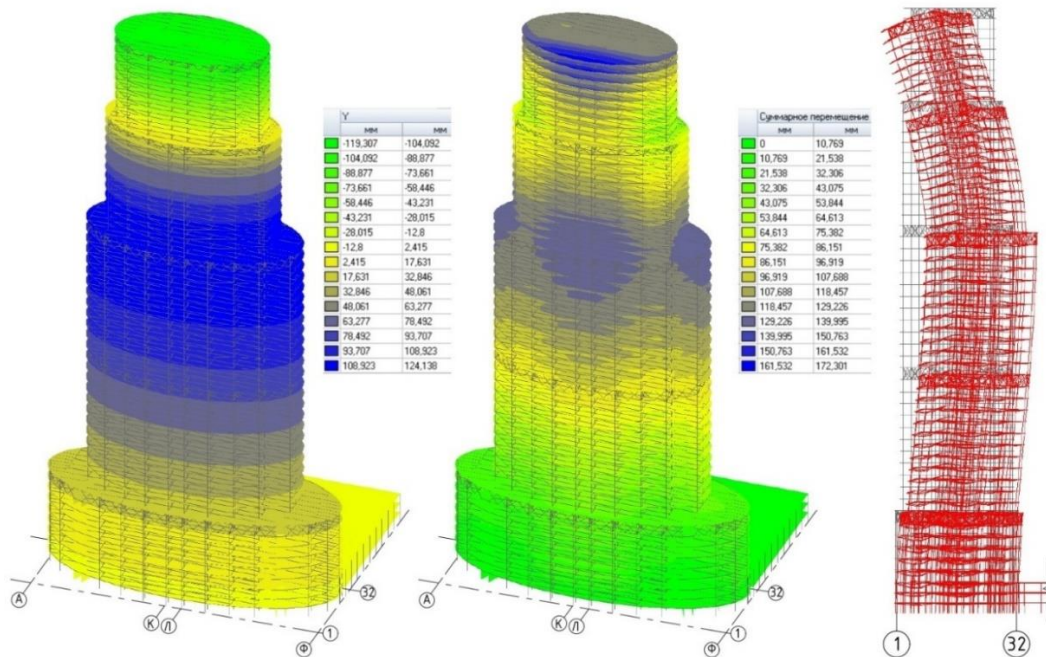
Анализ напряженно-деформированного состояния при сейсмических воздействиях показал, что прочность наземных несущих конструкций – колонн, плит перекрытий и покрытия, ядра жесткости – обеспечивается, что соответствует требованиям к расчету на МРЗ.

Максимальные горизонтальные перемещения здания (рис.4.23) при околорезонансных частотах по первой форме собственных колебаний составляют порядка 3 м и выходят за границы, установленные для второго предельного состояния, что, тем не менее, не противоречит требованиям при расчете на МРЗ.

Наибольшие повреждения при МРЗ получит монолитная фундаментная плита, результаты расчета которой приведены на рисунке 4.24. Анализ показывает, что в плите при полном совпадении частот могут возникать местные отрывы, не приводящие к обрушению здания.



а)

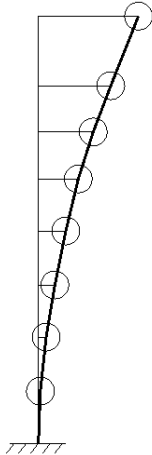
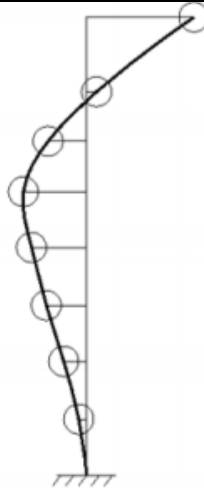


б)

Рис. 4.23. Горизонтальные и суммарные перемещения здания (мм) от сейсмических воздействий, схема деформаций во время землетрясения: а) первая форма собственных колебаний; б) вторая форма собственных колебаний

Также в арматуре плиты возникают локальные зоны, в которых напряжения в арматуре превысят предел текучести стали, что приведет к незначительным пластическим деформациям.

Формы собственных колебаний

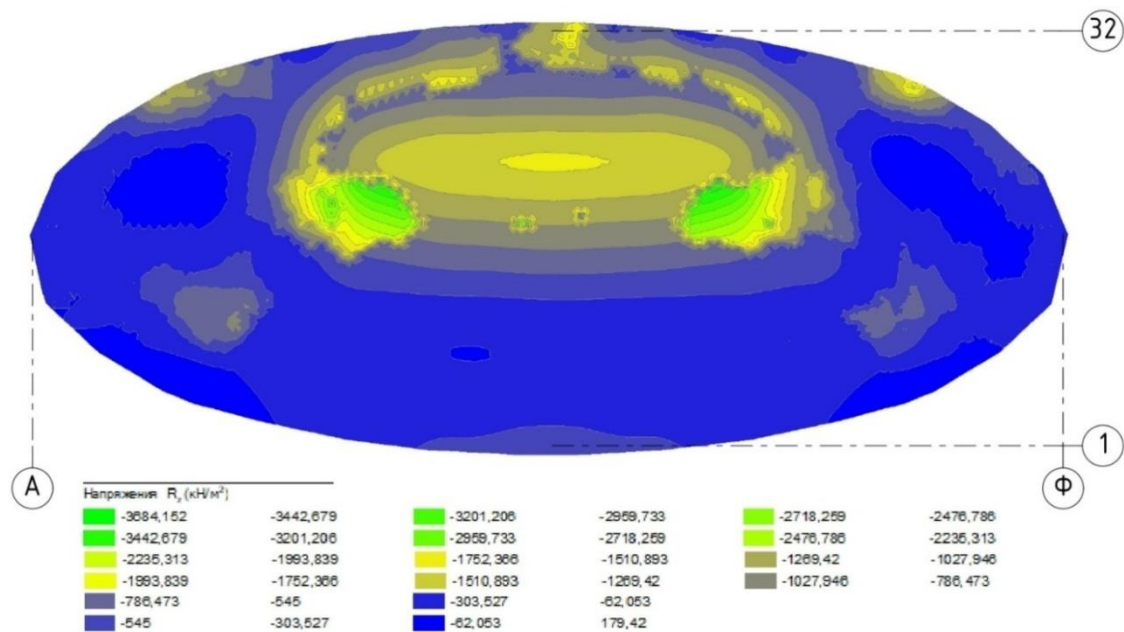
Форма собственных колебаний 1			
$\omega_1, \text{рад/сек}$	$f_1, \text{сек}^{-1}$	$T_1, \text{сек}$	$S_{i1}, \text{кН}$
1,39263	0,22176	4,509	
$\varphi_{11} = 1$			$S_{11} = 71759,4$
$\varphi_{21} = 0,724$			$S_{21} = 71234,4$
$\varphi_{31} = 0,549$			$S_{31} = 53925,7$
$\varphi_{41} = 0,400$			$S_{41} = 51124,7$
$\varphi_{51} = 0,276$			$S_{51} = 36074,6$
$\varphi_{61} = 0,167$			$S_{61} = 21858,8$
$\varphi_{71} = 0,080$			$S_{71} = 10470,8$
$\varphi_{81} = 0,022$			$S_{81} = 71759,39$
Форма собственных колебаний 2			
$\omega_2, \text{рад/сек}$	$f_2, \text{сек}^{-1}$	$T_2, \text{сек}$	$S_{i2}, \text{кН}$
4,699	0,748	1,336	
$\varphi_{12} = 1$			$S_{12} = -56158,4$
$\varphi_{22} = 0,094$			$S_{22} = -7230,95$
$\varphi_{32} = -0,357$			$S_{32} = 27409,21$
$\varphi_{42} = -0,586$			$S_{42} = 58655,85$
$\varphi_{52} = -0,512$			$S_{52} = 52315,18$
$\varphi_{62} = -0,374$			$S_{62} = 38214,6$
$\varphi_{72} = -0,212$			$S_{72} = 21661,75$
$\varphi_{82} = -0,072$			$S_{82} = 12788,57$

Общий анализ сейсмостойкости здания показал, что:

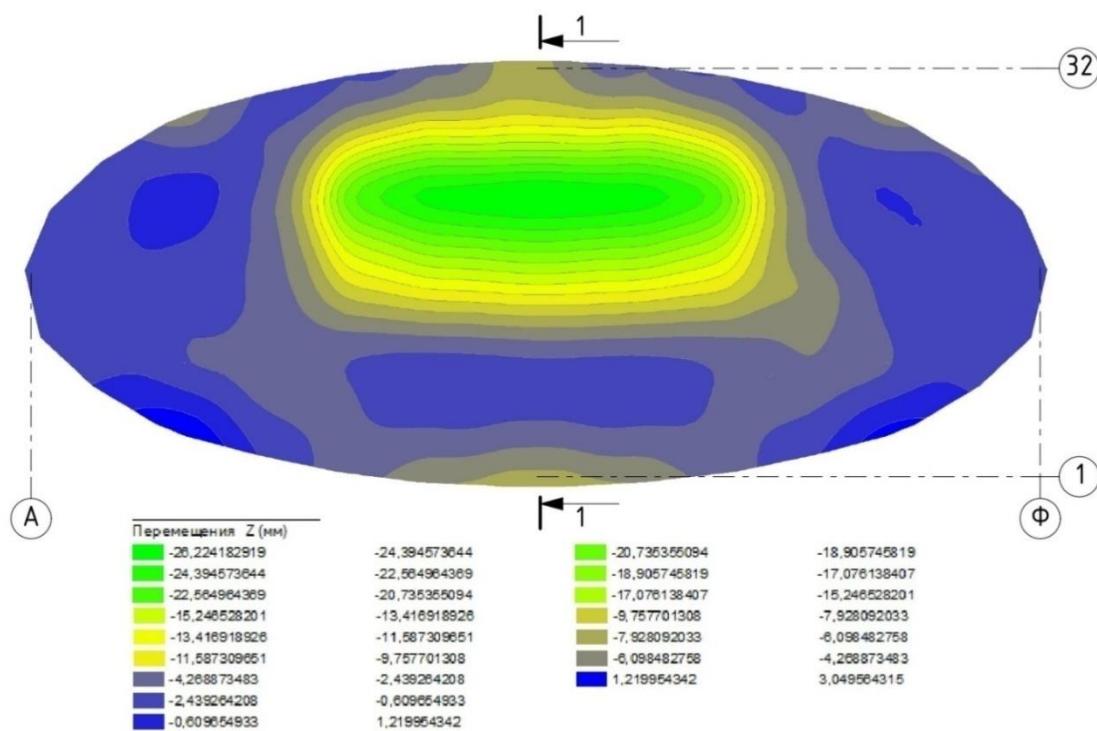
- надежность несущих конструкций здания по первому и второму предельным состояниям при ПЗ обеспечена;
- надежность наземных несущих конструкций здания по первому предельному состоянию при МРЗ обеспечена;
- максимальные горизонтальные перемещения здания превышают максимально допустимые, но не приводят к разрушениям основных несущих конструкций, что не противоречит требованиям при МРЗ;
- локальные отрывы, а также локальные пластические деформации, возникающие в фундаментной плите допустимы при МРЗ.

Таким образом, общая безопасность людей, находящихся в здании при МРЗ, обеспечена и здание может быть допущено к эксплуатации после получения разрешения от проектных и научно-исследовательских организаций, специализирующихся на сейсмостойком строительстве и имеющих соответствующие полномочия. Вопрос о возможности эксплуатации здания после наступления МРЗ остается открытым и данное заключение может быть принято лишь на основании натурной экспертизы аварийного объекта [155].

a)



б)



1-1

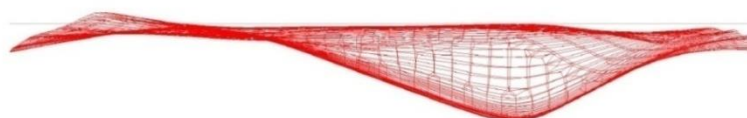


Рис. 4.24. а) Поля реактивных давлений. б) Поля вертикальных перемещений под подошвой фундамента

4.5 Определение динамических напряжений, возникающих в конструкциях каркасного здания от сейсмических воздействий

Для определения реальных сейсмических нагрузок на проектируемое 8-этажное каркасное здание гостиницы, рассмотренное разделе 4.1, моделировались сейсмические воздействия по результатам анализа землетрясения [155], произошедшего 13 ноября 1993 г. у восточного побережья Камчатки [103].

Землетрясение с моментной магнитудой $M_w = 7.0$ и глубиной очага ~ 54 км, по своим параметрам представляет собой типичное для региона сейсмическое событие — межплитовое субдукционное землетрясение тихоокеанской фокальной зоны. Такие события в среднем повторяются с периодом менее 10 лет. Проведенный анализ сейсмической опасности для Петропавловска-Камчатского показал, что в этой фокальной зоне максимально возможным является землетрясение с моментной магнитудой $M_w = 9.0$, причем оценка параметров колебаний поверхности на относительно малых расстояниях от очага этого землетрясения, в пределах Петропавловска-Камчатского, представляет собой достаточно сложную проблему [103]. Оценить параметры колебаний земной поверхности в разных пунктах, на скальных и осадочных породах, можно посредством моделирования акселерограмм этого сценарного землетрясения [91, 94, 101, 136].

В ходе анализа акселерограмм (рис. 4.25), предложенных в работе О.В. Павленко [103], были получены графики реальных изменений сейсмических нагрузок.

Анализу подвергались акселерограммы I и VI как наиболее характерные. На рис. 4.26-4.29 приводятся графики сейсмических нагрузок, построенные с помощью рис. 4.25. На рис. 4.30, 4.31 показаны деформированные схемы здания от определенных ранее сейсмических нагрузок при резонансе по первой и второй формам собственных колебаний.

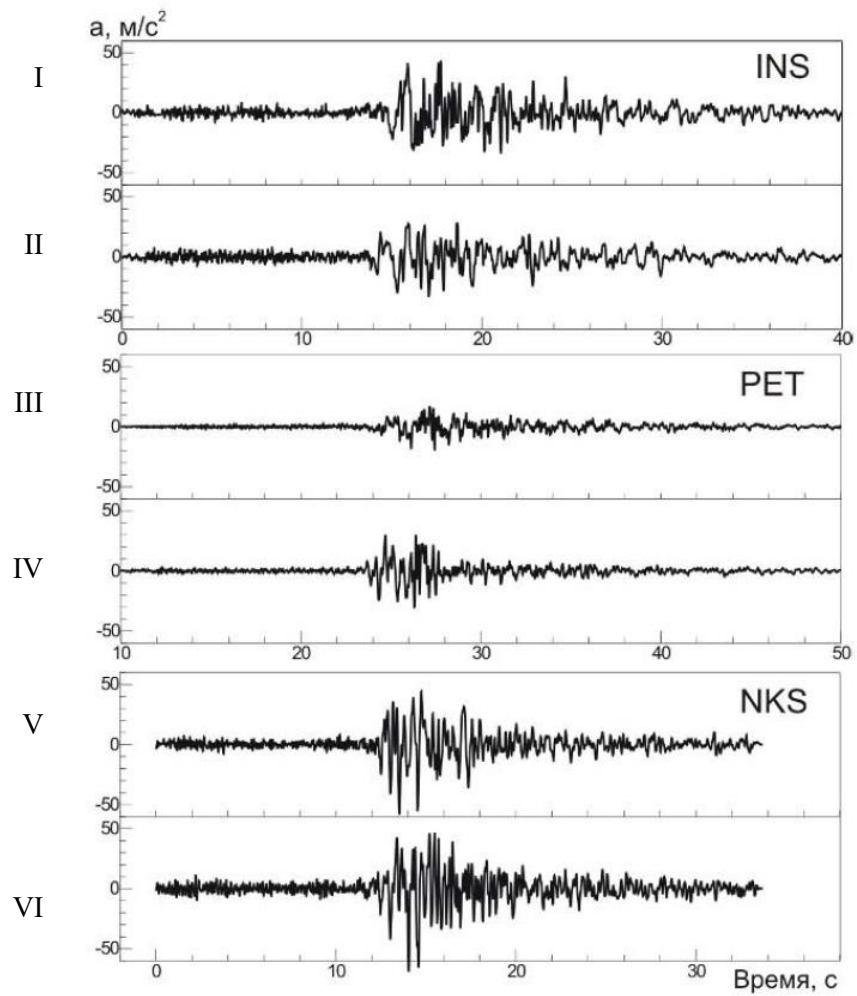


Рис. 4.25. Акселерограммы землетрясения 13.11.1993 г., зарегистрированные сейсмо-станциями INS, PET и NKS; верхняя и нижняя записи — горизонтальные компоненты ВЗ (восток-запад) и СЮ (север-юг)

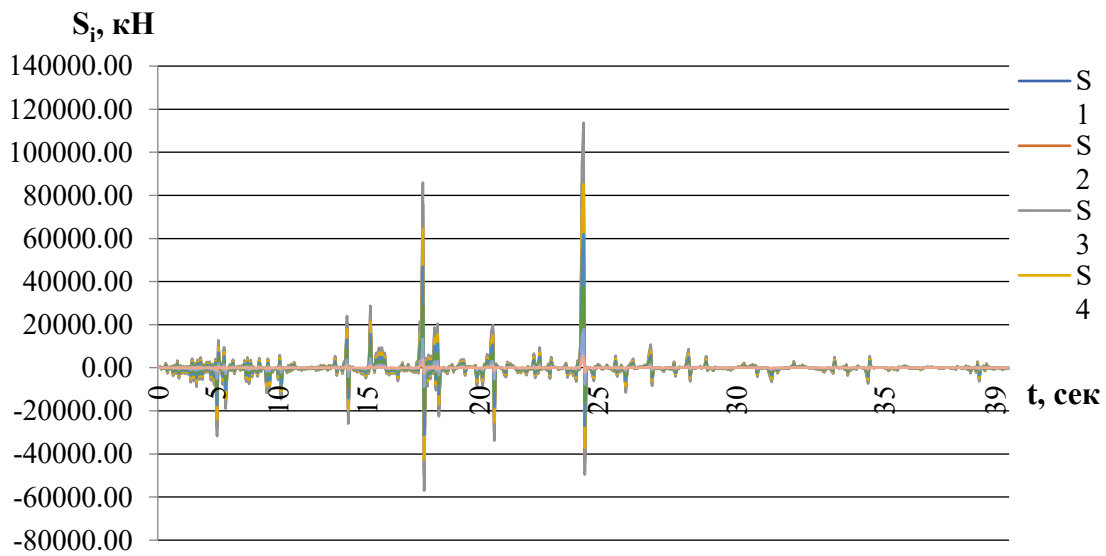


Рис. 4.26. Реальные сейсмические нагрузки (резонанс – по I ФСК, РМВ – акс.I)

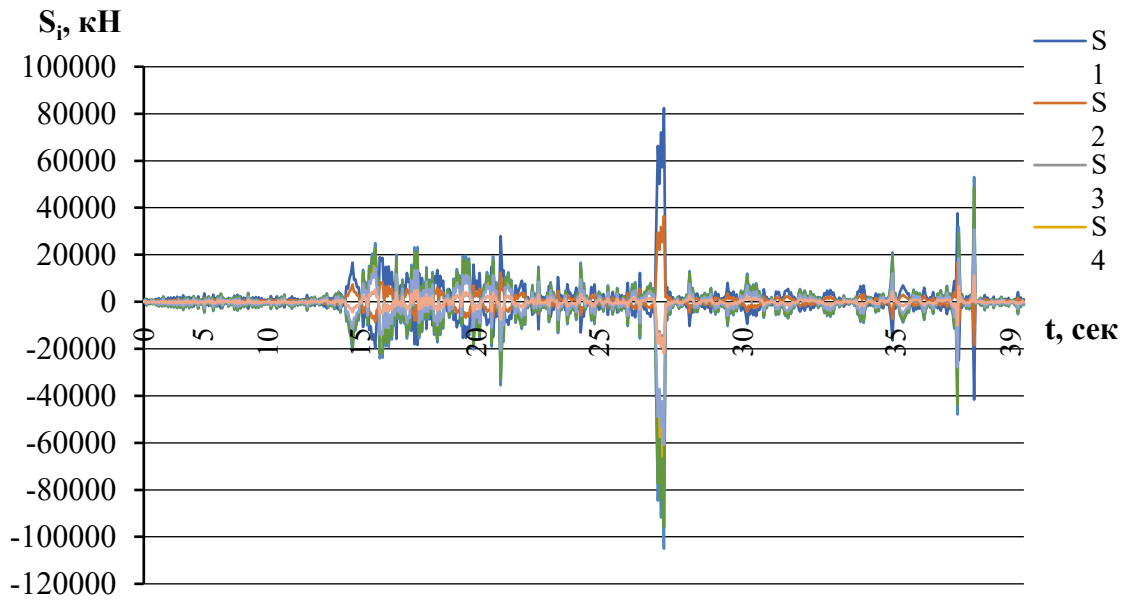


Рис. 4.27. Реальные сейсмические нагрузки (резонанс – по II ФСК, РМВ – акс.I)

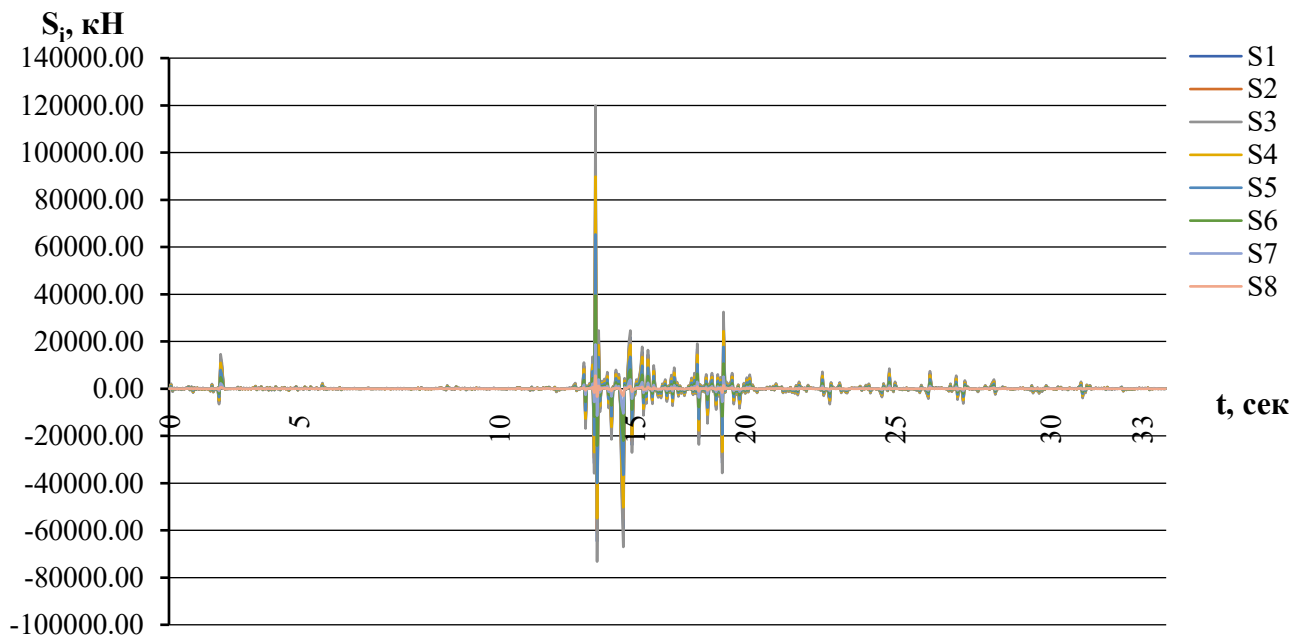


Рис. 4.28. Реальные сейсмические нагрузки (резонанс – по I ФСК, РМВ – акс.VI)

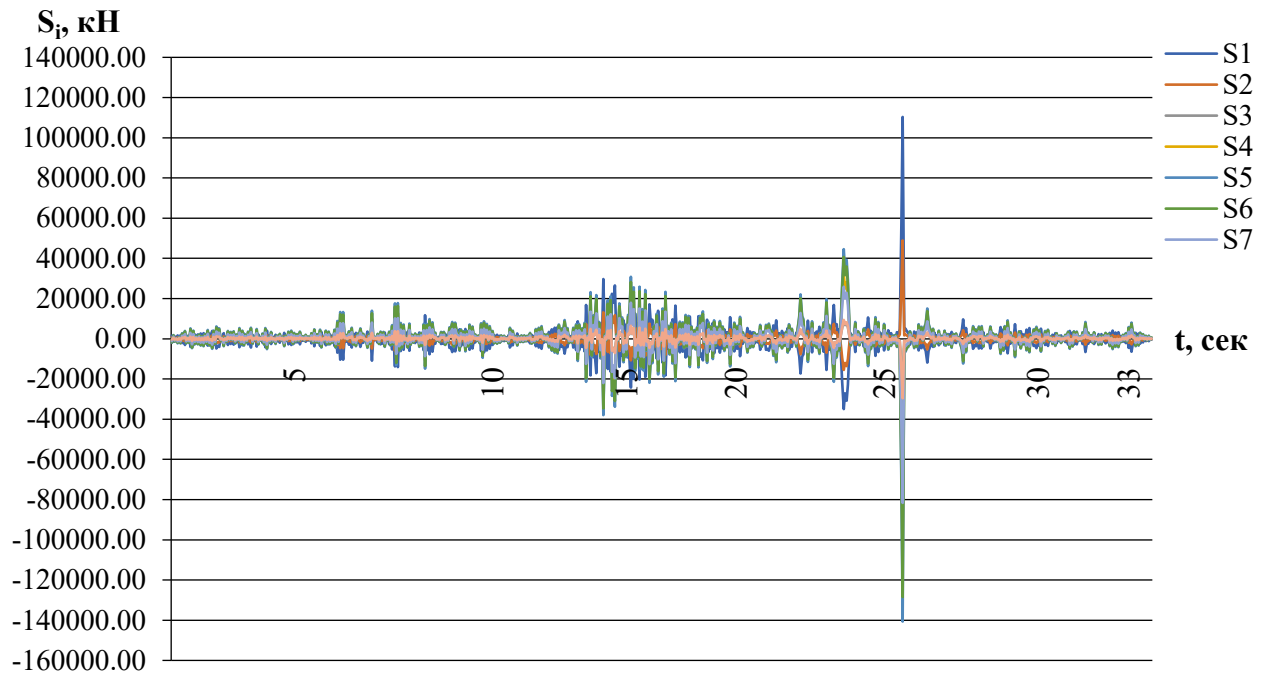


Рис. 4.29. Реальные сейсмические нагрузки (резонанс – по II ФСК, PMB – акс. VI)

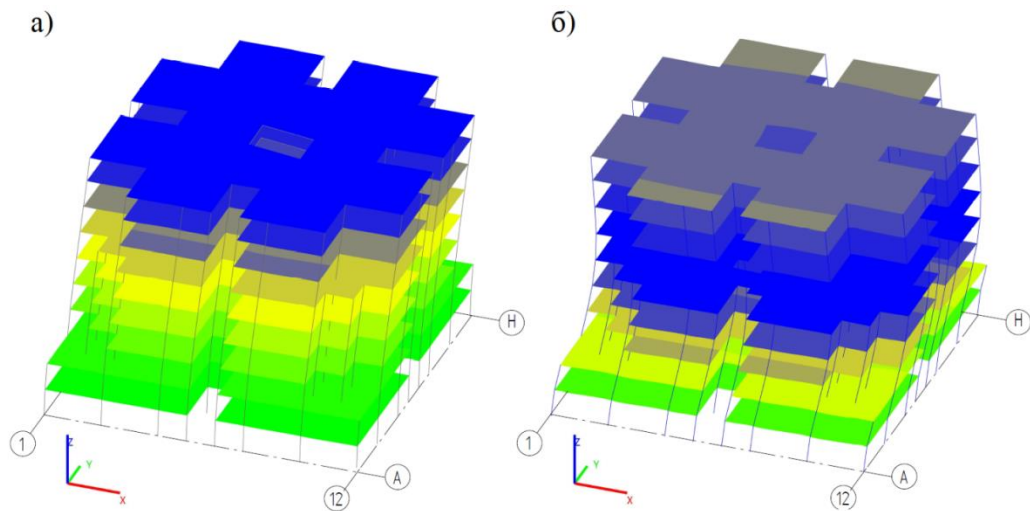


Рис. 4.30 Деформированная расчетная модель проектируемого здания под действием сейсмических нагрузок: а) по I ФСК; б) по II ФСК

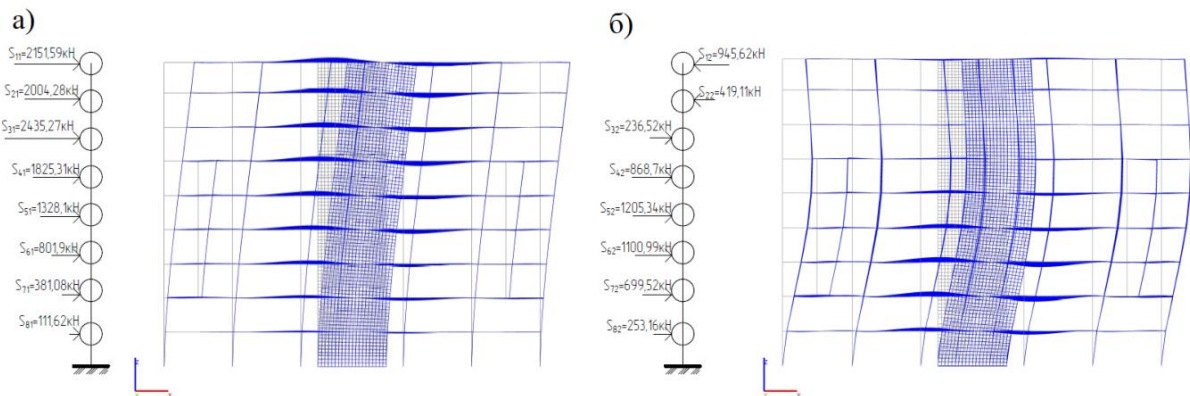


Рис. 4.31. Деформации модели проектируемого здания под действием сейсмических нагрузок: а) по I ФСК; б) по II ФСК

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.

Динамическое напряжение может быть определено по формуле:

$$\sigma_d = \sum \sigma_{ст}^i \cdot S_i, \quad (4.12)$$

где $\sigma_{ст}^i$ – статическое напряжение от единичной силы в i -ой массе;

S_i – реальная сейсмическая нагрузка в i -ой массе, принимаемая графикам, построение которых осуществляется на основании данных акселерограмм.

Статическое напряжение $\sigma_{ст}^i$ определялось путем приложения распределённой нагрузки на i -ое перекрытие таким образом, чтобы равнодействующая сила распределенной нагрузки составляла 1 кН. Согласно результатам расчета были выявлены необходимые напряжения, приведенные в таблице 4.5.

Таблица 4.5

Статические напряжения от единичной силы в i -ой массе

i	$\sigma_{ст}^i$
1	0,000822673
2	0,000805339
3	0,000724418
4	0,000178164
5	0,000192478
6	0,000109797
7	6,08825E-05
8	2,72086E-05

На рисунках 4.32 - 4.35 приводится история напряжений, определенных с помощью рисунков 4.26 - 4.29 и соотношения (4.12). Согласно данным графикам, можно отметить, что при воздействии землетрясения на здание будут наблюдаться резонансные явления.

Анализируя графики (рис. 4.32 - 4.35), было определено максимальное напряжение, возникающее в наиболее нагруженной колонне, которое составило $\sigma_{д, \max} = 292,2 \text{ кН/см}^2$. Согласно этому анализу возникающие напряжения в колонне в 6,8 раза превышают ее несущую способность. Таким образом, исследуемая 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.

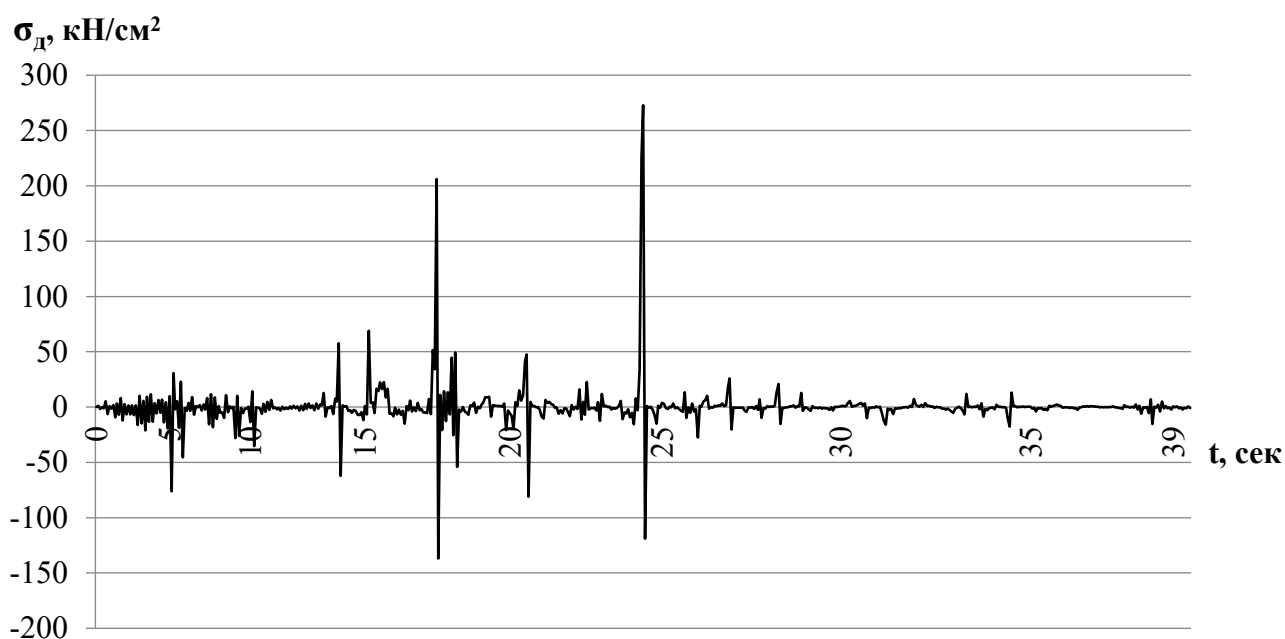
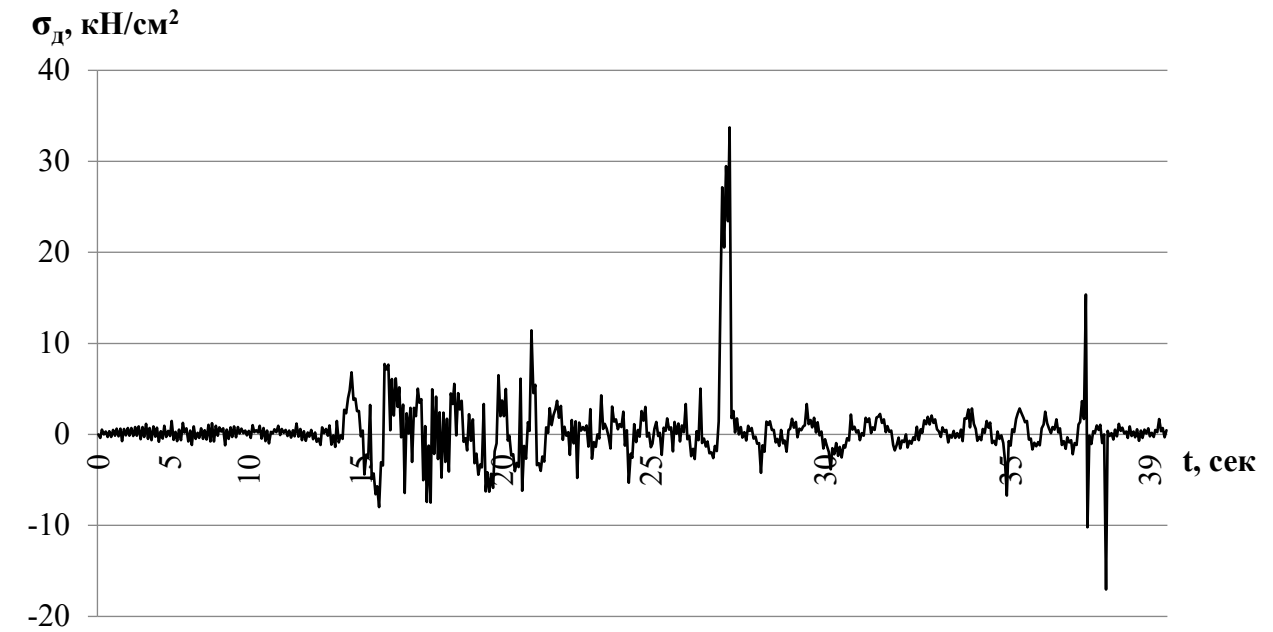


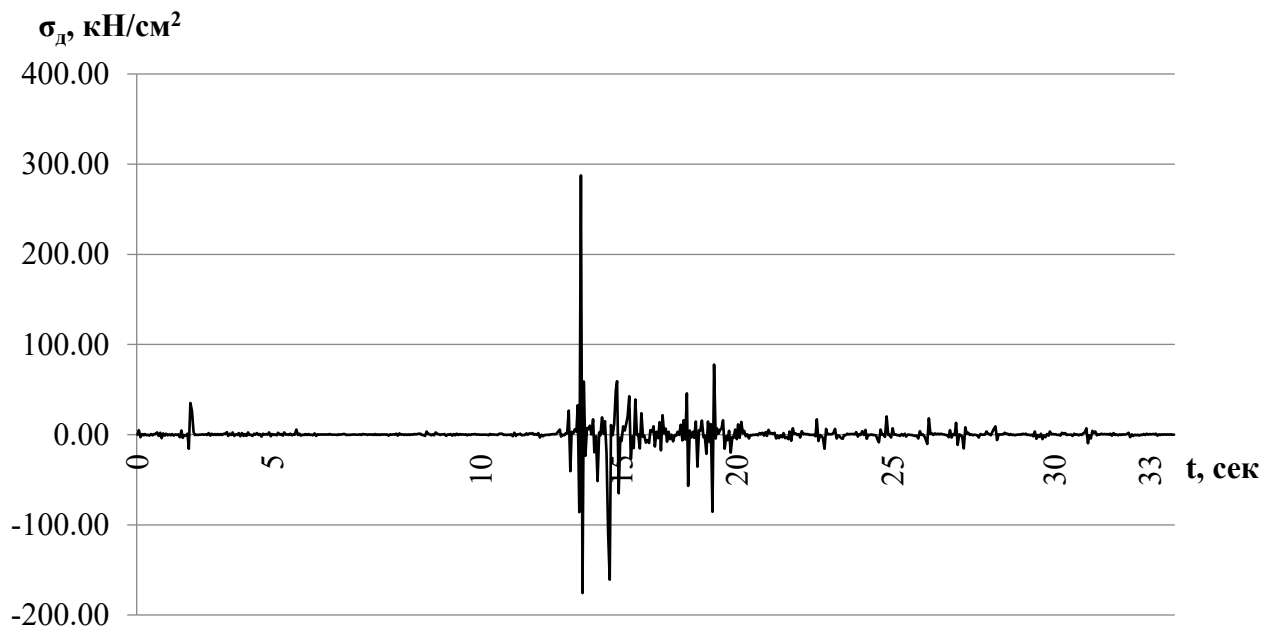
Рис. 4.32. График динамических реальных напряжений (резонанс – по I ФСК, РМВ – акс.I)

Таким образом, может быть сделан вывод, что в результате этих необратимых процессов может произойти разрушение большинства колонн проектируемого здания, иначе говоря, проектируемое каркасное 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 здания с использованием приемов, увеличивающих жесткость каркаса. При этом необходимо отметить, что данное событие маловероятно ввиду необходимости

наступления большого числа условий, обуславливающих полное совпадение собственных частот здания и частот колебаний грунта, а также достижение резонанса [155].



а)



б)

Рис. 4.33. График изменения динамических напряжений.

а) резонанс – по II ФСК РМВ – акс. I

б) резонанс – по I ФСК, РМВ – акс. VI

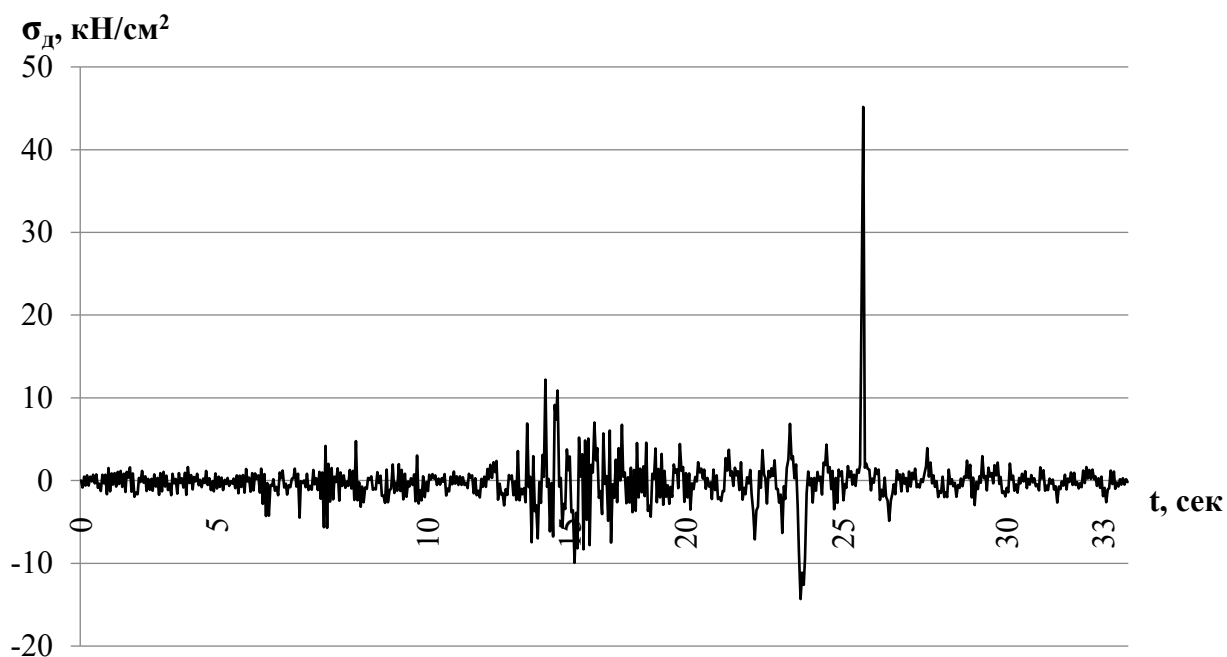


Рис. 4.34. График изменения динамических напряжений (резонанс – по II ФСК, РМВ – акс. VI)

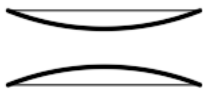
4.6 Колебания конструкций при взаимном влиянии близкорасположенных объектов

Для зданий из системы, описанной в разделе 3.2, были определены частоты и формы собственных колебаний.

Для большепролетной фермы из стальных круглых труб, являющейся несущей конструкцией арочного покрытия здания, рассмотренного в разделе 2.2, по методике, описанной в разделе 4.2, были определены частоты первых трех форм колебаний. При расчете использовалась упрощенная схема с 11 массами, расположенными в основных узлах фермы. Результаты представлены в таблице 4.6.

Для нескольких типов большепролетных криволинейных ферм здания, рассмотренного в разделе 2.3, были определены динамические характеристики собственных колебаний. Маркировка ферм представлена на рисунке 4.35. При расчете использовалась упрощенная схема с 13 массами, расположенными в основных узлах фермы. Результаты представлены в таблице 4.7.

Результаты определения частот и форм собственных колебаний

	I форма собственных колебаний	II форма собственных колебаний	III форма собственных колебаний
ω (рад/с)	19,885	25,481	130,148
f (Гц)	3,165	4,055	20,714
T (с)	0,316	0,247	0,048
Форма			
Принятые обозначения: ω – круговая частота собственных колебаний; f – частота собственных колебаний; T – период собственных колебаний.			

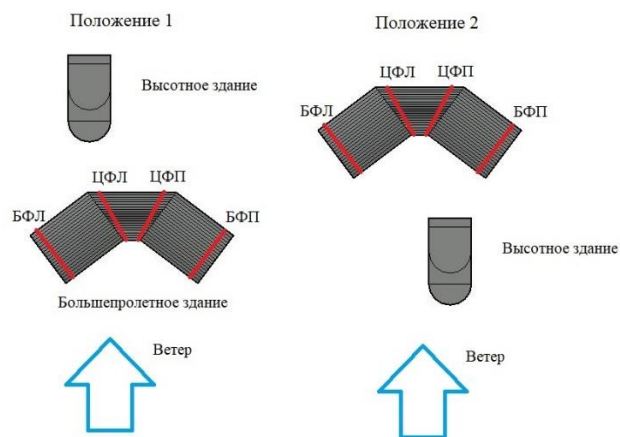
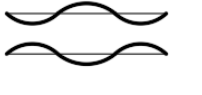


Рис. 4.35 Схема расположения зданий относительно друг друга, принятые для исследования, маркировка ферм большепролетного здания

Таблица 4.7

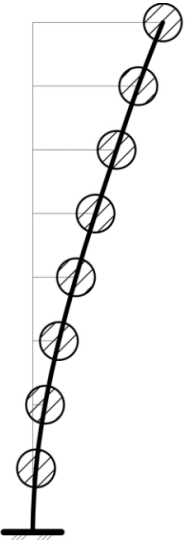
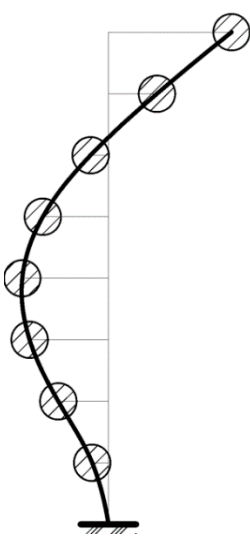
Результаты определения частот и форм собственных колебаний

	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 (рад/с)	16,257	14,375	40,386	71,354	67,899	79,722
Форма						

Высотное здание было рассмотрено как стержень с 7 закреплёнными массами по аналогии с каркасным зданием из раздела 4.1. Результаты представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8

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
$\varphi_{11} = 1$			$\varphi_{12} = 1$		
$\varphi_{21} = 0,757$			$\varphi_{22} = 0,575$		
$\varphi_{31} = 0,461$			$\varphi_{32} = 0,091$		
$\varphi_{41} = 0,227$			$\varphi_{42} = -0,457$		
$\varphi_{51} = 0,137$			$\varphi_{52} = -0,612$		
$\varphi_{61} = 0,071$			$\varphi_{62} = -0,513$		
$\varphi_{71} = 0,024$			$\varphi_{72} = -0,208$		

Далее были определены перемещения основных узлов каждого из зданий от ветровой нагрузки для каждого здания в отдельности и при взаимном расположении зданий в системе по формуле:

$$\Delta_d = \Delta_0 \cdot \frac{(V_{\text{ст}} + V_d \cdot \mu)^2}{V_0^2}, \quad (4.13)$$

где

$V_{\text{ст}}$ – 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;

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

круговой частоты ветровых порывов θ и круговой частоты собственных колебаний здания ω .

$\gamma = 0,025$ — коэффициент неупругого сопротивления здания.

Таким образом при помощи формулы (4.13) учитываются как статические, связанные с увеличением общей скорости ветра (рис.4.36, красная линия), так и резонансные, связанные с ветровыми порывами (рис.4.36, черная линия), явления. При известном значении Δ_0 (уравнение (4.3)) может быть построена диаграмма изменения динамической амплитуды колебательного процесса.

Значения скоростей ветра принимались по синтезированной анемограмме штормовых ветровых порывов для города Москва, представленной на рисунке 4.36.

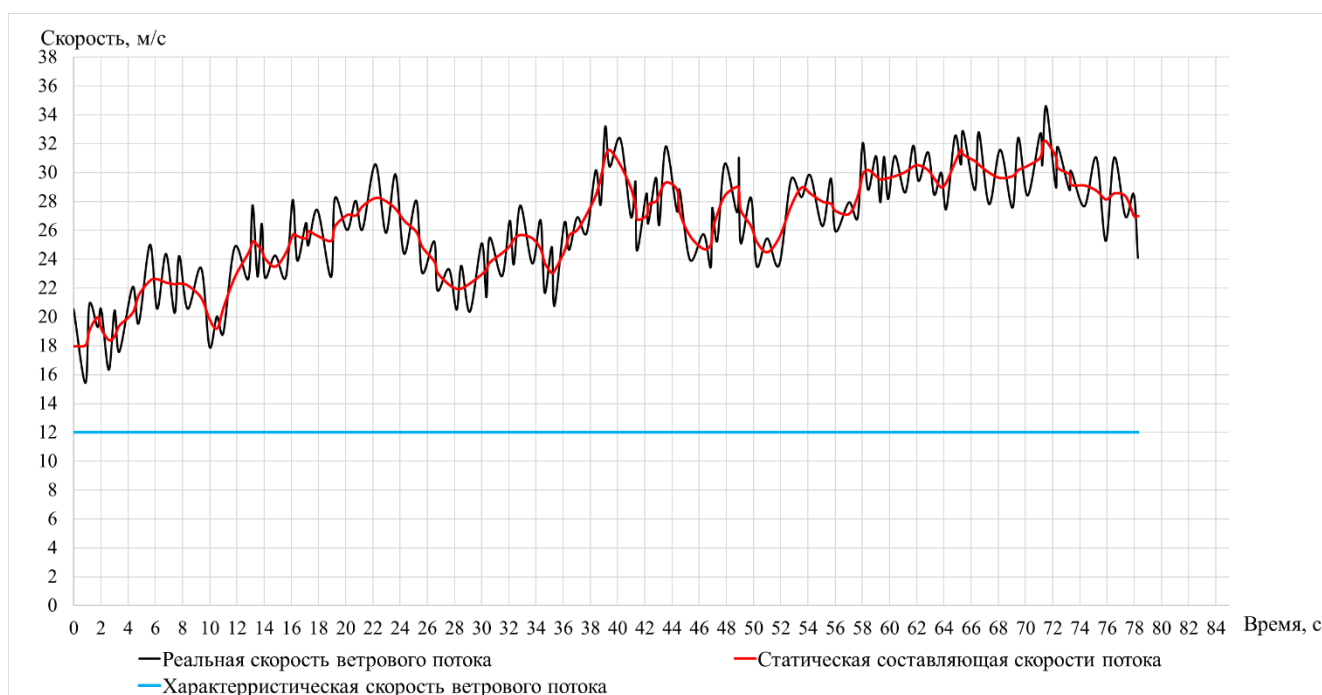
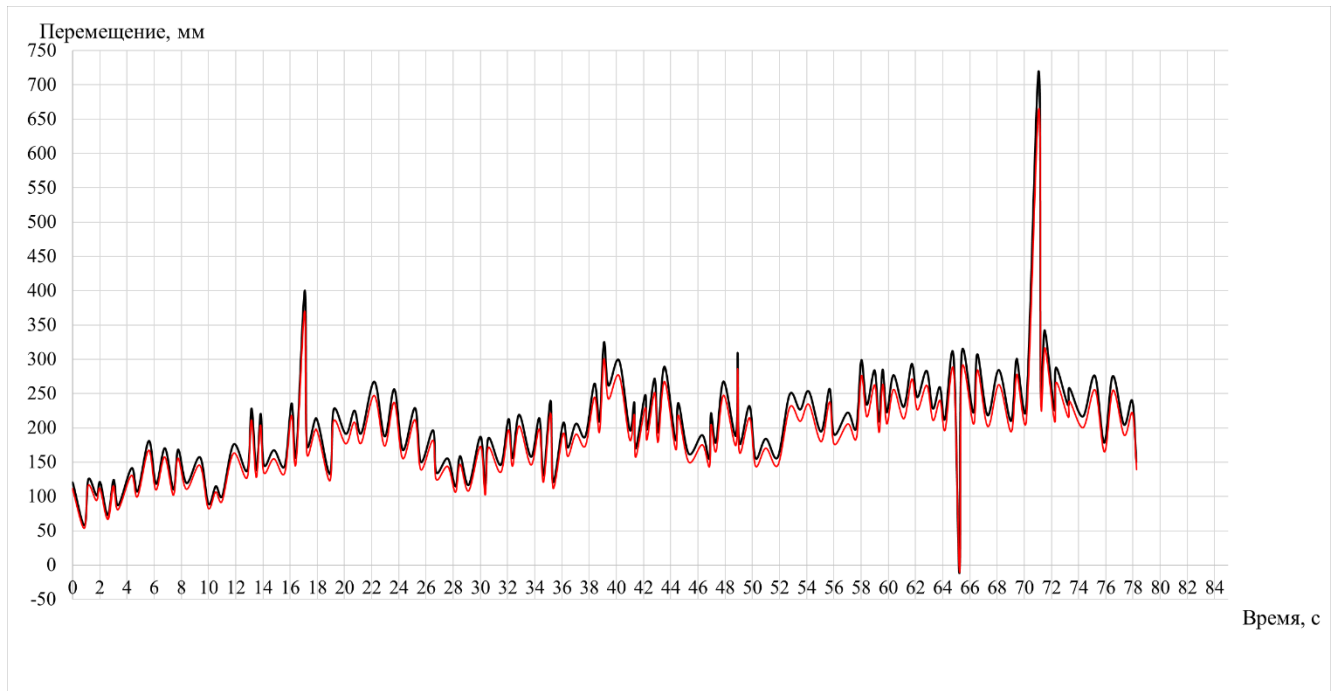


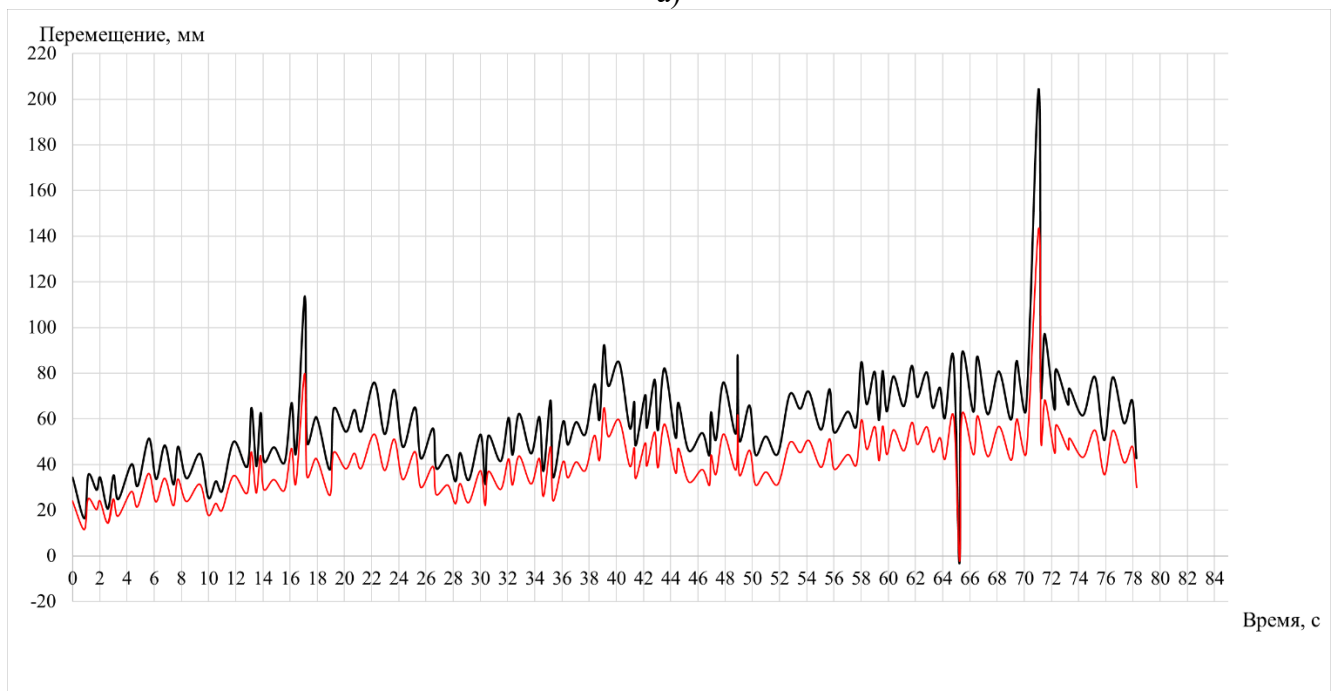
Рис. 4.36. Синтезированная анемограмма штормовой ветровой нагрузки

Результаты определения перемещений в характерных точках фермы большепролетного здания и высотного здания от штормовой ветровой нагрузки представлены на рисунках 4.37 - 4.41. Черным цветом показано перемещение при одиночном расположении, красным - при наличии спереди исследуемого объекта препятствия в виде другого объекта системы.

По данным расчетам можно сделать вывод, что объединение тел в систему через воздушную среду может оказывать значительное влияние на колебания конструкций каждого тела. При проектировании объектов в условиях застройки необходимо рассматривать все здания и сооружения в совокупности из-за возможного перераспределения ветровых воздействий.

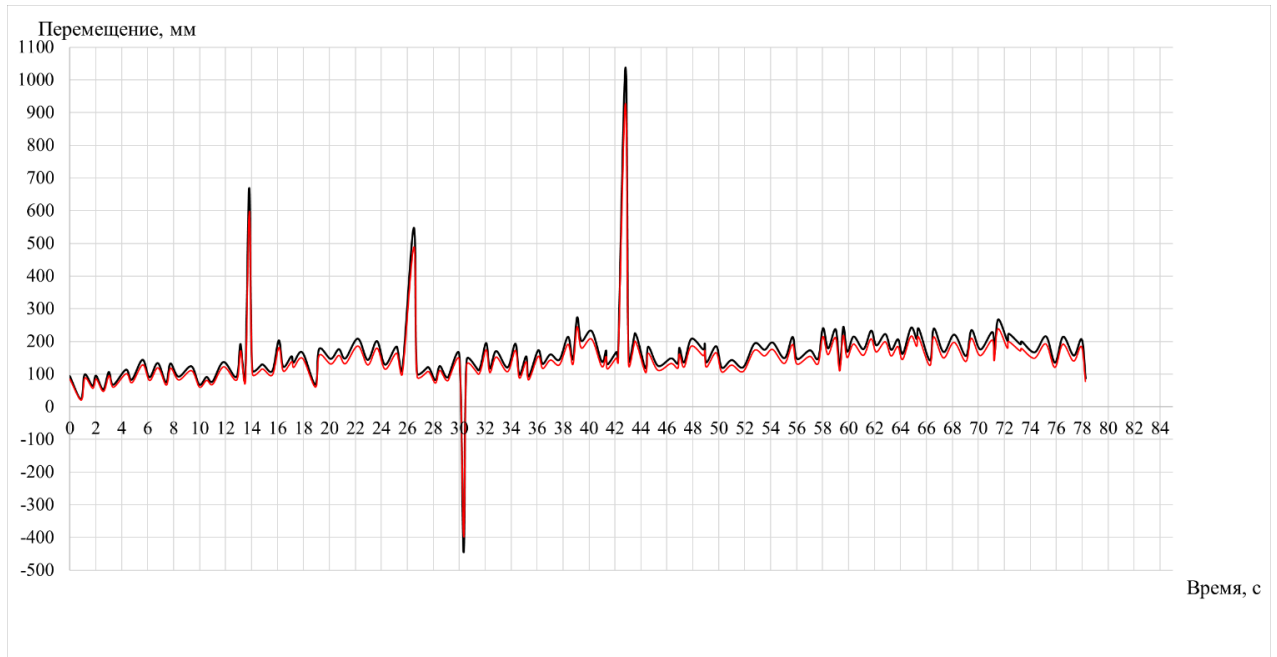


а)

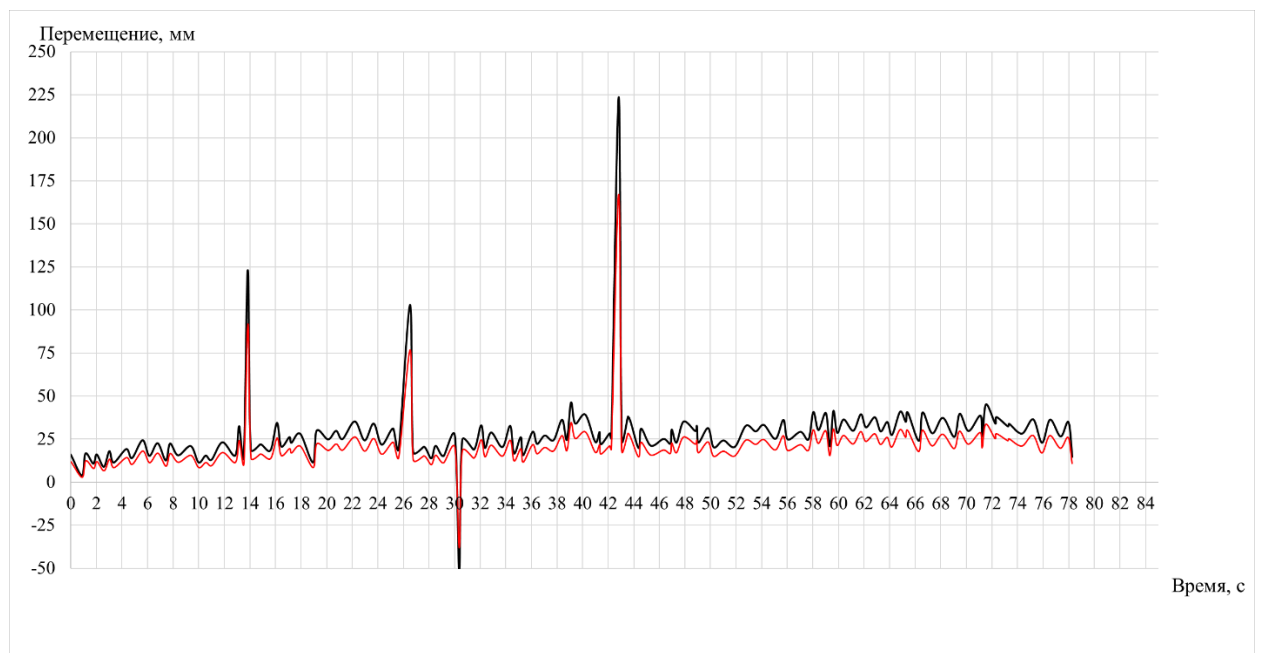


б)

Рис. 4.37. Перемещения фермы большепролетного здания от штормовой ветровой нагрузки:
а) середины пролета; б) точки ближе к краю пролета.



а)



б)

Рис. 4.38. Перемещения высотного здания от штормовой ветровой нагрузки: а) в верхней точке; б) в нижней части здания

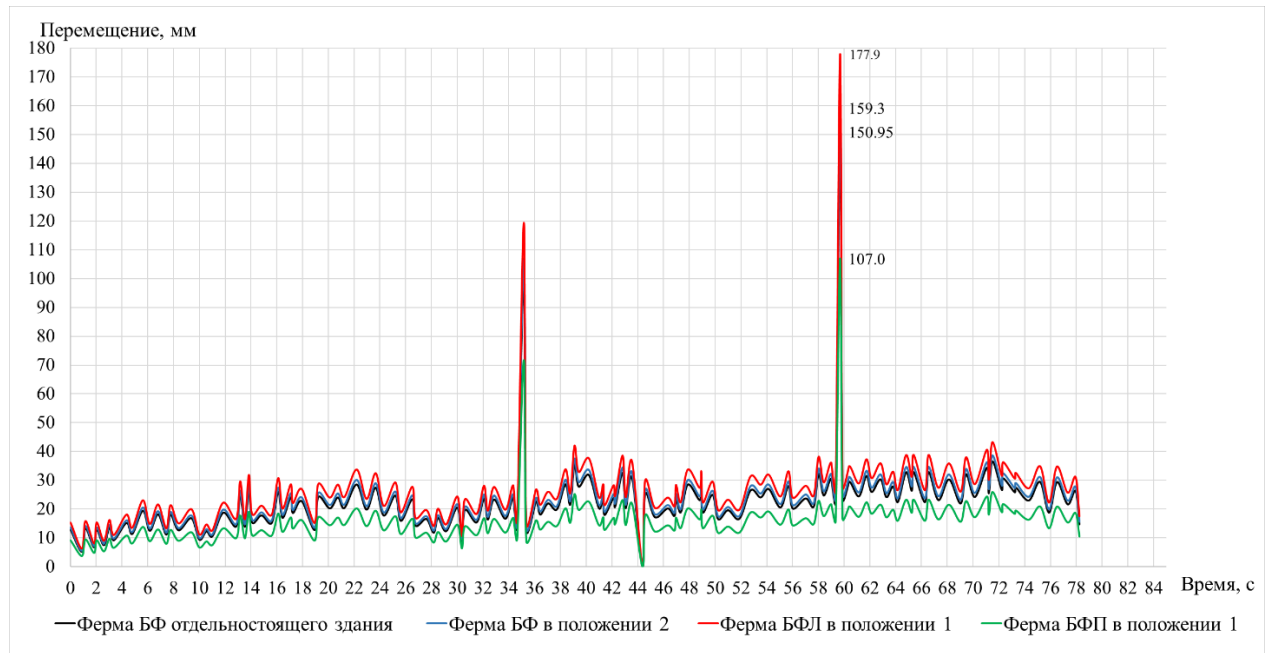


Рис. 4.39. Перемещения боковой фермы большепролетного здания от штормовой ветровой нагрузки в середине пролета (Обозначение ферм по рис. 4.36)

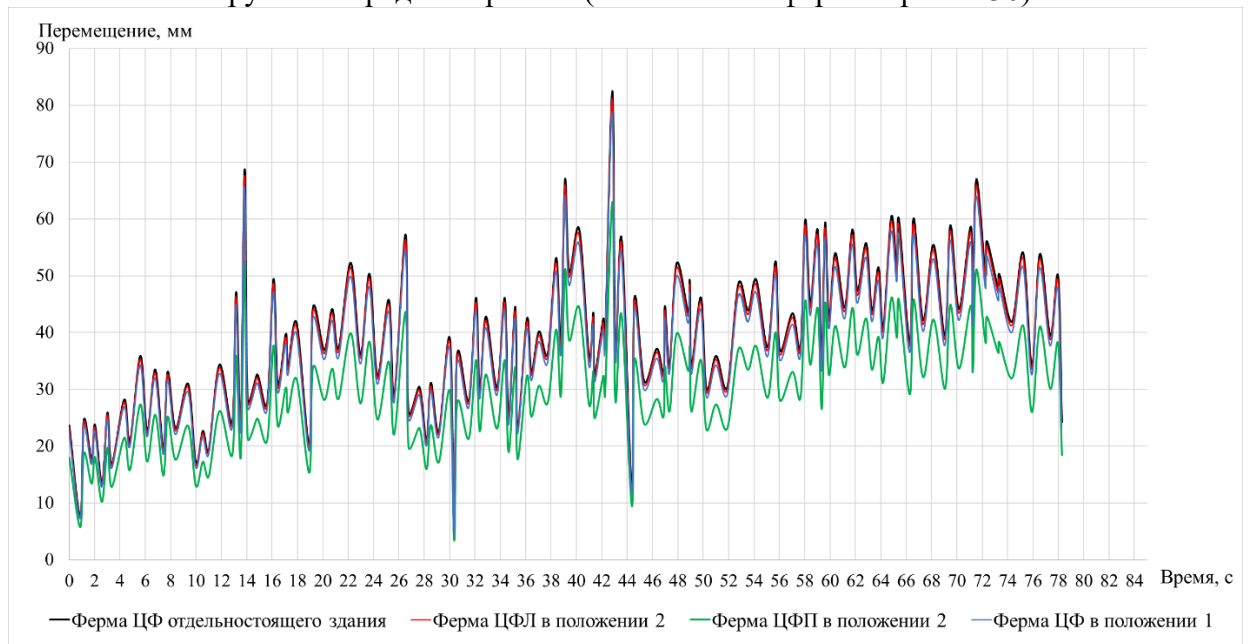


Рис. 4.40. Перемещения центральной фермы большепролетного здания от штормовой ветровой нагрузки в середине пролета (Обозначение ферм по рис. 4.36)

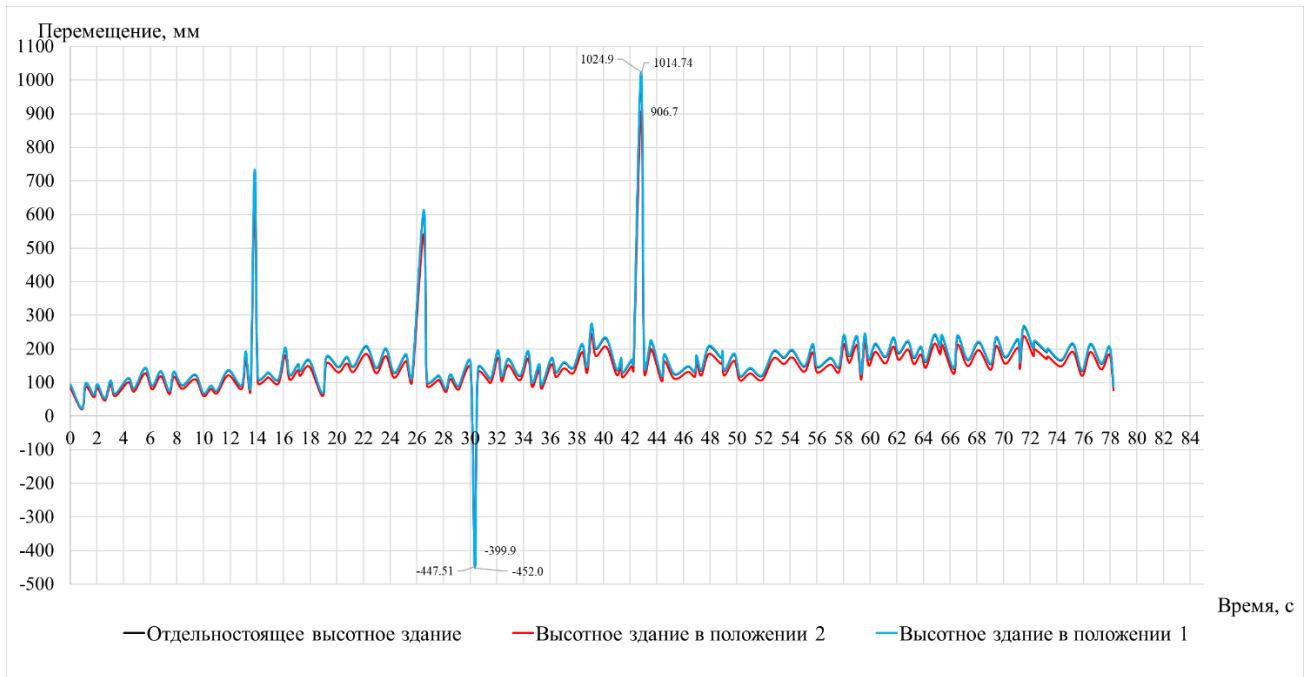


Рис. 4.41. Перемещение высотного здания от штормовой ветровой нагрузки в верхней точке

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.).

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.

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 конструкции. 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).

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).

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.).

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)

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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ahsan Kareem Measurements of pressure and force fields on building models in simulated atmos-pheric flows / Kareem Ahsan// Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 1990, Vol. 36(1), pp 589-599.
2. Avdeeva, A.G Analysis of the seismic resistance of a designed high- rise building / A.G. Avdeeva, A.A. Satanov, M.A. Shishova, P.A. Khazov // В сборнике: X Всероссийский фестиваль науки. Сборник докладов. Редколлегия: А.А. Лапшин, И.С. Соболев, Д.В. Монич [и др.]. - 2020. - С. 959-961.
3. Azarov A.A. Dynamics of a flexible disk rotor under a point contact with discrete viscoelastic oscillation limiters / A.A. Azarov, A.M. Gouskov, G.Y. Panovko // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 52, pp. 20–30 (2023).
4. Bozhko A. Mathematical Modelling of Mechanical Structures and Assembly Processes of Complex Technical Systems / A. Bozhko // Advances in Automation III. RusAutoCon 2021. Lecture Notes in Electrical Engineering, 857, pp. 80-91 (2022).
5. Bratov V. Seismic barriers filled with solid elastic and granular materials: comparative analysis / V. Bratov, S. Kuznetsov, N. Morozov // Mathematics and Mechanics of Solids, 27(9), pp. 1761-1770 (2022).
6. Dimitrienko Yu. Modeling of aeroelastic composite plates vibrations based on asymptotic theory / Yu. Dimitrienko, E. Gubareva, A. Tumanov // E3S Web of Conferences. 2023, 376.
7. Egan, J.P. Signal Detection Theory and ROC Analysis / J.P. Egan. - New York, 1975. - 277 p.
8. 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.
9. Erofeev, V.I. Ultrasonic sensing Method for evaluating the limit state of metal structures associated with the onset of plastic deformation / V.I. Erofeev, A.V. Ilyakhinsky, E.A. Nikitina, P.A. Pakhomov, V.M. Rodyushkin // Physical Mesomechanics. - 2020. - vol. 23. № 3, - pp. 241-245.

10. Frechette, R. Towards Zero Energy. A Case Study of the Pearl River Tower, Guangzhou, China / R. Frechette, Ru. Gilchrist // CTBUH 2008 8th World Congress, Dubai. - 2008. - pp. 11.
11. Glória Gomes M. Experimental and numerical study of wind pressures on irregular-plan shapes / M. Glória Gomes, A. Moret Rodrigues, Pedro Mendes // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2005, Vol. 93, No 10, pp 741-756.
12. Goryachevsky O. S. Nonlinear dynamic analysis of wind actions on a cable-stayed glass facade system / O. S. Goryachevsky, A. M. Belostotsky // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2024. Vol. 20. No. 3. P. 56–68. EDN: HZAAEZ. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-3-56-68.
13. Gouskov A.M. Dynamics of the rotor system of a vibrational–centrifugal separator with an elastic vibration limiter / A.M. Gouskov, G.Y. Panovko, A.E. Shokhin, // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 51, pp. 733–745 (2022).
14. Hoerner, S.F. Fluid-dynamic drag: theoretical, experimental and statistical information / S.F. Hoerner. - Washington, 1965. - 455p.
15. Irwin Peter A. Wind engineering challenges of the new generation of super-tall buildings / Peter A. Irwin // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2009, Vol. 97, pp 328-334.
16. Kalugin V.T. Flow Features and Aerodynamic Analysis of the Canard Missiles. / V.T. Kalugin, S.N. Voropaev, D.K. Nazarova // Russ. Aeronaut. 2022. № 65, P. 533–540.
17. Karadag, I. Wind Turbine Integration to Tall Buildings / I. Karadag, I. Yüksek // Intech Open. - 2020. - p. 15.
18. Kharrazi M.H.K. Vibration Frequencies of Woodframe / M.H.K Kharrazi, C.E. // Ventura Residential Construction. Earthquake Spectra. 2006. № 22(4) P. 1015-1034.
19. Khazov, P.A. Seismic resistance analysis of a high-rise building under design in Vladivostok / P.A. Khazov, M.A. Shishova, A.A. Satanov // Privolzhsky Scientific Journal. - 2020. - № 2 (54). - C. 9-15.

20. Khusainov R.B. Seismodynamics of underground pipelines under viscous-elastic-plastic interaction with soil / R.B. Khusainov, S. Bu. Khusainov, B.B. Khusainova // Soil Mechanics and Foundation Engineering, 59, pp. 544–552 (2023).
21. Kovalenko M.D. Exact solutions of the theory of elasticity for a clamped rectangle / M.D. Kovalenko, I.V. Menshova, G. Yu // Mathematics and Mechanics of Solids. 2022. №27(12). P. 2551-2566.
22. Kuzenov V.V. The adaptive composite block-structured grid calculation of the gas-dynamic characteristics of an aircraft moving in a gas environment / V.V. Kuzenov, S.V. Ryzhkov, A.Y. Varaksin // Mathematics, 10, 2130 (2022).
23. Li, Q.S. Performance assessment of tall building-integrated wind turbines for power generation / Q.S. Li, Z.R. Shu, F.B. Chen // Applied Energy. - 2016. - vol. 165. - pp. 777-788.
24. Litvinov V. Research of transverse rope oscillations moving in the longitudinal direction / V. Litvinov // AIP Conference Proceedings, 2383, (2022).
25. Ma M. Prediction of building vibration induced by metro trains running in a curved tunnel./ M. Ma, L. Xu, L.Du, Z. Wu, // Journal of Vibration and Control. 202127(5-6). P. 515-528.
26. Mohamed, A. Comparision of the numerical study of the effect of building protrusion aerodynamics with the results of aerodynamic tests /A. Mohamed // 15th Australian wind energy society workshop. Sydney. - 2012. - 4 p.
27. Mou, B. Numerical simulation of the effects of building dimensional variation on wind pressure distribution / B. Mou, B.J. He, D.X. Zhao, K.W. Chau // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. - 2017. - vol. 11(1). - pp. 293-309.
28. Raileigh, F.R.S. On the pressure of vibrations / Lord F.R.S. Rayleigh // The London Philosophical Magazine and Journal of Science. - 1902. - vol.3. №15. - pp. 338-346.
29. Rajasekarababu, K.B. Experimental and computational investigation of outdoor wind flow around a setback building / K.B. Rajasekarababu, G. Vinayagamurthy, S.S. Rajan // Build. Simul. - 2019. - vol. 12. - pp. 891-904.

30. Safwan Al-Subaihawi Assessment of wind-induced vibration mitigation in a tall building with damped outriggers using real-time hybrid simulations / Safwan Al-Subaihawi, Chinmoy Kolay, Thomas Marullo, James M. Ricles, Spencer E. Quiel // *Engineering Structures*. Vol. 205. 2020. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110044.
31. 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.
32. Satanov, A.A. Analysis of frequencies and modes of natural vibrations of an earthquake-resistant high-rise building in Vladivostok / A.A. Satanov, M.A. Shishova // В сборнике: Великие реки 2020. Труды научного конгресса 22-го Международного научно-промышленного форума. Ответственный редактор А.А. Лапшин. - 2020. - С. 387-391.
33. Semkiv, O. Development of projection technique for determining the non-chaotic oscillation trajectories in the conservative pendulum systems / O. Semkiv, O. Shoman, E. Sukharkova [et al.] // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. - 2017. - vol. 2, № 4(86). - pp. 48-57.
34. Smith, R.F. Bahrain world trade Center (BWTC): The first large-scale integration of wind turbines in a building / R.F. Smith, S. Killa // *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. - 2007. - vol. 16. - pp. 429-439.
35. Stankovic, S. *Urban Wind Energy* - London Taylor & Francis / S. Stankovic, N. Campbell, A. Harries. - London: Routledge, 2009. - 200 p.
36. Terence Tao Finite time blowup for an averaged three-dimensional Navier-Stokes equation. / Terence Tao // *Journal of The American Mathematical Society*, 2016, Vol. 29, No. 3, pp 601-674.
37. Valger S.A. Structure of a turbulent separated flow in the vicinity of a prism mounted on a plate / S.A. Val'ger, N.N. Fedorova, A.V. Fedorov // *Thermophysics and Aeromechanics*, 22, pp. 29–42 (2015).
38. Valger, S.A. On numerical modeling of aerodynamics of urban developments on unstructured computational grids / S.A. Valger // *Thermophys. Aeromech.* - 2021. - vol. 28. - pp. 507-522.

39. Vesnitsky, A.I. Wave effects in mechanics / A.I. Vesnitsky // Анализ и синтез нелинейных механических систем: Труды XXII школы-семинара. СПб. - 1995. - С. 78-84.
40. Wang J. Experimental and numerical studies of the vortex-induced vibration behavior of an asymmetrical composite beam bridge / J. Wang, C. Ma, M. LI, N. Yeung // Advances in Structural Engineering. 2019. №22(10). P. 2236-2249.
41. Абраамян, Н.Г. Исследование обтекания ветровыми потоками уникального высотного здания / Н.Г. Абраамян, А.А. Сатанов // В сборнике: XII Всероссийский Фестиваль науки. Сборник докладов. Редколлегия: Д.Л. Щёголев, Д.В. Монич, А.А. Смыков, И. В. Шкода [и др.]. Нижний Новгород. - 2022. - С. 1296-1300.
42. Агеев, Р.В. Математическое моделирование гидроупругих колебаний жестко защемленной пластины на упругом основании / Р.В. Агеев, А.А. Попова, А.В. Христофорова // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. - 2017. - Т. 3. - С. 29-34.
43. Аносов, М.С. Акустические волны в материалах и элементах конструкций с дефектами, неоднородностями и микроструктурой / М.С. Аносов, А.М. Антонов, А.В. Бочкарев, С.В. Герасимов, В.И. Ерофеев [и др.]. - Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2021. - 311 с.
44. Анущенко, А.М. Исследование обтекания воздушными потоками большепролетной поверхности численным и экспериментальным 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.
45. Барштейн, М.Ф. Динамический расчет зданий и сооружений / М. Ф. Барштейн, В. А. Ильичев, Б. Г. Коренев [и др.]; под ред. Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича. - 2-е изд., перераб. и доп. - М: Стройиздат, 1984. - 303 с.: ил. — (Справочник проектировщика).

46. Березин, М.А. Атлас аэродинамических характеристик строительных конструкций / М.А. Березин, В.В. Катюшин. - Новосибирск: ООО Олден-полиграфия, 2003. - 138 с.
47. Бутенин, Н.В. Курс теоретической механики Т.1. Статика и кинематика. Т.2. Динамика / Н.В. Бутенин, Я.Л. Лунц, Д.Р. Меркин. - 11-е изд., стер. - СПб: Лань, 2009. - 736 с.
48. Вальгер С.А. Численное исследование интерференционных эффектов, возникающих в воздушном потоке при обтекании комплекса зданий сложной формы. / С.А. Вальгер, Н.Н. Федорова, А.В. Федоров // Теплофизика и аэромеханика, 2017, т. 24, № 1, с. 35-44.
49. Вальгер, С.А. Структура турбулентного отрывного течения в окрестности установленной на пластине призмы / С.А. Вальгер, Н.Н. Федорова, А.В. Федорова // Теплофизика и аэромеханика. Институт теплофизики СО РАН. Новосибирск. - 2015. - Том 22, №1. - С. 29-42.
50. Ватутин, В.Л. Вероятностные методы в физических исследованиях / В.Л. Ватутин, Т.М. Телевинова, В.П. Чистяков. - М.: Наука, 1985. - 208 с.
51. 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 (в печати).
52. Вельмисов, П.А. Динамическая устойчивость деформируемых элементов конструкций при сверхзвуковом режиме обтекания / П.А. Вельмисов, А.В. Анкилов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. - 2018. - Т. 22, № 1. - С. 96-115.
53. Весницкий, А.И. Теория колебаний распределенных параметрических систем. Ч.1.: Уч. Пособие / А.И. Весницкий, А.И. Потапов. - Горький: ГГУ, 1977.- 67 с.
54. Вольфсон, Б.П. О собственных колебаниях одномерной периодической системы / Б.П. Вольфсон // СПб. Исследования по теории сооружений, под ред.

проф. Б.Г. Корнева, чл.-корр. АН СССР И.М. Рабиновича, проф. А.Ф. Смирнова. - Москва, 1969. - вып. 17. - С. 87-92.

55. Гагарин, В.Г. Аэродинамические характеристики зданий для расчета ветрового воздействия на ограждающие конструкции / В.Г. Гагарин, С.В. Гувернюк, П.В. Леденев // Жилищное строительство. Москва. - 2010. - № 1. - С. 7-10.

56. Герасимов С.И. Динамика деформируемых систем, несущих движущиеся нагрузки (обзор публикаций и диссертационных исследований) / С.И. Герасимов, В.И. Ерофеев, Д.А. Колесов, Е.Е. Лисенкова // Вестник научно-технического развития. - 2021. - № 1 (160). - С. 25-47.

57. Гныря А.И. Моделирование ветровых нагрузок при обтекании воздушным потоком системы моделей зданий при вариации их расположения / А.И. Гныря, С.В. Коробков, А.А. Кошин, В.И. Терехов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. Томский гос. архитектур.-строит. ун-т. Томск. - 2018. - № 4. - С. 65-73.

58. Голуб, В.П. Определяющие уравнения в нелинейной механике поврежденности / В. П. Голуб // Прикладная механика. - 1993. - Т. 29, № 10. - С. 37-49.

59. Гриднев, С.Ю. Численный анализ нелинейных колебаний упруго опертой деформируемой системы с ограничительными опорами по концам / С.Ю. Гриднев, Ю.И. Скалько // Морские интеллектуальные технологии. - 2017. - № 4-3(38). - С. 37-44.

60. Гувернюк, С.В., Численное и физическое моделирование ветрового воздействия на группу высотных зданий / С.В. Гувернюк, О.О. Егорычев, С.А. Исаев, Н.В. Корнев, О.И. Поддаева // Научно-технический журнал. Вестник МГСУ. - 2011. - Т. 1, № 3. - С. 185-191

61. Гусев, А.А. Об оценке сейсмической опасности для города Петропавловска-Камчатского на основе набора сценарных землетрясений / А.А. Гусев, Л.С. Шумилина, К.Н. Акатова // Электрон. науч.-информ. журнал «Вестник ОГТГГН РАН». - 2005. - № 1 (23). - С. 1-22.

62. Дашевский, М.А. Определение частот собственных колебаний многоэтажных зданий периодической структуры / М.А. Дашевский, В.Л. Мондрус, С.Н. Шутовский // Вестник МГСУ. Москва. - 2012. - №2. - С. 35-40.

63. Дронг, В.И. Курс теоретической механики: учебник для вузов / В.И. Дронг, В.В. Дубинин, М.М. Ильин [и др.]. - 5-е издание. - М: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2017. - 580 с.

64. Егупов, К.А. Метод построения крутильно-поступательных форм собственных колебаний многоэтажных зданий / К.А. Егупов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. - 2012. - № 27. - С. 69–76.

65. Елистратов В.В. Ветроэнергетические установки – архитектурный элемент здания / В.В. Елистратов, Д.М. Боброва // Архитектура и современные информационные технологии. 2013. № 2 (23). С. 8.

66. Еремеев, П.Г. Современные стальные конструкции большепролетных покрытий уникальных зданий и сооружений [Текст]: монография / П.Г. Еремеев. - М.: АСВ, 2009. - 336 с.

67. Ерофеев, В.И. Влияние поврежденности материала на эволюцию акустической волны / В.И. Ерофеев, Е.А. Никитина, П.А. Хазов // Приволжский научный журнал. Нижний Новгород. - 2015. - № 2. - С. 32–42.

68. 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.

69. Ерофеев, В.И. Волновая динамика деформируемых систем, взаимодействующих с упругоинерционными и неоднородными основаниями: монография / В.И. Ерофеев, Д.А. Колесов, А.С. Плехов, П.А. Хазов. - Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2018. - 128 с.

70. Ерофеев, В.И. Динамическое поведение балки, лежащей на обобщенном упругом основании, с движущейся нагрузкой / В.И. Ерофеев, Е.Е.

Лисенкова, И.С. Царев// Прикладная математика и механика. - 2021.- Т.85, №2.- С.193-209.

71. 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.

72. Ерофеев, В.И. Математические модели крутильных колебаний стержней, учитывающие геометрическую нелинейность / В.И. Ерофеев, В.В. Кажаев, А.С. Плехов, Н.П. Семерикова // Вестник научно-технического развития. - 2017. - № 8 (120). - С. 10-18.

73. Ерофеев, В.И. Распределенный поглотитель изгибных колебаний балки / В.И. Ерофеев, Е.Е. Лисенкова, Д.В. Монич // Проблемы машиностроения и автоматизации. - 2022. - № 3. - С. 141-146.

74. 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.

75. Ерофеев, В.И. Центробежный маятниковый динамический гаситель колебаний роторных систем / В.И. Ерофеев, А.О. Мальханов, Г.Я. Пановко, В.М. Сандалов // Проблемы машиностроения и автоматизации. - 2021. - № 2. - С. 99-106.

76. 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.

77. Ерофеев, В.И., Продольные и крутильные колебания стержней из разномодульных материалов / В.И. Ерофеев, С.А. Моничев // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 1999. - № 1. - С. 3.

78. Жунусов, Т.Ж. Основы сейсмостойкости сооружений. Прикладной курс: учеб. пособие для вузов / Т. Ж. Жунусов. - Алма-Ата: Рауана, 1990. - 270 с.
79. Захаров, Ю.Н. О нестационарных решениях в задачах гидродинамики со стационарными краевыми условиями / Ю.Н. Захаров, К.С. Иванов // Вычислительные технологии. - 2013. - Т. 18, № 1. - С. 24-33.
80. Иванова, В.С. Природа усталости металлов / В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев. - М: Металлургия, 1975. - 456 с.
81. Иляхинский, А.В. Статистические модели в задачах зондирования / А.В. Иляхинский, Ю.С. Середа // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. - 1989. - Т. 32. № 12. - С. 1502-1505.
82. Касьянов, П.С. Сравнение аэродинамических характеристик, полученных по результатам компьютерного моделирования и натурных испытаний АСВП с АР / П.С. Касьянов, М.В. Кудин, А.В. Туманин, А.В. Февральских // Современные технологии в кораблестроительном и авиационном образовании, науке и производстве. Нижегород. гос. техн. ун-т. им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород. - 2016. - С. 238-244.
83. Качанов, Л.М. Основы механики разрушения / Л.М. Качанов. - М.: Наука, 1974. - 311 с.
84. Ким Д.А. Анализ ветрового воздействия на здания различных форм / Д.А. Ким, М.К. Зуева // Инженерный вестник Дона. 2022. № 10.
85. Клаф, Р. Динамика сооружений: пер. с англ. / Р. Клаф, Дж. Пензиен. - М.: Стройиздат, 1979. - 320 с.
86. Кожаринов, С.В. Динамика и сейсмостойкость зданий и сооружений / С.В. Кожаринов. - Душанбе: Дониш, 1980. - 224 с.
87. Коллинз, Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение / Дж. Коллинз. - М.: Мир, 1984. - 624 с.
88. Коренев, Б.Г. Справочник по динамике сооружений / Б.Г. Коренев, И.М. Рабинович. - М.: Стройиздат, 1972. - 511 с.

89. Корчинский, И.Л. Сейсмостойкое строительство зданий: учебное пособие / И.Л. Корчинский, Л.А. Бородин, А.Б. Гроссман [и др.]. - М.: Высш. шк., 1971. - 320 с.

90. Кофорова, О.М. Методы определения собственных частот многоэтажных зданий / Б. Б. Лампси, П. А. Хазов, О. М. Кофорова, А. А. Генералова // Вестник волжского регионального отделения российской академии архитектуры и строительных наук. Нижегор. гос. архитектур.- строит. ун-т. Нижний Новгород. - 2016. - № 19. - С. 176-180.

91. Крысов, С.В. Вынужденные колебания и резонанс в упругих системах с движущимися нагрузками: Уч. пособие. - ГГУ, 1985. - 72 с.

92. Кузнецов, Н.В. Теория скрытых колебаний и устойчивость систем управления / Н. В. Кузнецов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. - 2020. - № 5. - С. 5-27.

93. Куликов В.Г. Формализация автоматизации определения амплитудно-частотных характеристик элементов зданий / В.Г. Куликов, О.А. Стифеева, Г.Г. Белоусов, С.С. Куликов // Строительство и архитектура. 2023. Т. 11. № 4. С. 13. EDN: SWXBCS. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-4-13-13.

94. Куликов, А.Н. Расчет сооружений на сейсмические воздействия и ветровую нагрузку с пульсационной составляющей: учеб. пособие / А. Н. Куликов. - Волжский: ВГАСУ : ВолгГАСУ, 2008. - 91 с.

95. Лампси, Б.Б. Методы определения собственных частот многоэтажных зданий / Б.Б. Лампси, П.А. Хазов, О.М. Кофорова, А.А. Генералова // Вестник волжского регионального отделения российской академии архитектуры и строительных наук / Нижегор. гос. архитектур.-строит. ун-т. Нижний Новгород. - 2016. - № 19. - С. 176-180.

96. Лампси, Б.Б. Численное и физическое моделирование ветровых потоков на большепролетное покрытие / Б.Б. Лампси, С.С. Шилов, П.А. Хазов // Вестник МГСУ. - 2022. - Т. 17, № 1. - С. 21-31.

97. Литвинов, В.Л. Математическое моделирование и исследование колебаний одномерных механических систем с движущимися границами / В.Л.

Литвинов, В.Н. Анисимов. - Самара: Самарский государственный технический университет, 2017. - 149 с.

98. Литвинова, Э.В. Определение параметров динамических характеристик колебаний строительных конструкций, зданий и сооружений / Э.В. Литвинова // Строительство и техногенная безопасность. - 2017. - №9(61). - С.93-99.

99. Мкртычев, О.В. Сейсмические нагрузки при расчете зданий и сооружений / О.В. Мкртычев, А.А. Решетов. - М.: Изд-во АСВ, 2017. - 140 с.

100. Мущанов, В.Ф. Исследование аэродинамических коэффициентов провисающих мембранных покрытий инженерных сооружений // Металлические конструкции. В.Ф. Мущанов, А.В. Зубенко, А.А. Дроздов– Макеевка. - 2017. - №2, Т. 23. - С. 81-96.

101. Назаров, Ю.П. Теория и практика расчетов строительных сооружений на сейсмостойкость по акселерограммам / Ю.П. Назаров, Ю.Н. Жук, Е.В. Позняк, Ю.В. Панасенко, В.В. Курнавин // Тезисы докладов IX Российской национальной конференции по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию. - 2015. - С.131-132.

102. Никитина, Е.А. Определение частот и форм собственных и сейсмических колебаний многоэтажного здания гостиницы / Е.А. Никитина, П.А. Хазов, А.А. Генералова, Н.В. Санкина // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. - 2018. - №21. - С. 195-199.

103. Павленко, О.В. Моделирование акселерограмм землетрясения 13.11.1993 г. (MW=7.0, H=54 км) на сейсмостанциях «Петропавловск», «Институт вулканологии», «Никольская» (г. Петропавловск-Камчатский) / О.В. Павленко // Вестник Краунц. Науки о земле. Москва. - № 4. -С. 47-59.

104. Пановко, Я.Г. Устойчивость и колебания упругих систем / Я.Г. Пановко, Н.И. Губанова - М.: Наука, 1967. - 352 с.

105. Переверзев, Е.С. Модели накопления повреждений в задачах долговечности / Е.С. Переверзев. - Киев: Наукова думка, 1995. - 358 с.

106. Перминов Э.М. Ветроэнергетика: история, состояние, перспективы / Э.М. Перминов // Вестник Московского энергетического института. 2020. № 5. С. 11–26.
107. Поддаева, О.И. Архитектурно-строительная аэродинамика / О.И. Поддаева, А.С. Кубенин, П.С. Чурин. - М.: НИУ МГСУ, 2017. - 88 с.
108. Пригородов, А.В. Влияние параметров надежности и поврежденности на предрасположенность к аварии зданий и сооружений / А.В. Пригородов // Достижения науки и образования. - 2017. - №6. - С. 49-52.
109. Пшеничкин, А.П. Надежность и долговечность зданий в сейсмических районах / А.П. Пшеничкин, В.А. Пшеничкина // Известия вузов. Сер. "Строительство". -2000. - № 5. - С. 32-36.
110. Работнов, Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций / Ю.Н. Работнов. - М: Наука, 1966. - 752 с.
111. Рекомендации по оценке надежности строительных конструкций зданий и сооружений по внешним признакам. - М.: ЦНИИПромзданий, 2001. - 100 с.
112. Реттер, Э.И. Архитектурно-строительная аэродинамика: монография/ Э.И. Реттер. - М.: Стройиздат, 1984. - 294 с.
113. Ржаницин, А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / А.Р. Ржаницин. - М.: Стройиздат, 1978. - 239 с.
114. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра. - М.: Стройиздат, 1978 г. - 215 с.
115. Сабитов, К.Б. Начально-граничная задача для нелинейного уравнения колебаний балки / К.Б. Сабитов, А.А. Акимов // Дифференциальные уравнения. - 2020. Т. 56, № 5. - С. 632-645.
116. Савицкий, Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения / Г.А. Савицкий. - М.: Изд-во лит. по стр-ву, 1972. - 111 с.
117. Савович, М.К. Динамический расчет каркасных зданий: учеб. пособие/ М.К. Савович. - Ханты-Мансийск: Югорс. гос. ун-т., 2005. - 31с.

118. Саиян С.Г. Расчетные аэродинамические исследования комплекса Московского международного делового центра «Москва-Сити» при последовательном возведении зданий / С.Г. Саиян, А.М. Ефимова // Вестник МГСУ. 2024, № 19(6), С. 906-941.

119. 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.

120. 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.

121. 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. В 4-х томах. Санкт-Петербург, 2023. С. 428-431.

122. 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.

123. Сатанов, А.А. Исследование обтекания потоками воздуха уникального высотного здания методом аэродинамического эксперимента. / А.А.Сатанов, А.Д. Васин // В сборнике: XI Всероссийский Фестиваль науки. Сборник докладов. Редколлегия: Д.Л. Щёголев, И.С. Соболев, Д.В. Монич, А.А. Смыков [и др.]. Нижний Новгород. - 2021. - С. 1174-1178.

124. 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.

125. 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.

126. Сатанов, А.А. Современные методы неразрушающего контроля состояния материалов / А.А. Сатанов // В сборнике: VIII Всероссийский фестиваль науки. Сборник докладов. В 2-х томах. Под редакцией И.С. Соболя, Н.Д. Жилиной [и др.]. - 2018. - С. 68-71.

127. 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.

128. Сатанов, А.А. Сравнение результатов физического и численного моделирования распределения ветровой нагрузки на покрытие большепролетного здания. / А.А. Сатанов // В книге: XLVII Гагаринские чтения 2021. Сборник тезисов работ XLVII Международной молодёжной научной конференции. Москва. - 2021. - С. 1085-1086.

129. 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.

130. 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.

131. Сатанов, А.А. Экспериментальное исследование распределения ветрового давления на высотное здание уникальной формы / А.А. Сатанов, А.Д. Васин // Приволжский научный журнал. - 2021. - № 3 (59). - С. 38-46.
132. Середа, Ю.С. Основы диагностики и прогнозирования / Ю.С. Середа // Нижний Новгород: Изд. «Типография «Поволжье», 2005. - 188 с.
133. Симиу, Э. Воздействия ветра на здания и сооружения / Э. Симмиу, Р. Сканлан. - М.: Стройиздат, 1984. -360 с. Перевод изд.: WindEffectsonStructures / E. Simiu, R. Scanlan, 1978.
134. Смирнов, А.С. Оптимальное гашение свободных колебаний в линейных механических системах / А.С. Смирнов, Б.А. Смольников // Машиностроение и инженерное образование. - 2017. - № 3(52). - С. 8-15.
135. Смирнов, А.Ф. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений / А.Ф. Смирнов, А.В. Александров, Б.Я. Лещеников, Н.Н. Шапошников. - М.: Стройиздат, 1984. - 415 с.
136. СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. – М.: Стандартинформ, 2018. - 115 с.
137. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* - М.: Стандартинформ, 2016. - 105 с.
138. Стародубцева, Т.Н. Исследование влияния механического резонанса на сооружения / Т.Н. Стародубцева, Д.С. Кузнецов, А.Г. Князев, Е.Н. Петрова // Воронежский научно-технический вестник. Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова. Воронеж. – 2017. - № 1. - С. 95-102.
139. Сутягин, А.Е. Особенности определения расчетных параметров ветровой нагрузки на высотные здания / А.Е. Сутягин. // Высотные здания - 2012. - №5- С.134-139.
140. Сьянов, С.А. Вынужденные колебания и резонанс одномерных упругих систем с движущимися нагрузками: дис. канд. физ.-мат.наук. / С.А. Сьянов – Горький, 1987. - 144 с.

141. Тамуж, В.П. Микромеханика разрушения полимерных материалов / В.П. Тамуж, В.С. Куксенко. - Рига: Зинатне, 1978. - 294 с.
142. Тамуж, В.П. Расчет констант материала с повреждениями / В.П. Тамуж // Механика полимеров. - 1977. - № 5. - С. 838-845.
143. Тимошенко, С.П. Колебания в инженерном деле. // С.П. Тимошенко. - М.: Наука, 1967. - 341 с.
144. ТКП EN 1991-1-4-2009 Еврокод 1 Воздействия на конструкции. Часть 1-4. Общие воздействия. Ветровые воздействия.
145. Трянина, Н.Ю. Аэродинамическое воздействие на панельные антенны базовых станций / Н.Ю. Трянин, Е.Н. Облетов, И.А. Самохвалов // Приволжский научный журнал. - 2022. - № 1(61). - С. 23-30.
146. Углов, А.Л. Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации / А.Л. Углов, В.И. Ерофеев, А.Н. Смирнов; отв. Ред Ф.М. Митенков; Нижегород. фил. Ин-та машиностроения им А.А. Благонравова РАН. -М.: Наука, 2009. - 297с.
147. Февральских А.В. Численное исследование аэродинамики бортового ограждения воздушной подушки в составе компоновки экраноплана / А.В. Февральских // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. - 2019. - № 60 (60). - С. 113-121.
148. Февральских А.В. Численное исследование аэродинамической интерференции стартовой системы поддува и крыла экраноплана / А.В. Февральских // Труды Крыловского государственного научного центра. - 2019. - № 3(390). - С. 117-124.
149. Февральских А.В. Численное исследование влияния удлинения крыла на характеристики движения под действием экранного эффекта амфибийного судна на воздушной подушке с аэродинамической разгрузкой / А.В. Февральских // Известия Калининградского государственного технического университета. - 2019. - № 53. - С. 182-192.

150. Филиппов А.П. Воздействие динамических нагрузок на элементы конструкций. / А.П. Филиппов, С.С. Кохманюк, Ю.С. Воробьев // Киев: Наукова думка, 1974. - 174 с.

151. Филиппов А.П. Колебания деформированных систем. // А.П. Филиппов. - М.: Машиностроение, 1970. - 734 с.

152. 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.

153. Хазов П.А. Влияние характеристик упругого основания на частоты и формы собственных колебаний многоэтажного здания / П.А. Хазов, О.М. Кофорова // Процессы в геосредах. Москва. - 2016. - № 8. -С. 47-51.

154. Хазов П.А. Вынужденные колебания каркасного здания при динамических воздействиях штормовой и сейсмической нагрузок / П.А. Хазов, Е.А. Никитина // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Сборник трудов. В 4-х томах / Башкирский гос. ун-т. Уфа. - 2019. - С.410-412.

155. 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.

156. Хазов П.А. Компьютерное моделирование аэродинамического обтекания комплекса уникальных зданий / П.А. Хазов // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2024. – №6 – С. 23-30.

157. Хазов П.А. Методика математического моделирования синтезированных анемодиаграмм для аэродинамического расчета конструкций / П.А. Хазов, А.К. Ситникова, А.А. Сатанов, А.П. Помазов // Жилищное строительство, 2025, №3. С. 39-44.

158. Хазов П.А. Методология цифровой поддержки и компьютерного моделирования динамических процессов [Текст]: дис. докт. техн. наук 2.5.1: защищена 27.05.2025 / Хазов П.А. – Нижний Новгород, 2025. – 345 с.

159. 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.

160. Хорошун, Л.П. Методы теории случайных функций в задачах о макроскопических свойствах микронеподнородных сред / Л. П. Хорошун // Прикладная механика. - 1978, - № 2. - С. 3-17.

161. Чигринская, Л.С. Сейсмостойкость зданий и сооружений: учеб. пособие / Л.С. Чигринская; Ангар. гос. техн. акад. - Ангарск: Изд-во АГТА, 2009. - 107 с.

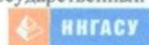
162. ЭВМ программа. Определение собственной частоты механической системы с известными жесткостными параметрами / Хазов П.А., Сатанов А.А., Ситникова А.К., Васина Л.Ю. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2025610352, 10.01.2025. Заявка № 2024691111 от 18.12.2024.

163. ЭВМ программа. Генератор расчетных анемограмм / 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.

164. Яблонский, А.А. Курс теоретической механики Т.1. Статика. Кинематика. Т.2. Динамика / А.А. Яблонский, В.М. Никифорова. 15-е изд., стер. - М.: КноРус, 2010. - 608 с.

Приложение А. Акты внедрения

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
доцент, доктор технических наук



Д.В. Монич

«15» января 2025 г.

№ 01/25 от «15» января 2025 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертации Сатанова Андрея Андреевича «Динамика многомассовых систем, взаимодействующих с аэродинамическими потоками: эксперимент и численное моделирование», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.7. – Теоретическая механика и динамика машин, были успешно 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».

Заведующий лабораторией
«Непрерывный контроль технического
состояния зданий и сооружений»,
кандидат технических наук, доцент

Хазов Павел Алексеевич

603002, Нижегородская область, г. Нижний Новгород, ул. Должанская, д. 37, офис 205,
+7 (920) 018-18-13

**ООО «АТОМЭЛЕКТРОПРОЕКТ»,
603002, обл. Нижегородская, г. Нижний
Новгород, ул. Должанская, д. 37, оф. 205
+7 (920) 018-18-13**

**СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ
САТАНОВА АНДРЕЯ АНДРЕЕВИЧА, ПРЕДСТАВЛЕННОЙ НА
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ
НАУК**

Настоящим подтверждаем внедрение в проектный процесс организации
следующих результатов диссертации:

1. Методика определения частот собственных колебаний
многомассовых систем и разработанная на её основе программа для ЭВМ
(свидетельство о регистрации № 2025610352 от 10.01.2025)
2. Результаты компьютерного и физического моделирования
аэродинамического обтекания геометрических примитивов.
3. Программа «Генератор расчетных анемодиаграмм» (свидетельство о
регистрации № 2024689881 от 13.12.2024)

Эксперт: Управляющий
компания

Лудин Павел Александрович



подпись

20 25 г.

Приложение Б. Свидетельства о регистрации объектов интеллектуальной
собственности

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2024690234

«Генератор расчетных анемодиаграмм»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» (RU)*

Авторы: *Хазов Павел Алексеевич (RU), Сатанов Андрей Андреевич (RU), Помазов Артём Павлович (RU), Помазов Степан Павлович (RU), Симонов Александр Вячеславович (RU)*

Заявка № **2024689881**
Дата поступления **06 декабря 2024 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **13 декабря 2024 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности


Ю.С. Zubov

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025610352

«Определение собственной частоты механической системы с известными жесткостными параметрами»

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» (RU)**

Авторы: **Хазов Павел Алексеевич (RU), Сатанов Андрей Андреевич (RU), Ситникова Анна Константиновна (RU), Васина Лидия Юрьевна (RU)**

Заявка № 2024691111

Дата поступления 18 декабря 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 10 января 2025 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов