На правах рукописи

Кахоров Комилджон Кахорович

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РАЗОМКНУТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОБОЛОЧЕК

Специальность 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» на кафедре «Строительство и архитектура»

Научный руководитель: **Сысоев Олег Евгеньевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Строительство и архитектура» ФГБОУ ВО «КнАГУ».

Официальные оппоненты: **Козлов Владимир Анатольевич**, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой «Строительная механика» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж.

Цимбельман Никита Яковлевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Гидротехника, теория зданий и сооружений» ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», г. Владивосток

Ведущая организация: Институт физико-технических проблем Севера имени В. П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

Защита диссертации состоится «__10___» ___февраля_____ 2022 г. в _15:00__ часов на заседании диссертационного совета 24.2.316.01 в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, ауд. 201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» на сайте www.knastu.ru.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах (заверенных печатью утверждения) просим прислать по адресу: 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27/1, на имя ученого секретаря диссертационного совета, e-mail: diss@knastu.ru.

Автореферат разослан «_____» _____2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.316.01
кандидат физико-математических наук А.Л. Григорьева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Тонкостенные цилиндрические разомкнутые оболочки широко используются при проектировании и строительстве концертных залов, спортивных сооружений, требующих большепролетных безопорных помещений.

Актуальность использования конструкции оболочных форм обусловлена экономической эффективностью, за счет хорошего соотношения площади ограждающих конструкций и внутреннего объема здания, а также ажурностью архитектурных форм. Но при этом тонкостенные оболочки чувствительны к динамическим воздействиям, которые могут вызвать колебания и разрушение конструкций.

В процессе эксплуатации оболочечные конструкции испытывают кратковременные нагрузки циклического характера: ветровое воздействие, снег, вибрации от оборудований и другое, вызывающие вынужденные колебания конструкции, которые становятся причиной запуска внутренних динамических механизмов, изменяющих собственные колебания конструкции. При совпадении частот вынужденных и собственных колебаний амплитуда колебаний конструкций резко увеличивается, возникает явление резонанса, что приводит к разращению несущих конструкций зданий. Часто на оболочечных конструкциях размещаются присоединённые массы в виде: спутниковых антенн, кондиционеров, световых фонарей, солнечных батарей, водяных коллекторов и другого оборудования. Присоединенные массы изменяют напряженно-деформируемое состояние конструкций, что также приводит к изменению параметров частот колебаний оболочек и явлению резонанса.

Перечисленные факторы приводят к многочисленным разрушениям зданий и сооружений. Для предотвращения таких подобных техногенных катастроф возникает необходимость создания систем безопасности, которые должны предотвращать явления резонанса в тонкостенных цилиндрических разомкнутых оболочках. Учитывая, что большое количество зданий оболочечного типа выполнены из железобетона, ортотропного материала, необходимо уделить этому особое внимание.

Таким образом, несмотря на имеющиеся определенные результаты решения этой проблемы, вопросы динамической устойчивости тонкостенных железобетонных разомкнутых оболочек к внешним воздействиям до сих пор изучены недостаточно, что говорит о своевременности и актуальности настоящей диссертационной работы.

Степень разработанности темы диссертации. Исследованием свободных и вынужденных колебаний оболочек занимались многие советские и российские ученые: Ю.Б. Борисов, В.З. Власов, Т.К. Варадан, А.Л. Галченко, Э.И. Григолюка, В.М. Даревский, В.Д. Кубенко, Г.С. Лейзерович, А.И. Лиходед, А.А. Малинин, Х.М. Муштари, В.В. Новожилов, Н.А. Тарануха, С.П. Тимашенко, а также и зарубежные ученые: H. Aron, F. Alijani, E.F.F. Chladni, H.J. Donnell, F. Dischinher, M.G. Huber, A. Farshidianfar, A.E.H. Love, M. Amabili, S.C. Kattimani, T.H. Lee, R.S. Lew, N.J. Mallon, E. Reissner, W. Soedel. Данные исследователи внесли огромный вклад в развитие расчетных алгоритмов конструкций оболочных форм, используемых во всех сферах промышленности, они разработали модели расчета динамического поведения замкнутых и разомкнутых оболочек с учётом неправильности форм и присоединённых масс.

Теоретический метод расчёта тонкостенных цилиндрических оболочек на динамическую устойчивость приведен в статьях и монографиях А.Л. Амбарцумяна, В.З. Власова, В.А. Болотина и других учёных, но в этих моделях не учитываются ортотропность материала и наличие армирования в железобетонных и композиционных материалах оболочек при воздействии статистических и динамических нагрузок. Также мало представлено данных, подтверждающих математические модели. Недостаточно глубоко изучен вопрос влияния сочетания внешних нагрузок, изменяющих напряжённо-

деформированное состояние оболочечных конструкций, на динамические колебания, которые оказывают существенное влияние на безопасность эксплуатации здания и сооружения.

Цель диссертации: установление влияния модуля упругости различных классов бетона и коэффициента армирования, с учетом воздействия присоединённой массы, на свободные и вынужденные колебания тонкостенной цилиндрической разомкнутой железобетонной оболочки.

Задачи исследования:

– разработать уточненную математическую модель расчёта динамики поведения тонкостенной цилиндрической железобетонной оболочки с учётом воздействия нагрузок, учитывающих класс бетона и процент его армирования;

– аналитически и численно исследовать влияние класса бетона и процента армирования на свободное колебание тонкостенных цилиндрических разомкнутых оболочек;

– получить теоретические зависимости частоты собственных колебаний оболочек от количества полуволн с учётом процента армирования и класса бетона оболочек;

– получить экспериментальные зависимости частот вынужденных колебаний тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек при разном классе бетона и процента армирования;

– экспериментально исследовать пространственную конструкцию оболочки для получения зависимости частотных спектров вынужденного колебания оболочек при различных классах бетона и процента армирования;

– спроектировать и создать испытательный стенд для исследования свободных и вынужденных колебаний тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек;

– разработать систему для мониторинга и устройства гашения резонансных явлений в тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочках с целью повышения устойчивости здания и сооружения.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель для исследования свободных и вынужденных колебаний тонкостенной цилиндрической разомкнутой железобетонной оболочки, несущей малую присоединению массу или находящейся под воздействием динамической нагрузки.

2. Результаты численных зависимостей свободных колебаний тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек при воздействии внешней нагрузки.

3. Результаты экспериментальных данных влияния класса бетона и процента армирования на процесс динамического поведения тонкостенной цилиндрической железобетонной оболочки.

4. Разработка системы мониторинга динамики тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек.

Научная новизна результатов диссертации.

1. Разработана математическая модель для расчёта колебаний тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек с использованием усредненного модуля упругости, учитывающая процент армирования железобетона при воздействии динамических нагрузок.

2. Получены численные характеристики свободных колебаний тонкостенных цилиндрических железобетонных разомкнутых оболочек при различных классах бетона

3. Установлены численные характеристики свободных колебаний тонкостенных цилиндрических железобетонных разомкнутых оболочек при различном проценте армирования.

4. Выявлены экспериментальные зависимости значимости влияния различных классов бетона на вынужденные колебания тонкостенных цилиндрических железобетонных разомкнутых оболочек.

5. Получены экспериментальные зависимости влияния процента армирования на вынужденные колебания тонкостенных цилиндрических железобетонных разомкнутых оболочек.

Теоретическая значимость результатов.

1. Заключается в уточнении существующей математической модели, которая позволяет решать задачи расчёта окружного колебания тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек с учётом ортотропности материала, при воздействии динамических нагрузок.

2. Получены в диссертации новые теоретические, численные и экспериментальные результаты вынужденных и свободных колебаний тонкостенных цилиндрических разомкнутых оболочек.

3. Определено влияние класса бетона и процента армирования на динамическую устойчивость тонкостенных разомкнутых оболочек.

4. Выявлено влияние количества полуволн при изучении динамического поведения оболочек.

5. Получена математическая модель для расчёта свободных колебаний оболочек с учётом ортотропности материала.

6. Получены зависимости частот свободных колебаний от количества поперечных полуволн ***«n»*** при различных классах бетона (от В15 до В40) и процентах армирования тонкостенных цилиндрических разомкнутых оболочек.

7. Получены зависимости частот вынужденных колебаний при различных классах бетона и процента армирования.

Практическая значимость диссертации. Результаты исследования дают возможность определить влияние класса бетона и процента армирования на свободные и вынужденные колебания тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек, несущих малую присоединённую массу:

– разработана оригинальная установка для экспериментальных исследований разомкнутых оболочек и пластин на динамическую устойчивость при воздействии внешних нагрузок;

– разработана программа для ЭВМ, позволяющая проводить мониторинг за состоянием конструкций оболочечных форм на их динамическую устойчивость;

– разработана система безопасности для мониторинга свободных и вынужденных колебаний эксплуатируемых тонкостенных цилиндрических оболочек и предотвращения техногенных катастроф;

– разработано устройство для возбуждения механического колебания противофазе к возникающим колебаниям в тонкостенной цилиндрической разомкнутой оболочке;

– разработана методика и установлены критерии автоматического включения устройства возбуждения механического колебания для каждого класса бетона тонкостенных цилиндрических оболочек;

– результаты диссертации были изучены ГУП «Научно-исследовательский институт «Строительство и Архитектура» Республики Таджикистан и внедрены для использования при проектировании здания и сооружения для расчетов конструкций на сейсмические воздействия. Также результаты используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «КнАГУ» при чтении лекций для кафедры «Строительства и Архитектура» и других технических факультетов.

Личный вклад. Все теоретические положения, численные расчёты и экспериментальные исследования в диссертации получены соискателем самостоятельно.

Обоснование и достоверность: надёжность и достоверность описанного в диссертации механизма динамической устойчивости тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек выполнены в рамках вариационной формулировки задачи – вариационного принципа, уравнение движения пологих оболочек и пластин, а также уточнена модель Рейснера для определения частотных колебаний тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек. Численные исследования выполнены с помощью зарегистрированной программы «ОСКОСМ 2017», а также экспериментально выполнены с помощью сертифицированных и апробированных устройств: спектрометра «NEX CG Rigaku», «вихретокового пробника «Zet701», анализатора спектра колебаний и семейства программ «ZetLAB».

Апробация результатов работы. Материалы работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на девяти международных и одной всероссийской конференциях: Materials Science Forum 945 MSF, pp. 299-304 DOI: 10.4028 /www.scientific.net/ MSF.945.299, 2018; Materials Science Forum 992 MSF, с. 59-65 DOI: 10.4028/ www.scientific.net /MSF.992.59. 2020; Lecture Notes in Networks and Systems 200, с. 450-457 DOI: 10.1007/978-3-030-69421-0_48; Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: материалы Международной научно-практической конференции, 2016-2018; Архитектура, строительство, землеустройство и кадастры на Дальнем Востоке в XXI веке: Материалы Международной научно-практической конференции, 2017-2018; Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 2019.

Диссертационная работа докладывалась и обсуждалась на научном семинаре института машиноведения и металлургии Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре.

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в журналах, входящих в Web of Science, Scopus, а также в журналах, входящих в перечень ВАК РФ. Основные результаты исследований опубликованы в 16 работах, в том числе в четырех статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, и девяти статьях РИНЦ; в трех журналах уровня цитирования Web Of Science; и Scopus. Получен один патент на полезную модель, а также одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов, списка использованной литературы из 131 источников. Исследовательская работа изложена на 116 страницах текста формата А4, включая 41 рисунков, 7 таблиц. В приложениях указаны свидетельства о регистрации одной программы и копия патента на полезную модель.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, сформулирована цель работы, перечислены задачи и основные положения, выносимые на диссертационную защиту.

В первой главе рассмотрены выполненные раннее исследования, а также проведенные эксперименты и состояния исследований динамики тонкостенных цилиндрических оболочек при разных факторах воздействия; колебания тонкостенной цилиндрической оболочки при воздействии присоединённой массы, указаны основные проблемы, сформулированы цели и задачи исследования.

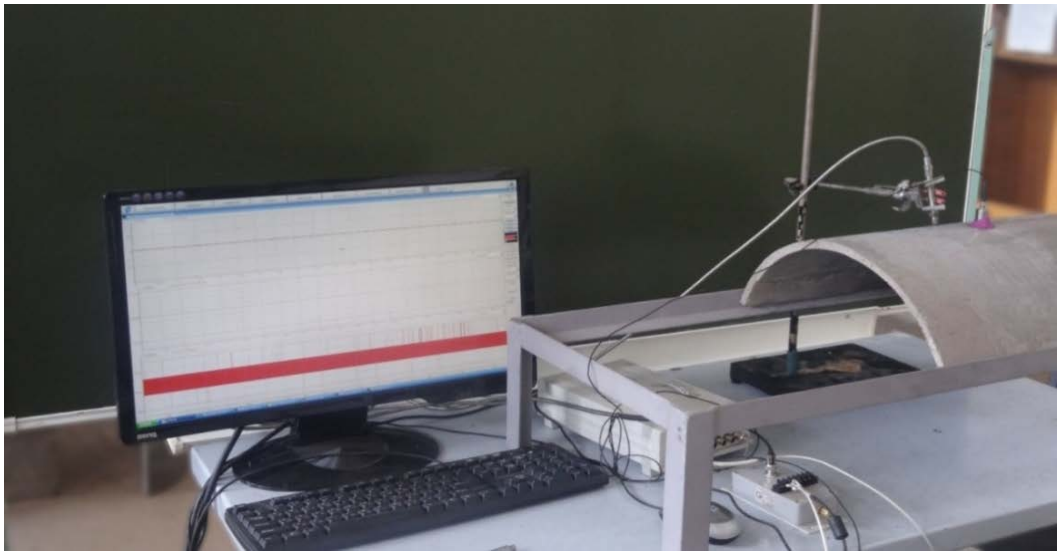
Исследованием колебаний оболочек занимаются уже многие десятилетия отечественные ученые: И.Я. Амиро, В.Н. Байков, В.В. Болотин, И.Г. Бубнов, Ю.Б. Борисов, В.З. Власов, А.С. Вольмир, Т.К. Варадан, Б.Г. Галеркин, А.Л. Гвоздеев, А.Л. Галечко, Э.И. Григолюка, В.М. Даревский, А.В. Забегаев, Е.А. Иванова, В.Д. Кубенко, И.Г. Кильдибеков, П.С. Ковальчук, Г.С. Лейзерович, А.И. Лиходед, А.А. Малинин, Х.М. Муштари, С.П. Тимошенко, Н.А. Тарануха, а также зарубежные ученые: H. Aron, M. Amabili, H.J. Donnell, M.G. Huber, A.H. Nilsen, I. Mirsky, E. Reissner, E.F.F. Chladni, W. Soedel и др.

Сделанный обзор анализа научной литературы показал, что, несмотря на обширный список трудов о динамической устойчивости оболочки, степени разрабатываемых отдельных задач, а также научно-исследовательских экспериментальных результатов, на сегодняшний день эти разработки не решают в полной мере проблем, которые возникают во время эксплуатации при воздействии динамических нагрузок от внешней среды.

Во второй главе изложены методика и программа проведения, описан испытательный стенд, позволяющий проводить экспериментальные исследования над оболочечными формами конструкций, изготовленными образцами тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек, необходимыми для получения достоверных анализов колебаний тонкостенных цилиндрических оболочек и влияния модуля упругости, а также коэффициента армирования на динамические колебания, сделаны выводы по полученным результатам проведённых экспериментов.

Для проведения экспериментального исследования в лабораторных условиях ФГБОУ ВО «КнАГУ» был спроектирован и создан испытательный стенд, состоящий из контактного датчика «Акселерометр ZetLab BC110», «Вихретокового пробника Zet701», Аналого-цифрового преобразователя (АЦП), Молотка «AU03» для возбуждения колебаний. Испытательный стенд позволяет проводить испытания над оболочками разомкнутой формы и пластинами, определять спектр вынужденных колебаний исследуемых образцов.

Испытательный стенд состоит (рисунок 1) из двух датчиков «ZetLab BC110» и «Вихретоковой пробник Zet701» для достоверности и сравнения полученных результатов.



1 – Вихретоковой пробник Zet701; 2 – Акселерометр ZetLab BC110;
3 – Аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 4 – персональный компьютер (ПК)
Рисунок 1 – Действующий экспериментальный стенд по исследованию конструкций

Механическое колебание создается механическим действием с помощью молотка «AU03», далее от датчиков импульс передаётся в Аналого-цифровой преобразователь (АЦП), который передает его на персональный компьютер (ПК) с помощью программного обеспечения «ZETLab», обрабатываются результаты, в итоге получается спектр частот вынужденных колебаний для каждого исследуемого образца. Схема по проведению испытательных исследований приведена на рисунке 2.

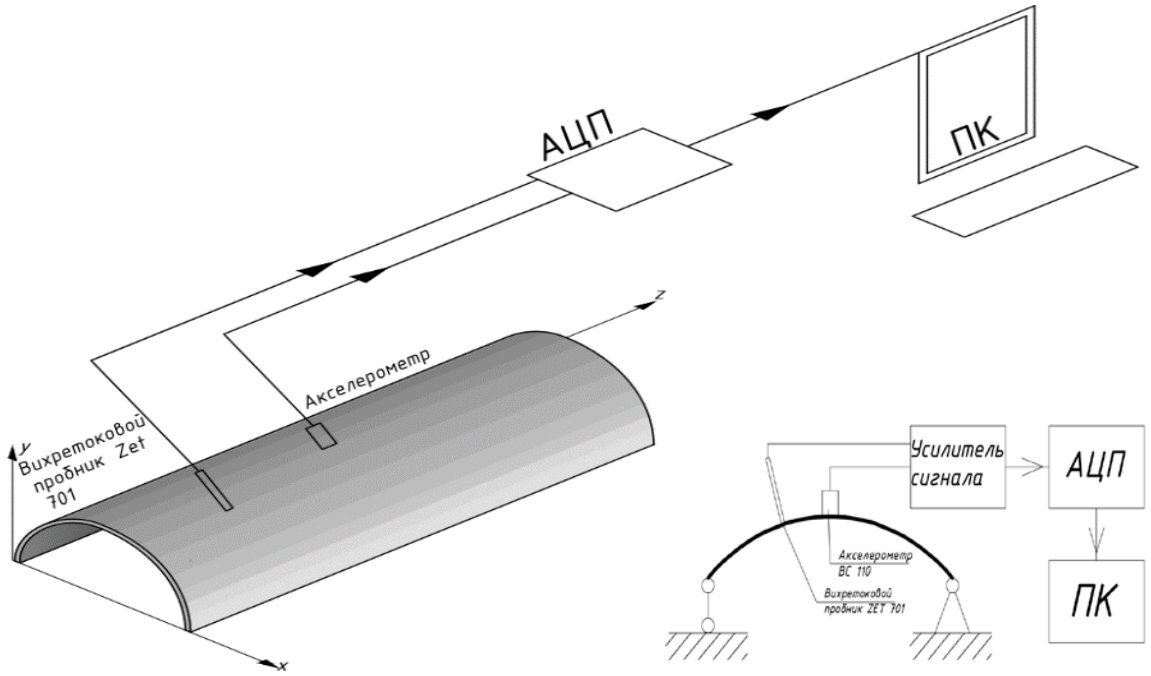


Рисунок 2 – Блок-схема экспериментального стенда при воздействии сосредоточенной нагрузки шарнирно-опёртой тонкостенной цилиндрической оболочки

Для определения динамической устойчивости тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек была составлена Программа по проведению экспериментальных исследований (таблица 1).

Таблица 1

Программа по проведению экспериментальных исследований					
Вид закрепления образцов		Шарнирная		Жесткая	
Воздействие присоединённой массы		Сосредоточенная масса		Сосредоточенная масса	
Процент армирования, %		2	5	2	5
Класс бетона	B15	+	+	+	+
	B20	+	+	+	+
	B30	+	+	+	+
	B40	+	+	+	+

С помощью разработанной методики программы проведений экспериментальных исследований, которая включает исследование воздействия присоединённой массы, видов закреплений, процента армирования и класса бетона испытуемых образцов, были проведены экспериментальные исследования образцов с размерами в плане длиной

L = 800 мм, шириной b = 400 мм, радиусом R = 160 мм, толщиной стенки δ = 10 мм с целью определения спектров вынужденных колебаний для каждого образца тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек (рисунки 3 – 4).

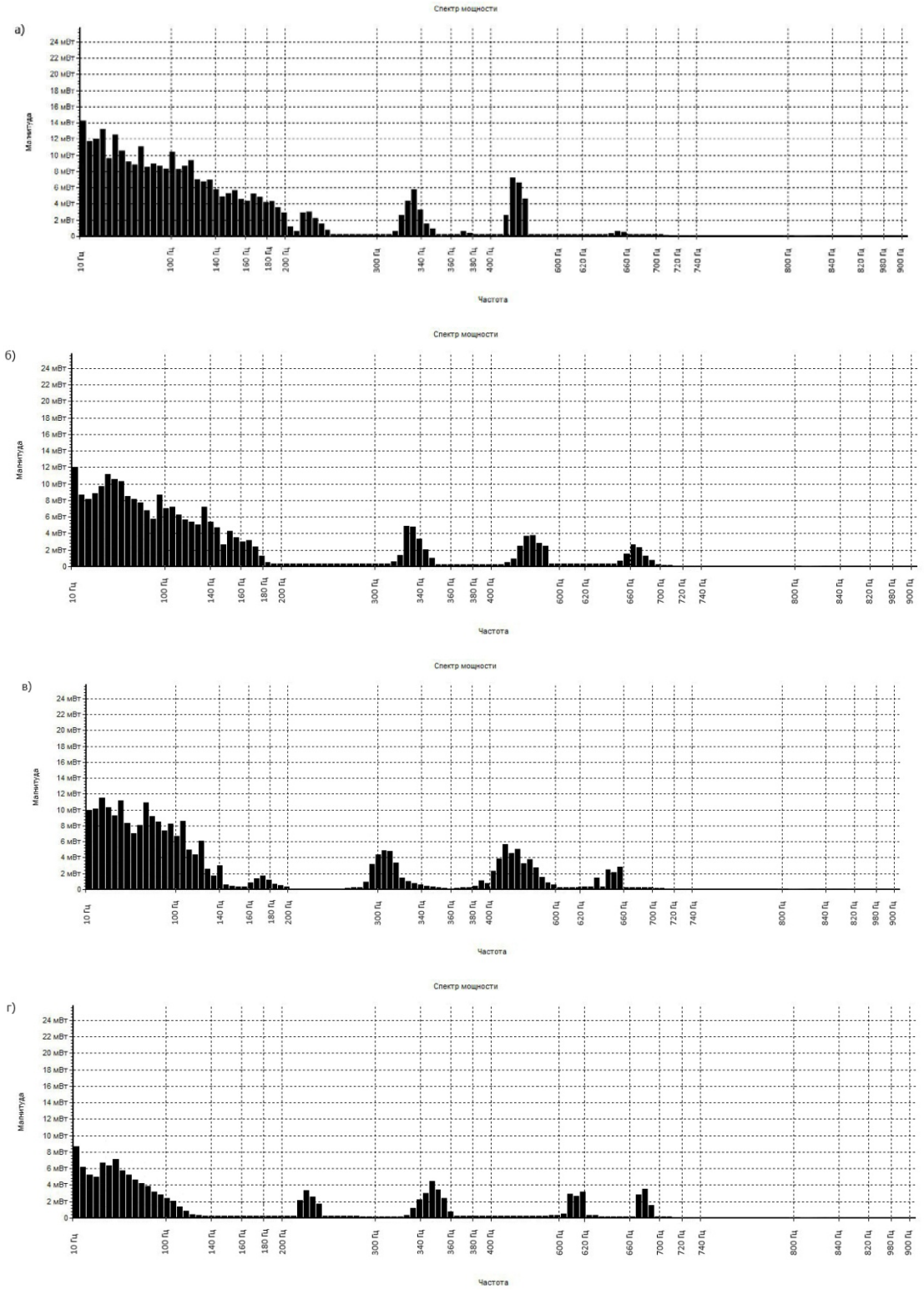


Рисунок 3 – Диаграммы частотных спектров вынужденных колебаний тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек при 2 % армирования:
а – В15; б – В20; в – В30; г – В40

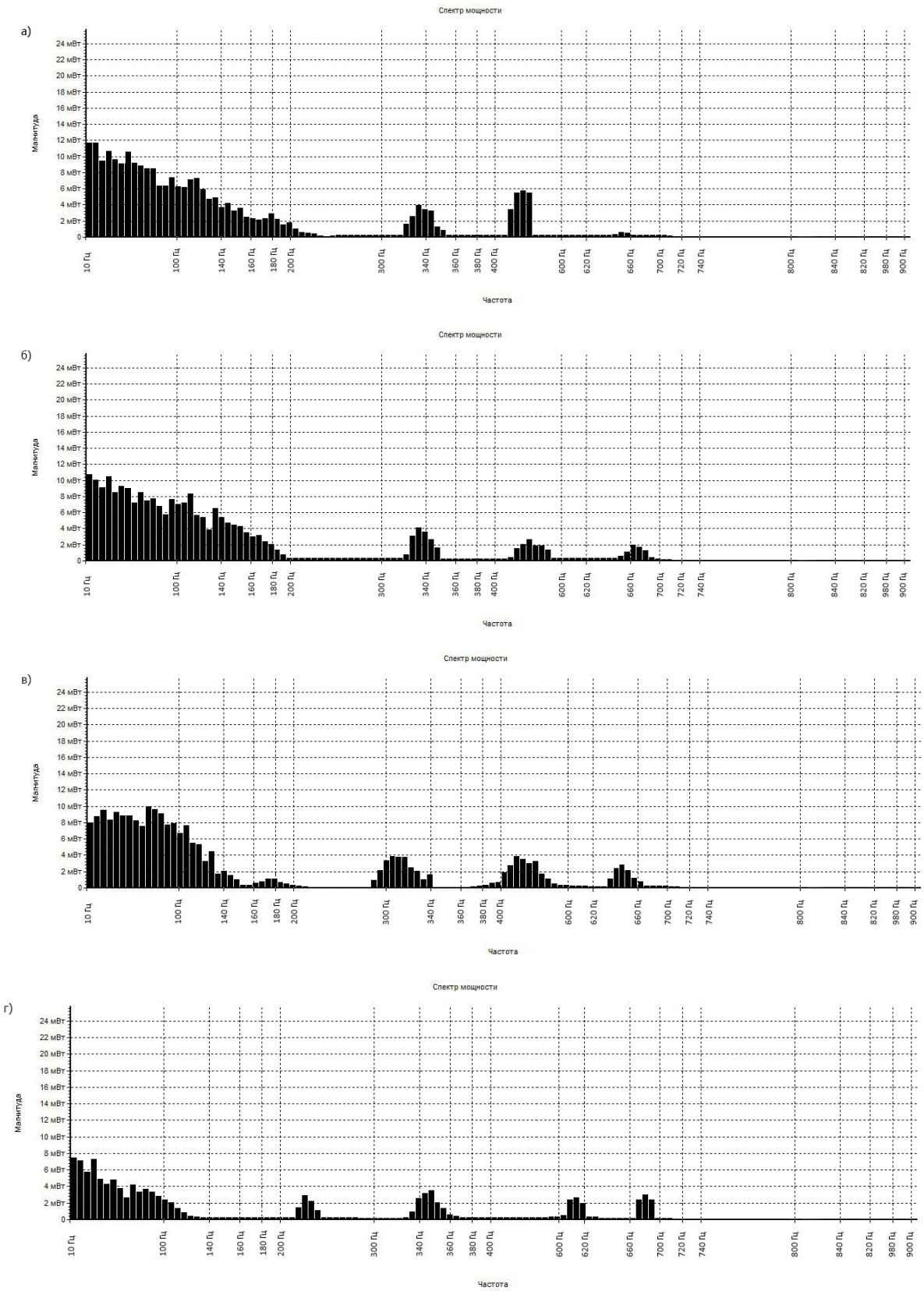


Рисунок 4 – Диаграммы частотных спектров вынужденных колебаний тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек при 5 % армирования:
а – В15; б – В20; в – В30; г – В40

Из исследования 4%-ных образцов (см. рисунок 3) анализируются большие магнитуды в начальных частотах с 10 до 100 Гц. Если посмотреть диаграммы, то с ростом класса бетона образцов уменьшается магнитуда с 14,4 до 8,8 мВт. В средних частотах до 700 Гц периодично появляются магнитуды разной мощности. Для исследования эффективности процента армирования были испытаны образцы при 5 % армирования.

Из результатов 5%-ных образцов на вынужденное колебание процесс ещё усугубляется. При сравнении исследуемых образцов в начальных частотах с 10 до 100 Гц уменьшилась начальная магнитуда колебаний в образцах, но в средних частотах также сохранились выплески малой мощности, чем на 2%-ных. С увеличением процента армирования замечается в первую очередь уменьшение показателя частот от 3-5 % и сокращается диапазон вынужденных колебаний в каждом образце.

При изготовлении образцов процент армирования принят в зависимости от площади поперечного сечения оболочки, а во время аналитических расчётов процент армирования выполнен следующим образом.

Площадь сечения рабочей арматуры определяется следующим образом:

$$Tk = F_{\text{а.п.}} \cdot \sigma_{\text{п.п.}} + F_{\text{а.н.}} \cdot \sigma_{\text{т}}, \tag{1}$$

где k – коэффициент запаса прочности ($k = 2{,}5$); $\sigma_{\text{п.п.}}$ – предел прочности рабочей арматуры; $F_{\text{а.н.}}$ – площадь сечения арматуры.

$$F_{\text{а.н.}} = \frac{Tk - F_{\text{а.п.}} \cdot \sigma_{\text{т}}}{\sigma_{\text{п.п.}}}. \tag{2}$$

Величина работы арматуры на сжатие вычисляется из условия равенства деформации сердечника «$\varepsilon_{\text{а}}$» и «$\varepsilon_{\text{б}}$» по закону Гука

$$\frac{\sigma_{\text{а.н.}}}{E_{\text{а}}} = \frac{\sigma_{\text{б}}}{E_{\text{б}}}; \sigma_{\text{а.н.}} = \frac{E_{\text{а}}}{E_{\text{б}}}\sigma_{\text{б}}, \tag{3}$$

где $E_{\text{а}}$ – модуль упругости арматуры; $E_{\text{б}}$ – модуль упругости бетона.

$$\sigma_{\text{б}} = \frac{E_{\text{а}} \cdot \sigma_{\text{а.н.}}}{E_{\text{б}} + nFe}, \text{ отсюда } \sigma_{\text{б}} = \frac{\mu_{\text{п}}}{1 + n\mu_{\text{н}}}\sigma_{\text{а.н.}}, \tag{4}$$

где $\mu_{\text{н}}$ – коэффициент армирования.

Исходя из процента армирования, определяем минимальную толщину разомкнутой железобетонной оболочки по уравнению

$$\delta_{min} = 3{,}25\frac{T}{\sigma_{\text{б}}}. \tag{5}$$

Численные исследования динамического поведения колебания тонкостенных цилиндрических оболочек будут производиться в соответствии с требованиями «δ_{min}».

В третьей главе численное исследование механизма динамического поведения колебания тонкостенных разомкнутых железобетонных оболочек проведено с помощью уравнения движения, методов Бубнова-Галеркина и Д'Аламбера. С помощью перечисленных методов определены величины частот колебаний тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек под воздействием внешней нагрузки.

Для определения параметров колебаний тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек необходимо выявить величины напряжения и деформации. Немаловажно отметить, что выявления значимости класса бетона и процента армирования на колебательные показатели также были учтены в соответствии с экспериментальными и аналитическими данными.

Первоначальные исследования производились с помощью уравнений движения теории пологих оболочек и пластин

$$\frac{D}{h}\nabla^4 w = \frac{1}{R}\cdot\frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2} - \rho\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \frac{M}{h}\delta(x-x_0, y-y_0)\frac{\partial^2 w}{\partial t^2};$$
$$\frac{1}{E}\nabla^4\Phi = -\frac{1}{R}\cdot\frac{\partial^2 w0}{\partial x^2}, \quad (6)$$

где D – цилиндрическая жёсткость оболочки, $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$; Φ – функции динамических напряжений в средней поверхности оболочки, зависимые от (x, y, t); h, δ – толщина конструкции (оболочки); M – малая присоединённая масса; R – радиус цилиндрической оболочки; t – время; ρ – плотность железобетонной оболочки; w – динамический прогиб.

Стоит отметить, что в расчётах используется усреднённый модуль упругости, который определяется в зависимости от поперечного сечения тонкостенной цилиндрической оболочки (рисунок 5), исходя из которого подбирается необходимая рабочая арматура в соответствие допустимой толщине оболочки. Также стоит отметить, что вид армирования (ортотропное, изотропное) не учитывается в математической модели и испытательных образцов.

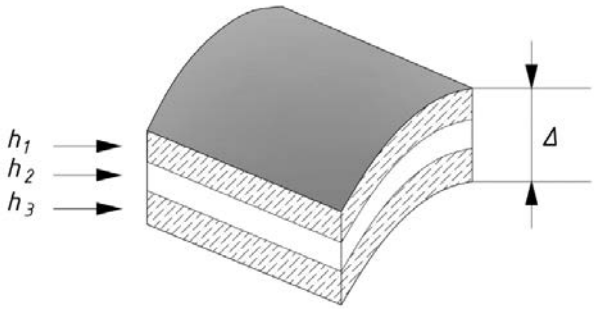


Рисунок 5 – Фрагмент разомкнутой оболочки со слоями

$$E_{\text{ср}} = \frac{1-\upsilon^2}{\Delta}\sum_{k=1}^{3}\frac{E_k h_k}{1-\upsilon_k^2}, \quad (7)$$

$$\Phi(x,y,t) = [\Phi_1(t)sin\beta y + \Phi_2(t)cos\beta y + \Phi_3(t)]sin\alpha x. \quad (8)$$

В этом уравнении искомые функции $\Phi_1(t) = \frac{E_{\text{ср}}\alpha^2}{R(a^2+\beta^2)^2}f_1, \Phi_2(t) = \frac{E_{\text{ср}}\alpha^2}{R(a^2+\beta^2)^2}f_2, \Phi_3(t) = \frac{E_{\text{ср}}\alpha^2}{R\alpha^2}f_3(t), \alpha = \frac{m\pi}{L}, \beta = \frac{n}{R}$, m, n – число полуволн в продольном и поперечном направлениях.

При получении уравнений необходимо учитывать граничные условия, которые зависят от вида закрепления. Оперения разомкнутой оболочки производятся по краям конструкции. Рассмотрим наиболее характерные случаи закрепления оболочки:

– свободный край

$$N_\alpha = T = H = 0;\ M_\alpha = 0$$

или

$$N_\beta = T = H = 0;\ M_\beta = 0;$$

– шарнирный, неподвижно опёртый край

$$M_\alpha = 0; u = v = w = 0;$$

– шарнирный, свободный в нормальном направлении край

$$M_\alpha = 0; Q_\alpha = 0; u = 0; v = 0;$$

– неподвижный край

$$u = v = w = 0.$$

При решении полученных уравнений можно воспользоваться методом перемещений и методом сил. Каждый из этих методов используется при разных поставленных задачах, но для более простого решения статистических задач применяют метод сил, где к трем уравнениям равновесия добавляются три уравнения неразрывности, в итоге получится шестизначное дифференциальное уравнение восьмого порядка.

При решении динамических задач нужно подставить граничные условия в динамическую конечную модель с помощью метода Бубнова-Галёркина. В результате можно определить изгибные и радиальные колебания тонкостенной цилиндрической разомкнутой железобетонной оболочки.

$$\left.\begin{aligned} \ddot{a}_1 + a_1 + \frac{4M}{M_0}[\ddot{a}_1 sin^2\beta y_0 + \ddot{a}_2 cos\beta y_0 sin\beta y_0 + \ddot{a}_3 sin\beta y_0]sin^2 a x_0 = 0 \\ \ddot{a}_2 + a_2 + \frac{4M}{M_0}[\ddot{a}_1 sin^2\beta y_0 cos\beta y_0 + \ddot{a}_2 cos\beta y_0 + \ddot{a}_3 cos\beta y_0]sin^2 a x_0 = 0 \\ \ddot{a}_3 + \left(\frac{p}{\omega_n}\right)^2 a_3 + \frac{2M}{M_0}[\ddot{a}_1 sin\beta y_0 + \ddot{a}_2 cos\beta y_0 + \ddot{a}_3]sin^2 a x_0 = 0 \end{aligned}\right\} \quad (9)$$

В уравнении (3) $p^2 = 1 + {\varepsilon\theta^4}/{12(1-\mu^2}$ – квадрат безразмерной частоты радиальных колебаний оболочки (без малой присоединённой массы); $\varepsilon = n^2(h/R)^2$ и $\theta = \pi R/(nL)$ – параметры волнообразования от толщины «δ, h» и от длины «L» оболочки; $\ddot{a}_1, \ddot{a}_2, \ddot{a}_3$ – безразмерные амплитуды колебаний оболочки; M_0 – масса (вес) разомкнутой оболочки; ω_n – безразмерная собственная частота колебаний оболочки.

Исходя из полученных результатов, которые имели большую погрешность с экспериментальными результатами, а также отсутствия возможности в полной мере определить показатели «перемещения» тонкостенной цилиндрической разомкнутой железобетонной оболочки, новая математическая модель описывает перемещения, которые необходимы для определения сдвиговых напряжений с помощью теории Райснера

$$\begin{gathered} D\Delta\Delta\Phi + \rho h\ddot{\Phi} - \frac{\rho h^3}{12}\left(1 + \frac{2}{\Gamma(1-\mu)}\right)\Delta\ddot{\Phi} + \frac{\rho^2 h^3}{12G\Gamma}(\dddot{\Phi}) + \\ + \frac{M}{h}\delta(x - x_0, y - y_0)\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0, \qquad \Delta F - \frac{12\Gamma}{h^2}F - \frac{\rho}{G}\ddot{F} = 0. \end{gathered} \quad (10)$$

В определении круговой частоты колебания цилиндрической разомкнутой железобетонной оболочки (рисунки 6 – 7) используются ***«$E_{ср}$»*** и требуемая минимальная толщина оболочки ***“δ_{min}”***, определяемая по формуле

$$w^2 = \left[D_{ср}B\left(1 - \frac{\theta h^2}{\beta}B\right) + \frac{E_{ср}\Delta}{R^2}\left(\frac{m\pi}{L}\right)^4\left(1 - \frac{\Delta^2}{\beta}B\right)\right] \cdot \left[\rho\delta_{min}\left(1 - \frac{\Delta^2}{\beta}B\right)\right]^{-1}. \quad (11)$$

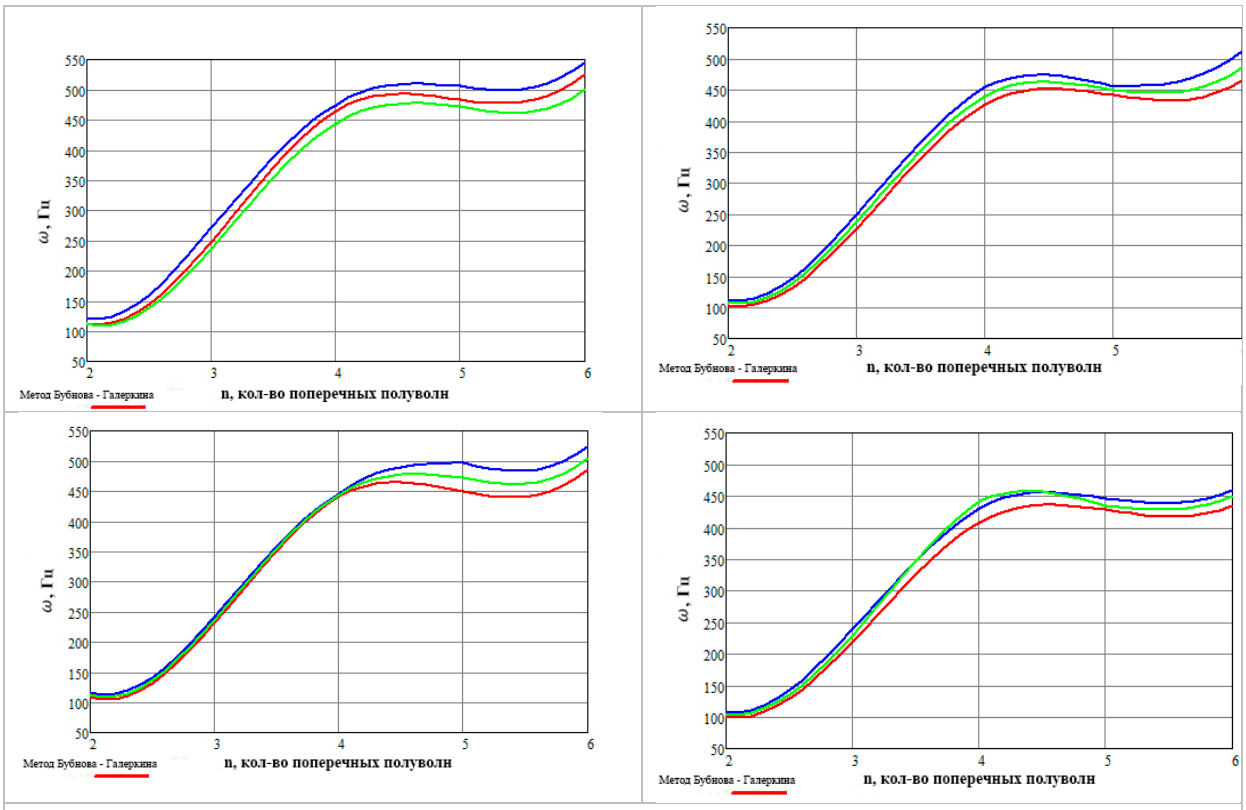
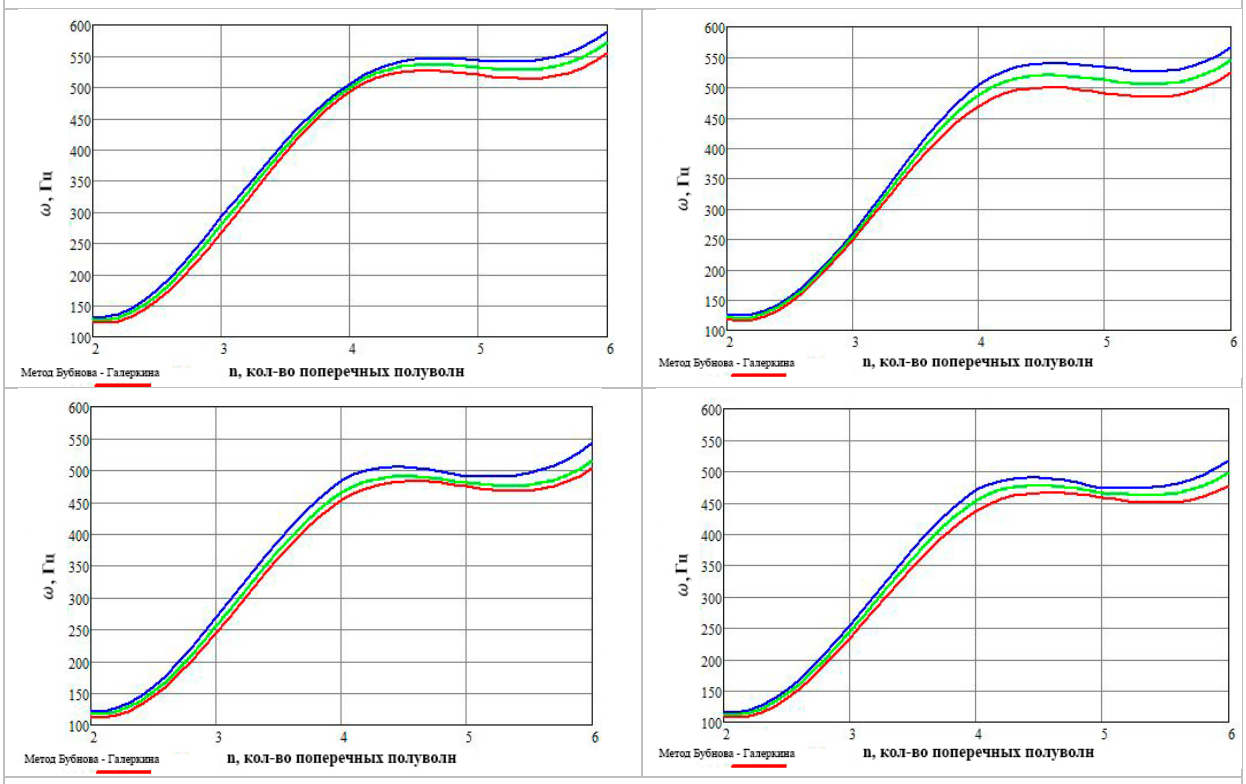


Рисунок 6 – Диаграмма собственных частот колебаний оболочки при 5 % армирования от количества поперечных полуволн: В15; В20; В30; В40



------ метод Бубнова-Галёркина; ------ метод Д'Аламбера ; ------ Полученный метод

Рисунок 7 – Диаграмма собственных частот колебаний оболочки при 2 % армирования от количества поперечных полуволн: В15; В20; В30; В40

Как видно из полученных результатов (см. рисунки 6 – 7), влияние класса бетона существенно с его увеличением, уменьшаются показатели «$\boldsymbol{\omega}$» частот колебаний, а также можно заметить, что с увеличением количества поперечных полуволн «$\boldsymbol{n}$» вырастают показатели частот свободных колебаний. Если прогнозировать полученные результаты, то использование усреднённого модуля упругости даёт нам средние результаты между методом Бубнова-Галеркина и принципом Д'Аламбера. Отклонения между методами составляют от 3-9 %, что показывает эффективность использования усреднённого модуля упругости «$\boldsymbol{E}_{\text{ср}}$».

В четвертой главе. В выполненных исследовательских работах по теме диссертации изучена динамика поведения тонкостенных цилиндрических железобетонных разомкнутых оболочек, а также их НДС от разных сочетаний нагрузок, влияние сочетания нагрузок на колебательный процесс железобетонной оболочки (рисунок 8).

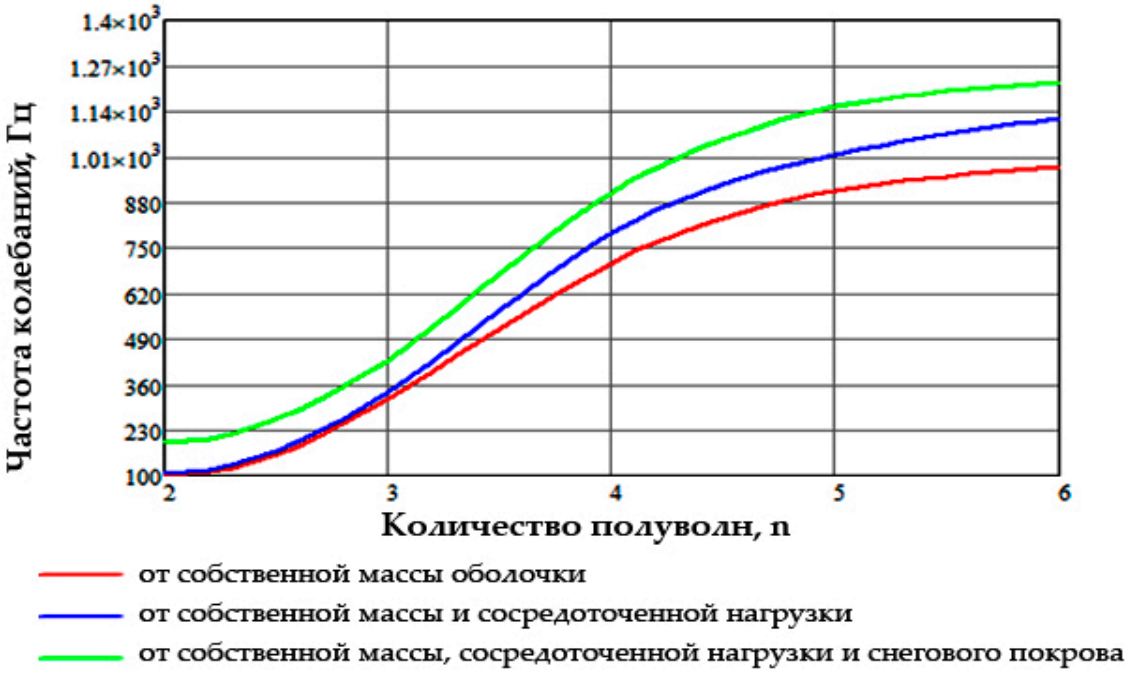


Рисунок 8 – Диаграмма влияния сочетания нагрузок на динамическое колебание оболочки

Из рисунка 8 видно, что с умножением к собственному весу оболочки других нагрузок, в частности сосредоточенной нагрузки и снегового покрова, с каждой нагрузкой наблюдаются увеличение частоты колебаний «$\boldsymbol{\omega}$» от 2,98 до 47 % и рост поперечных полуволн «$\boldsymbol{n}$».

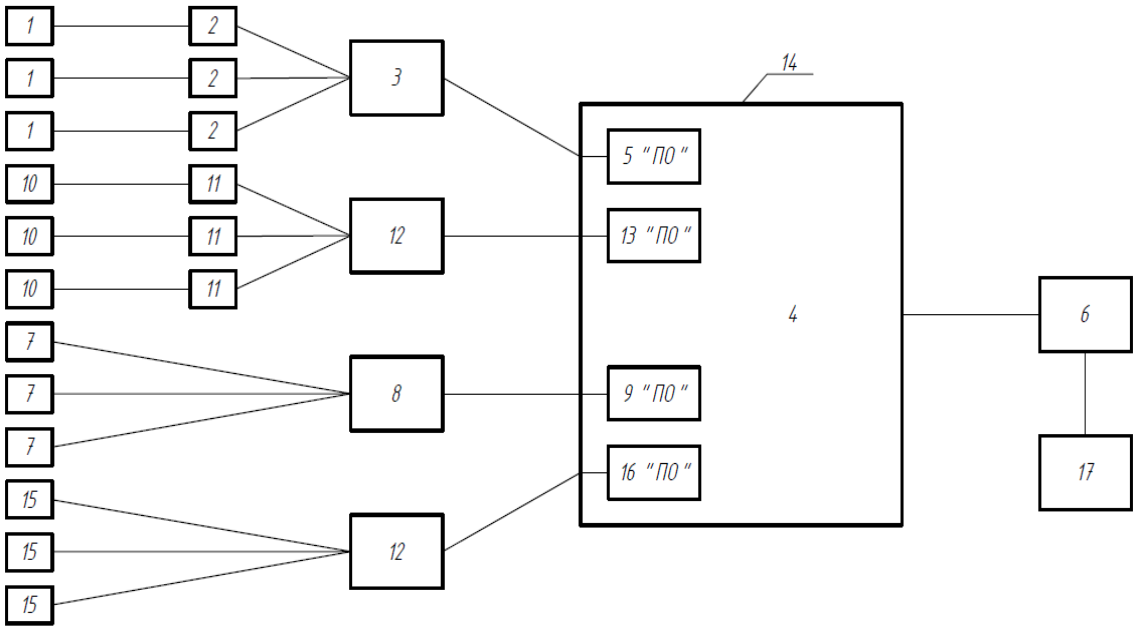
Наши исследования привели к созданию многофункциональной системы комплексной безопасности для мониторинга несущих конструкций в онлайн режиме (рисунок 9). Данная система обладает рядом значимых функций:

– мониторинг колебательных режимов несущих конструкций здания и сооружения;

– преждевременные прогнозированные вхождения резонансного режима несущих конструкций;

– возможность запуска механического устройства возбуждения колебания в несущих конструкциях.

Система комплексной безопасности несущих конструкций зданий и сооружений содержит датчики ВС110, усилители аналоговых сигналов, устройство приёма-передач, персональный компьютер, панель оператора со световым и звуковым сопровождением, видеокамеры, также имеется дополнительные датчики образца ВС 110, усилитель аналогового сигнала и аналого-цифрового преобразователя (АЦП).



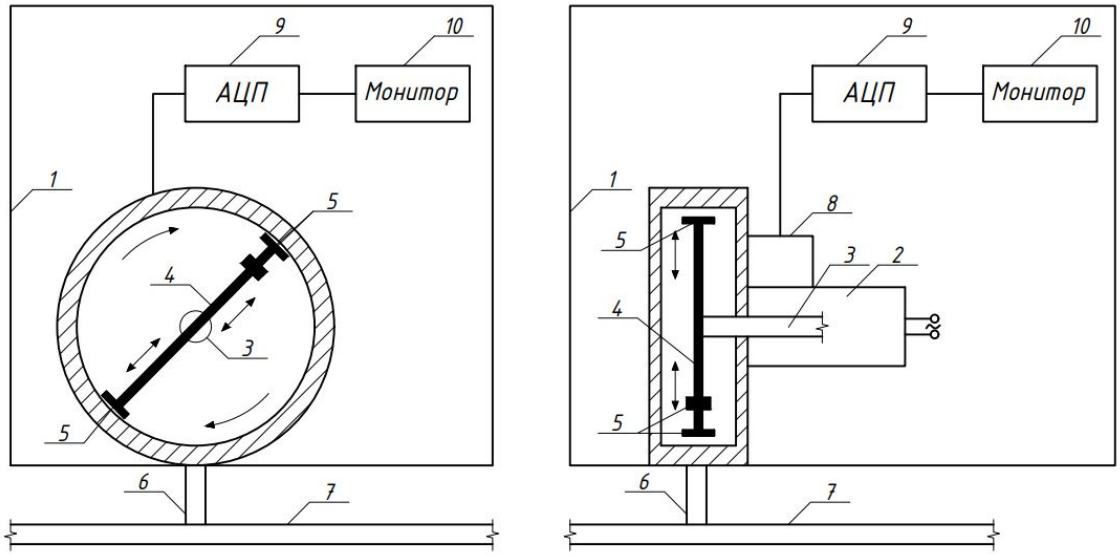
1 – датчики ВС110; 2 – усилитель аналогового сигнала; 3 – устройство приёма-передачи; 4 – персональный компьютер ПЭВМ; 5 – программное обеспечение (ПО); 6 – панель оператора; 7 – видеокамера; 8 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 9 – программное обеспечение (ПО); 10 – акселерометр; 11 – усилитель аналогового сигнала (АЦП); 12 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 13 – программное обеспечение (ПО); 14 – датчик температуры; 15 – тень задачки; 16 – программное обеспечение (ПО); 17 – устройство возбуждения колебаний в противофазе начальным колебаниям.

Рисунок 9 – Схема устройства комплексной безопасности

В случае вхождения несущих конструкций в резонансный процесс, возникший из-за внешних воздействий или других факторов, происходит этап передачи аналоговых сигналов из несущей конструкции на панель оператора (управления), что, в свою очередь, даёт возможность дополнительно определить частоту и амплитуду колебания, а также контролировать их величину исходя из расчётной величины. Если входящие частота и амплитуда окажутся больше расчётной величины, т.е. критической величины для исследуемой тонкостенной цилиндрической разомкнутой железобетонной оболочки, то происходит обратный отчёт на панели оператора со световым и звуковым сопровождением для принятия решения эвакуации людей из помещения.

Устройство механического возбуждения колебаний (рисунок 10) предназначено для обеспечения надёжности несущих конструкций к динамическим воздействия, а также анализа входящих величин амплитуд и частот колебаний. Устройство может быть использовано не только в строительстве, а также и в других промышленных сферах: машиностроение, ракетостроение, авиация, кораблестроение и др. Данное устройство позволяет создать механические колебания требуемой амплитуды в противофазе к возникшим колебаниям для недопущения резонансного режима в несущих конструкциях. Цель работы устройства механического возбуждения колебаний заключается в получении (фиксации) спектра амплитуд и частот возбуждаемых колебаний при достаточно высокой стабильности и долговечности работы, также возможности отображения полученных результатов состояния несущих конструкций на монитор. Многие аналогичные устройства не имеют возможности выполнить данную работу, в связи с этим в

устройстве предусмотрены датчики измерения колебаний, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и монитор для наблюдения за состоянием конструкций.



1 – корпус устройства; 2 – электропривод; 3 – вал; 4 – стержень; 5 – груз; 6 – волновод; 7 – конструкция, у которой необходимо вызвать механические колебания; 8 – датчик измерения колебаний; 9 – аналого-цифровой преобразователь; 10 – дисплей; 11 – персональный компьютер

Рисунок 10 – Схема устройства возбуждения колебаний

В качестве примера приведен спектр вынужденной частоты колебания тонкостенной цилиндрической разомкнутой железобетонной оболочки В15 при 5 % армировании (рисунок 11), где анализируются в начальных частотах большой пик магнитуды и небольшие магнитуды в средних частотах.

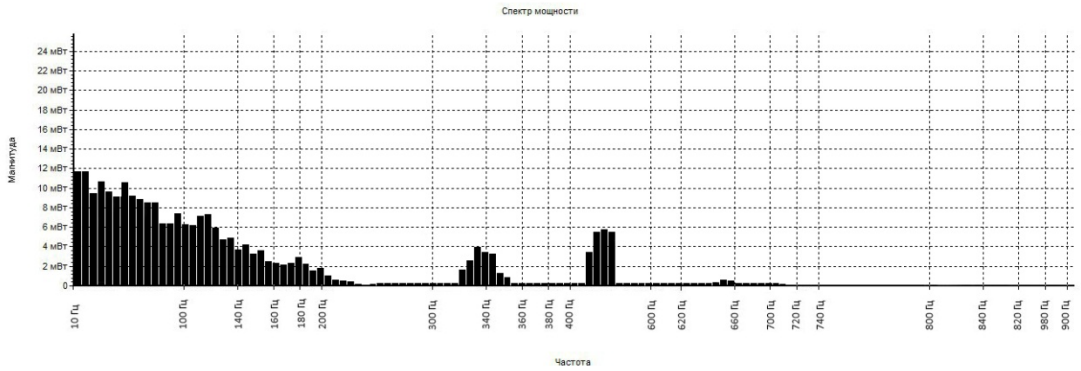


Рисунок 11 – Диаграмма частотного спектра свободного и вынужденного колебания тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек В15 при 5 % армирования

Из полученных теоретических и экспериментальных исследований выявлено, что количество поперечных полуволн существенно влияет на динамику колебаний тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек. Исходя из этого, включение устройства механического возбуждения колебания поможет уменьшить количество поперечных полуволн, тем самым пойдет процесс затухания резонансного

процесса в несущей конструкции и восстановления исходных значений (рисунок 12). Для каждого испытательного образца по полученным результатам выявлен критерий момента включения устройства (таблица 2).

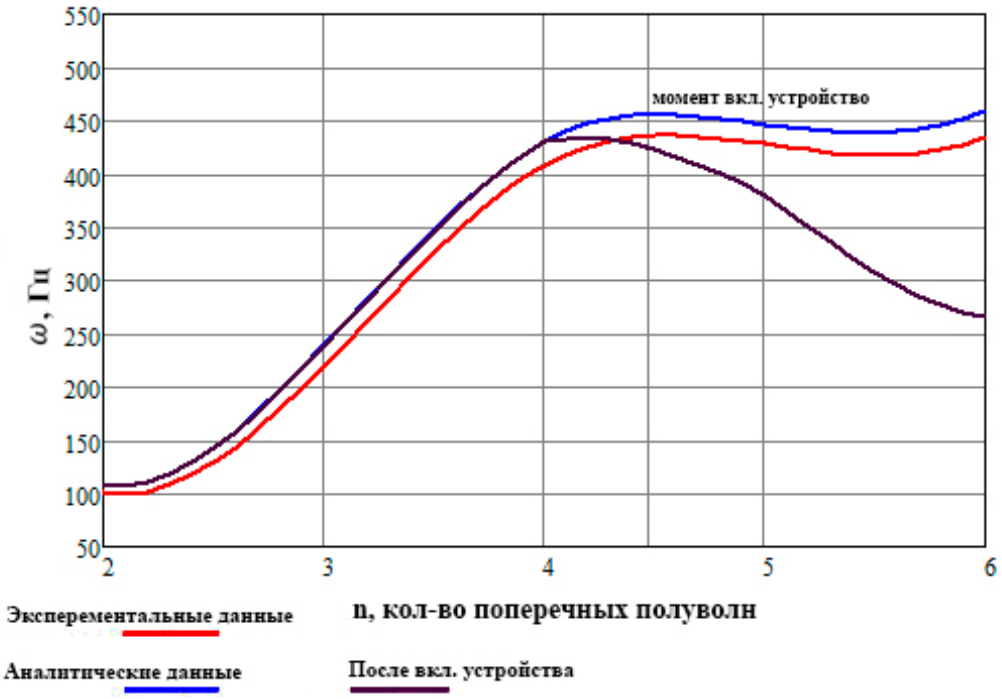


Рисунок 12 – Частотная диаграмма колебаний оболочки при наличии системы комплексной безопасности и устройства возбуждения колебаний конструкции

Разработанное «Устройство механического возбуждения колебаний» предназначено для мониторинга состояния несущих конструкций, в том числе в виде тонкостенных цилиндрических разомкнутых оболочек, учитывает физико-механические свойства материала оболочки, автоматически включается, устраняя резонансное состояние в несущих конструкциях здания и сооружения. Устройство позволяет вести постоянный онлайн мониторинг и обеспечить безопасность эксплуатации несущих конструкций и объекта в целом.

С помощью полученных результатов исследования можно сделать вывод, что учёт ототропности материала в расчётах повышает динамическую устойчивость оболочки, так как из исследования выявлено, что класс бетона и процент армирования существенно влияют на характер свободных и вынужденных колебаний тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек.

Разработанная система комплексной безопасности несущих конструкций зданий и сооружений и устройство механического возбуждения колебаний предназначены для онлайн мониторинга и гашения резонансного состояния в несущих конструкциях, тем самым обеспечивают безопасность и долговечность проектируемых объектов.

В **заключительной части** сформулированы основные выводы:

1. Разработан новый подход к расчёту свободных и вынужденных колебаний тонкостенных цилиндрических разомкнутых оболочек с учётом усреднённого модуля упругости для ортотропных материалов.

2. Разработана математическая модель на основе модели Рейснера для расчёта свободных колебаний тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек с учётом ортотропности материла.

3. Установлены численные зависимости собственных колебаний от количества поперечных полуволн тонкостенных цилиндрических разомкнутых оболочек при различных классах бетона, выявлено, что с ростом класса бетона от В15 до В40 уменьшаются частотные показатели свободных колебаний на 12 %.

4. Выявлены численные зависимости собственных колебаний от количества поперечных полуволн тонкостенных цилиндрических разомкнутых оболочек при $2^{х}$ и $5^{ти}$ процентов армирования выявлено, с увеличением процента армирования оболочка теряет свою пластичность, что способствует динамической устойчивости.

5. Получены экспериментальные результаты вынужденных колебаний тонкостенных цилиндрических оболочек при разных классах бетона, определено, что с увеличением класса бетона уменьшается амплитуда колебаний, а частота колебаний оболочек увеличивается.

6. Получены экспериментальные результаты вынужденных колебаний тонкостенных цилиндрических оболочек при разных процентах армирования; определено, что с увеличением армирования с 2 до 5 % уменьшается частота вынужденных колебаний с 3-8 %.

7. Выявлено влияние изменения напряженно-деформированного состояния при различных сочетаниях внешних нагрузок на динамическую устойчивость разомкнутой железобетонной оболочки.

8. Разработано «Устройство механического возбуждения колебания» в противофазе к колебаниям оболочки для гашения колебаний и обеспечения безопасной эксплуатации конструкций.

9. Зарегистрировано программное обеспечение «Определение состояния конструкций, расчет оболочек, строительных материалов ОСКРОСМ2017» для управления устройством механического возбуждения колебания на основе уточнённой математической модели.

10. Выявлена методика гашения резонансных явлений устройством механического возбуждения колебаний на основе экспериментальных и аналитических результатов.

Результаты диссертации были изучены ГУП «Научно-исследовательский институт «Строительство и Архитектура» Республики Таджикистан и внедрены для использования при проектировании здания и сооружения для расчетов конструкций на сейсмические воздействия. Также результаты используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» при чтении лекций кафедры «Строительство и Архитектура» и других технических факультетов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные публикации и научные результаты диссертации, опубликованные в журналах уровня цитирования Web of Science и Scopus:

1. **Qahorov, K. Q.** The influence of concrete class on vibrations of thin-walled cylindrical reinforced concrete shells / K. Q. Qahorov, Y. O. Sysoev, A. Y. Dobryshkin // Materials Science Forum 945 MSF, pp. 299-304 DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.299. 2018.
2. **Qahorov, K. Q.** Influence of class of concrete on oscillations of thin-wall cylindrical reinforced concrete shells / K. Q. Qahorov, O. E. Sysoev, E. O. Sysoev // Materials Science Forum 992 MSF, pp. 59-65 DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.992.59. 2020.
3. **Qahorov, K. Q.** Study of numerical vibrations of open thin-walled cylindrical shells / K. Q. Qahorov, E. O. Sysoev, A. Y. Dobryshkin, O. E. Sysoev // Lecture Notes in Networks and Systems 200, pp. 450-457 DOI: 10.1007/978-3-030-69421-0_48. 2021.

Статьи, рекомендованные ВАК для публикации научных результатов кандидатских диссертаций:

4. **Кахоров, К. К.** Современные испытательные стенды для бесконтактного исследования свободных колебаний замкнутых и разомкнутых цилиндрических оболочек / О. Е. Сысоев, А. Ю. Добрышкин, С. Н. Нейн, К. К. Кахоров // Ученые записки КнАГТУ. – 2017. – № 1. – С. 110-118.
5. **Кахоров, К. К.** Экспериментальные исследования влияния мест присоединения малой массы на колебания тонкостенной разомкнутой цилиндрической оболочки / О. Е. Сысоев, А. Ю. Добрышкин, С. Н. Нейн, К. К. Кахоров // Ученые записки КнАГТУ. – 2018. – № 2. – С. 42-50.
6. **Кахоров, К. К.** Теоретический расчет колебаний тонкостенных железобетонных оболочек с разными модулями упругости / О. Е. Сысоев, К. К. Кахоров, Е. О. Сысоев // Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. Научный журнал № 1(39), январь-март, 2019. – С. 36-44.
7. **Кахоров, К. К.** Исследование свободных и вынужденных колебаний разомкнутых тонкостенных железобетонных оболочек / Е. О. Сысоев, К. К. Кахоров, О. Е. Сысоев, Е. В. Журавлева // Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. Научный журнал № 1(43), январь-март, 2020. – С. 121-130.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ и патентов:

8. Патент на полезную модель № 185398 (РФ) / О. Е. Сысоев, А. Ю. Добрышкин, С. Н. Нейн, К. К. Кахоров. Устройство возбуждения механических колебаний. Заявл. № 2018108657, зарег. от 04.11.2019 г. ; приоритет от 20.04.2017. – 1 с.
9. Определение состояния конструкций, расчет оболочек, строительных материалов «ОСКРОСМ2017» / К. К. Кахоров, О. Е. Сысоев, А. Ю. Добрышкин, С. Н. Нейн. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2017613622. Заявка 2016662970 от 28.11.2016 ; приоритет от 22.03.2017.

Другие издания:

10. **Кахоров, К. К.** Факторы, влияющие на разрушение зданий оболочного типа / Е. О. Сысоев, К. К. Кахоров // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 29-30 ноября 2016 г. / редкол. : О. Е. Сысоев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2016. – 55 с.
11. **Кахоров, К. К.** О колебаниях тонких изогнутых пластин и разомкнутых цилиндрических оболочек, несущих систему присоединенных масс / А. Ю. Добрышкин, С. Н. Нейн, К. К. Кахоров // Региональные аспекты развития науки и образования в об-

ласти архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 29-30 ноября 2016 г. / редкол. : О. Е. Сысоев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2016. – С. 48-51.

12. **Кахоров, К. К.** Влияние температурного воздействия на изменение формы тонкостенной цилиндрической оболочки / А. Ю. Добрышкин, С. Н. Нейн, К. К. Кахоров // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / редкол. : О. Е. Сысоев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2017. – С. 52-54.

13. **Кахоров, К. К.** Композиционные материалы и методы усиления поврежденных оболочек / К. К. Кахоров, Ф. Х. Валиев, С. Н. Нейн // Архитектура, строительство, землеустройство и кадастры на Дальнем Востоке в XXI веке : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / редкол. : О. Е. Сысоев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2017. – С. 175-179.

14. **Кахоров, К. К.** Влияние коэффициента армирования на жесткость железобетонной оболочки / К. К. Кахоров, Е. О. Сысоев // Архитектура, строительство, землеустройство и кадастры на Дальнем Востоке в XXI веке : материалы Междунар. научн.-практ. конф. / редкол. : О. Е. Сысоев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2018. – С. 152-155.

15. **Кахоров, К. К.** Влияние напряженно-деформированного состояния на малое колебание оболочки / К. К. Кахоров, Ф. Х. Валиев, Т. А. Стасевич // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия : материалы V Междунар. научн.-практ. конф. : в 2 частях / редкол. : О. Е. Сысоев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2018. – С. 84-87.

16. **Кахоров, К. К.** Исследования колебаний разомкнутой оболочки при изменении напряжённо-деформированного состояния / К. К. Кахоров, О. Е. Сысоев, Э. А. Тоиров, Ф. Х. Валиев // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : материалы II Всерос. национальной научной конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2019. – С. 79-82.

Кахоров Комилджон Кахорович

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РАЗОМКНУТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОБОЛОЧЕК

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать «___»_____2021г.
Формат 60 84 1/16. Бумага 65г/м^2. Ризограф EZ 570E.
Усл. Печ. Л. 1,40. Уч.-изд. Л. 1,3. Тираж 100экз. Заказ

Полиграфическая лаборатория
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения Высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»
681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре. Пр. Ленина 27