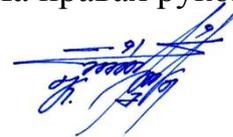


Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«КОМСОМОЛЬСКИЙ-НА-АМУРЕ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Кахоров Комилджон Кахорович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ УСТОЙЧИВОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РАЗОМКНУТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОБОЛОЧЕК**

Специальность 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
О. Е. Сысоев

Комсомольск-на-Амуре – 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	4
ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК.	18
1.1. Состояния теории расчёта оболочек в линейно-упругой стадии.....	18
1.2. Расчёт трещиностойкости железобетонных тонкостенных оболочек при динамических воздействиях.	21
1.3. Состояние исследования теории расчёта оболочек в условиях ползучести бетона.	27
1.4. Исследования предельного равновесия цилиндрических оболочек при изменении напряженно-деформированного состояния.	30
1.5. Исследования устойчивости тонкостенной цилиндрической оболочки при динамических воздействиях	35
ГЛАВА 2. ПРОГРАММА, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ И ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЯ РАЗОМКНУТОЙ ОБОЛОЧКИ.....	40
2.1. Исследование влияния модуля упругости на частоты колебания железобетонной оболочки при разных нагружениях.	40
2.2. Экспериментальная база для исследования.	42
2.3. Методика проведения испытательных исследований	49
2.5. Полученные результаты	53
Выводы по второй главе.....	56

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЁТА КОЛЕБАНИЙ ТОНКОСТЕННЫХ РАЗОМКНУТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ.....	57
3.1. Определение частоты свободных колебаний тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек	57
3.2. Модель расчета собственных колебаний с учетом принципа Д'Аламбера.....	60
3.3. Метод Бубнова-Галеркина для решения динамических задач тонкостенных разомкнутых цилиндрических оболочек.....	63
3.4. Модифицированный подход в решении колебания тонкостенных разомкнутых цилиндрических оболочек при воздействии малой присоединённой массы.....	65
Выводы по третьей главе.....	76
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РАЗОМКНУТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОБОЛОЧЕК, НЕСУЩИХ СОСРЕДОТОЧЕННУЮ МАССУ И ВОЗМОЖНОСТИ ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ КОНСТРУКЦИИ.....	78
4.1. Напряженно-деформированное состояние тонкостенных цилиндрических железобетонных разомкнутых оболочек при нелинейном деформировании.....	79
4.2. Система мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций во время эксплуатации в зданиях и сооружениях.....	87
4.3. Устройство механического возбуждения колебаний.....	92
Выводы по четвертой главе.....	97
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	Ошибка! Закладка не определена.
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	99
Приложение А. Свидетельство о регистрации программы на ЭВМ.....	112
Приложение Б. Патенты на изобретения.....	113
Приложение В. Акт о внедрении научных результатов.....	11616

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Система координат, разная для каждого вида оболочек. Координатные линии для координат x, y направлены по линиям главных кривизн в срединной поверхности оболочки и являются ортогональными, z – координата, направленная в сторону вогнутости оболочки, перпендикулярно срединной поверхности;

x, y, z	
a, b, h, L	– размер оболочки вдоль координат x, y, z ;
R	– радиус оболочки вдоль координаты x ;
E	– модуль упругости;
F	– стрела подъема оболочки;
μ	– коэффициент Пуассона;
Γ	– коэффициент поперечного сдвига;
D	– цилиндрическая жёсткость;
D_{11}, D_{22}	– жёсткость оболочки в продольном и поперечном направлениях;
$Gh\Gamma$	– жёсткость на сдвиг;
G	– модуль сдвига;
N_1, N_2	– касательные напряжения;
M_1, M_2	– изгибающие моменты;
W	– нормальный прогиб;
u, v, w	– перемещения средней точки поверхности;
M_0	– крутящий момент;
p^2	– квадрат безразмерных радиальных колебаний оболочки (без массы);
n, m	– количество продольных и поперечных полуволн;
A_{mn}, B_{mn}, C_{mn}	– амплитуда колебаний вдоль направлений;
$\Omega = \omega/\omega_n$ $= \lambda/\lambda_n$	– безразмерная относительная частота колебаний;

ω	– круговая частота колебаний;
ω_n	– собственная безразмерная круговая частота колебания;
λ_n	– собственная частота колебаний;
a_1, a_2, a_3	– безразмерные амплитуды колебаний;
$\theta = m\pi R/(nl)$	– параметр волнообразования, характеризующий относительную длину оболочки;
$R_{bt,btn}$	– расчётное сопротивление бетона;
$R_{s,n}$	– расчётное сопротивление арматуры;
$\Phi(x,y,t)$	– функция динамических напряжений срединной поверхности разомкнутой оболочки;
$\delta(x, y,)$	– функция Дирака;
u, v, w	– перемещения точки средней поверхности оболочки в продольном, окружном и радиальном направлениях

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Тонкостенные оболочечные формы конструкции находят большое применение во всех сферах промышленности: судостроении, самолетостроении, строительстве зданий и сооружений, машиностроении, космических объектах и др. В современном строительстве широко используются цилиндрические оболочки в виде несущих конструкций, которые могут иметь различные виды и формы: резервуары, водонапорные и телевизионные башни, тоннели метрополитенов, железных и автомобильных дорог, купола, своды, стены и т.д. Оболочки могут быть как гладкими, так и ребристыми. Рёбра используют в облегчённых конструкциях для придания большей жёсткости. Оболочки могут иметь отверстия (вырезы) по технологическим требованиям, которые, в свою очередь, ослабевают их жёсткость конструкции. Во время проектирования облегченных, но высокопрочных зданий и сооружений необходимо исследование устойчивости таких конструкций. Тонкостенные цилиндрические оболочечные формы конструкции чаще всего используются при строительстве большепролетных зданий и сооружений и показали свою эффективность не только в Российской Федерации и странах СНГ, но и по всему миру (рисунки 1 – 3). Оболочечные конструкции как элемент здания и сооружения могут встречаться в виде несущих и ограждающих конструкций, которые, в свою очередь, могут быть сделаны в основном из металла или железобетона, но строительные материалы прогрессируют и все чаще встречаются композиционные материалы из разных составляющих, из которых выполняются многослойные конструкции, например сэндвичи и др.

Из исследования анализа можно отметить, что исследованию оболочек уделяется большое внимание и спрос, так как оболочечные конструкции из-за своих качеств, такие как высокая прочность и жёсткость, лёгкость, разнообразие конструктивных форм, имеют большое применение, широко используются в качестве покрытий зданий и сооружений. Тонкостенные оболочки могут перекрывать большие пролёты и создавать большие закрытые помещения без дополнительных

опор, обладают оптимальной формой и хорошими технико-экономическими показателями.



Рисунок 1 – Церковь Дио-Падре-Мизерикордиозо (г. Рим, Италия)



Рисунок 2 – Дворец наук и искусств и оперный театр (г. Венеция, Италия)

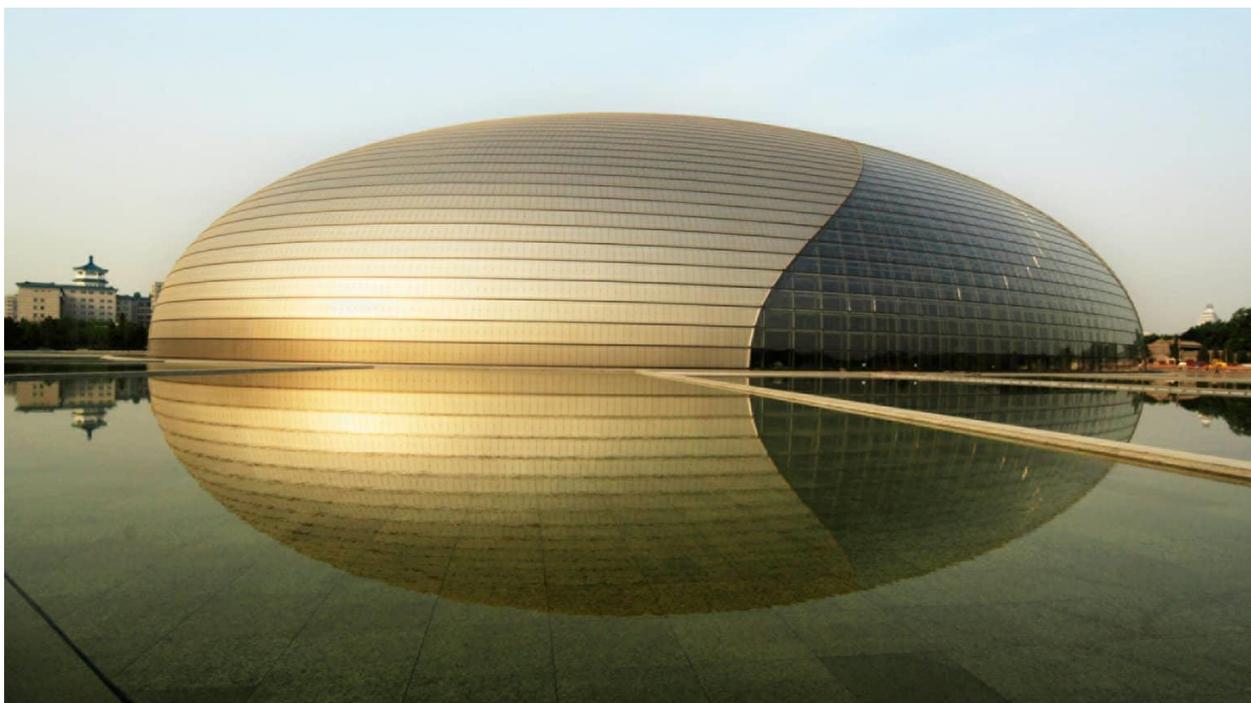


Рисунок 3 – Национальный театр «Big» (г. Пекин, Китай)

Но некоторые из этих сложных строений обрушились. Возможно проблема в том, что при проектировании зданий и сооружений не производились специальные расчёты на внезапное возникновение резонансных явлений, а также отсутствуют расчетные модели и недостаточно экспериментальных данных. Важно отметить, что при этом тонкостенные оболочки очень чувствительны к внешним воздействиям, а в процессе эксплуатации оболочные конструкции подвергаются ряду статистических и динамических воздействий. Например: атмосферные (ветровые, снеговые), природные (сейсмические, цунами, температурные), технологические (система вентиляции, солнечные и водяные коллекторы) и другие виды нагрузок, которые приводят к возбуждению резонансного процесса, к разрушению конструкции. К примеру, аварии, которые случились в Российской Федерации: в 2004 г. авария в Спортивном комплексе «Трансвааль-парк» г. Москва (рисунок 4), в результате которой более 100 чел. получили тяжёлые и лёгкие ранения и погибли 28 чел.; в 2006 г. обрушилась крыша центрального Басманного рынка г. Москва, в результате которой погибли 68 чел.; в Новосибирской области, с. Верх-Ирмень в 2015 г. одна из кровель спортивных сооружений крытого катка

не выдержала внешних воздействий (ветровых и снеговых); а также в 2015 г. разрушился резервуар в ходе строительства на нефтезаводе г. Комсомольске-на-Амуре от ветровых нагрузок; в 2020 г. во время демонтажных работ Спортивно-концертного комплекса «Петербургский» из-за несоблюдения техники безопасности обрушилось покрытие здания, в результате погиб 1 чел.; в Зарубежных странах: в 2010 г. в штате Миннесота (США) на стадионе обрушилась одна из секций крыши, завалив трибуну, а также в 2017 г. произошел обвал крыши спортивного зала школы в п. Мурино из-за перегрузки кровли строительными материалами, в результате погиб 1 чел.



Рисунок 4 – «Трансвааль-парк» (г. Москва): а – до обрушения;
б – после обрушения

Цель теоретических расчетов и проведения экспериментов с железобетонными оболочками с разными модулями упругости заключается в обеспечении надежности при эксплуатации здания и сооружения и исключении аварийных ситуаций, возникающих резонансных явлений свободных колебаний оболочек от воздействия внешних сил (нагрузок).

Эти аварии подтверждают проблемы при проектировании, в которых учитывается только коэффициент запаса несущих конструкций, а динамические воздействия, которые появляются в сумме вынужденного воздействия и приложенных нагрузок, не учитываются и впоследствии приводит к техногенным катастрофам. Для предотвращения подобных техногенных катастроф возникает необходимость исследования динамики тонкостенных цилиндрических форм конструкции и значения модуля упругости при динамических колебаниях (свободных и вынужденных) тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек, а также влияния факторов на колебания железобетонных тонкостенных оболочек, регистрируя тем самым патент на преждевременное сообщение критического состояния несущих элементов.

Основные этапы развития исследования свойств колебаний (в механике) оболочек, полученные до сегодняшнего дня, приведены в монографиях В.З. Власова [18-20], В.В. Болотина [13], А.И. Лурье [62, 63], А.Н. Гузь [31] и многих других учёных.

Анализ известных авторов даёт возможность сделать вывод, что для тонкостенных цилиндрических замкнутых или разомкнутых оболочек к настоящему времени разработаны проблемы в расчётах напряженно-деформированного состояния, устойчивость, предел прочности и оптимального проектирования при воздействии статических, внешних или динамических нагрузок, но эти разработки не решают проблем, которые возникают при эксплуатации оболочечных форм конструкций.

Из сравнительных результатов небольшого количества известных учёных исследований по динамике оболочек известно, что их основная часть посвящена линейным задачам распространения образующих поперечных и продольных по-

луволи тонкостенных замкнутых и разомкнутых цилиндрических оболочек. Этим вопросам посвящены работы Ю.Н. Новичкова [76], И. Мирского [127]. Вопросы собственных колебаний оболочек изучены в работах Ж.Е. Багдасаряна [11], А.Е. Богдановича [15], А.С. Вальмира [22, 23] и др. В работах приведены теоретические исследования по вопросам возникновения вынужденных колебаний тонкостенных цилиндрических оболочек.

Многие исследования носят теоретический характер, а для достоверного результата нужны исследования над экспериментами, с помощью которых можно было бы определить характер величин собственных и вынужденных колебаний. Также стоит учесть колебания, происходящие за счёт присоединённых масс, они способствуют изменению напряженно-деформированного состояния (далее НДС) тонкостенных цилиндрических оболочек. От состояния НДС конструкций зависят величины частоты и магнитуды колебания.

В начале XX в. в 40-х гг. впервые были разработаны основы нелинейной теории оболочек (Х.М. Муштари, Л. Донелл, В.З. Власов, В.В. Новожилов).

Большой вклад в разработку по теории и колебаниям замкнутых и разомкнутых оболочек внесли такие учёные, как Т.К. Варадан [21], В.Д. Кубенко [46, 47], Г.С. Лейзерович [58-61], А.И. Лиходед [65], А.А. Малинин [68], Х.М. Муштари [72, 73], Н.А. Тарануха [97, 98], С.П. Тимашенко [99] и др.

Степень разработанности темы исследования. Исследованием свободных и вынужденных колебаний оболочек занимались многие отечественные и зарубежные ученые: Ю.Б. Борисов [14], В.З. Власов [18-20], Т.К. Варадан [21], В.М. Даревский [32], В.Д. Кубенко [46, 47], Г.С. Лейзерович [58-61], А.И. Лиходед [65], А.А. Малинин [68], Х.М. Муштари [72, 73], Н.А. Тарануха [97, 98], С.П. Тимашенко [99], а также Н. Aron [108], S.C. Amabili [109], F. Alijani [110], E.F.F. Chladni [113], H.J. Donnell [115], F. Dischinger [116], M.G. Huber [117,118], M. Kattimani [119], T.H. Lee [122], R.S. Lew [123], A.E.H. Love [124], N.J. Mallon [125,126], I. Mirsky [127], A.H. Nilsen [128], E. Reissner [129], W. Soedel [130] и др. Вышеперечисленные ученые-исследователи заложили весомый вклад в развитие оболочечных форм конструкций. Они описали характер движения оболочечных

форм общими уравнениями их колебания, разработали модели расчета динамического поведения замкнутых и разомкнутых оболочек с учётом неправильности форм и присоединённых масс.

Влияние изменения, НДС железобетонной оболочки на собственные и вынужденные колебания исследовали ученые, но проблема со значением модуля упругости, процентом армирования, а также формами колебаний при воздействии статистических и динамических нагрузок остаётся открытой, так как нет экспериментально подтверждённых математических моделей, учитывающих вышесказанные факторы, на свободные и вынужденные колебания тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек. Нужно отметить, что также недостаточно глубоко изучен вопрос влияния сосредоточенной нагрузки или системы сосредоточенных нагрузок на колебательный процесс, так как если оболочка используется в качестве покрытия, то сосредоточенные нагрузки могут встретиться в разных местах покрытий в виде спутниковых антенн, солнечных коллекторов и другого оборудования, которые в процессе работы возбуждают резонансный процесс, никак не учитывающийся во время проектирований, но существенно влияющий во время эксплуатации.

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.

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

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

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

- 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 расчётов конструкций на сейсмические воздействия. Также результаты используются в учеб-

ном процессе ФГБОУ ВО «КНАГУ» при чтении лекций кафедры «Строительство 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.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

1.1. Состояния теории расчёта оболочек в линейно-упругой стадии

Данная теория считается одним из актуальных и сложных разделов строительной механики, которая изучается по двум основным направлениям.

Первое направление изучает вопрос определения математической теории тонких упругих оболочек. По этому направлению работали такие учёные, как А.Л. Гольденвейзер [29], А.И. Лурье [62, 63], В.В. Новожилова [75], Ю.Н. Работнова [88] и другие, а первые исследования были опубликованы в 70-х гг. XIX в. Н. Арон [108] и О.Э.Х. Лявом [64, 124] с использованием гипотез Г. Кирхгофа о нелинейном распределении тангенциальных перемещений в отсутствии сдвига. Эти исследования стали источником возрождения новой гипотезы имени «Кирхгофа-Лява».

Второе направление охватывает исследования расчёта конструкций как линейно-упругих однородных систем, теории гладких и ребристых пластин и оболочек, которые развиты в трудах Н.П. Абовского, А.В. Александрова, Н.А. Алфутова, И.Я. Амиро, Л.В. Андреева, В.Н. Байкова, В.М. Бондаренко, В.С. Бартенева, В.В. Болотина, Д.В. Вайнберга, А.С. Вольмира, Б.С. Василькова, П.М. Варвака, В.З. Власова, К.З. Галимова, А.А. Гвоздева, Г.А. Гениева, Е.С. Гребня, Э.И. Григоляка, Л. Доннеля, В.М. Даревского, Я.В. Енджиевского, П.А. Жилина, А.В. Забегаева, А.Ю. Ишлинского, С.Н. Кана, Б.Я. Кантора, Н.И. Карпенко, В.В. Карпова, Н.В. Колкунова, В.И. Колчунова, К.Х. Лауля, Г.С. Лейзерович, Н.Н. Леонтьева, П.А. Лукаша, А.М. Масленникова, И.Е. Милейковского, Б.К. Михайлова, Х.М. Муштари, А.А. Назарова, Ю.В. Немировского, У.К. Нигула, И.Ф. Образцова, П.М. Огибалова, О.Д. Ониашвили, П.Л. Пастернака, В.В. Петрова, В.И. Плетнева, Г.И. Пшеничнова, Н.Н. Попова, В.А. Постнова, В.С. Постоева, И.Н. Преображенского, В.Д. Райзера, Е. Рейснера, А.Р. Ржаницына, Р.С. Санжаровского, А. Скор-

делиса, А.Ф. Смирнова, О.И. Теребушко, С.П. Тимошенко, Н.А. Тарануха, Л.А. Фильштинского, С.А. Тимашева, Н.Н. Шапошникова, И.Я. Штаермана, А.П. Филина и других учёных.

Многие исследования носят теоретический характер. Стоит отметить, что большой вклад в развитие пространственных конструкций был сделан под руководством Г.К. Залесова, С.М. Крылова, А.С. Хайдукова в лаборатории железобетонных конструкций НИИЖБ и в других исследовательских институтах Аотулом, А.А., Новоселовым А.П. и др.

Во втором направлении исследования проводились на основе моментной теории задачи расчёта оболочек (пологих) такими учёными, как В.З. Власов [18-20], Х.М. Муштари [72, 73] и Н.Д. Donnell [115]. В своих работах расчеты ведут к системе двух дифференциальных уравнений 4-го порядка, относительно нормального перемещения W

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{Eh} \cdot \Delta^2 \Delta^2 \Phi + D_k(W) &= 0; \\ \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)} \cdot \Delta^2 \Delta^2 W - D_k(\Phi) &= q, \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

где μ – коэффициент Пуассона; h – толщина стенки конструкции; W – нормальные перемещения; D_k – линейный дифференциальный оператор.

В разделе нелинейной теории упругих оболочек и пластин рассматриваются большие прогибы оболочки, которые равны с толщиной конструкции. Задачи гибких пластин и оболочек впервые были рассмотрены Т. Карманом и Сюэнь Цян (Т. Karman, H.S. Tsien) [120]. В своих работах построили соответствующие уравнения равновесия и совместные деформации также отечественные учёные А.С. Вольмир [22, 23], К.З. Галимов [25] и М.А. Муштари [72, 73].

Выявлено, что ввод основных величин нелинейной теории оболочек можно произвести двумя методами.

Первый метод заключается в использовании уравнений теории оболочек, которые имеют начальное неисправление от первоначальной формы, и при расчёте таких задач рассматривается вместо прогиба W ещё и дополнительный прогиб.

Дополнительный прогиб $W' = W = W_0$, в случае добавления этих прогибов в уравнение (1.1) получится система уравнений, которая использовалась в работе А.С. Вольмира [22]

$$\left. \begin{aligned} \frac{Eh}{12(1-\mu^2)} \cdot \Delta^2 \Delta^2 W' - D_k(\Phi) &= L(\Phi, W' + W_0) + q; \\ \frac{1}{Eh} \cdot \Delta^2 \Delta^2 \Phi + D_k(W) &= -L(W' + W_0), \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

где E – модуль упругости; h – толщина оболочки; μ – коэффициент Пуассона; W – нормальный прогиб; L – длина оболочки.

Важно отметить, что уравнения (1.2) были получены после предположения, что перемещения точки средней поверхности отсчитываются вдоль касательной к линиям кривизны α_1, α_2 , откладывая их в плоскости вдоль стороны контура. Координата \mathbf{z} обозначает первоначальное положение средней поверхности оболочки. В таком случае нормальный прогиб W стоит отсчитывать от начальной (исходной) серединой точки поверхности оси \mathbf{z} , что дает нам в уравнениях (1.2) новое предположение, $D_k(\Phi) = D_k(W) = \mathbf{0}$ и дополнительный прогиб равен $W_0 = \mathbf{z}$

$$\left. \begin{aligned} \frac{Eh}{12(1-\mu^2)} \cdot \Delta^2 \Delta^2 W' &= L(\Phi, W' + \mathbf{z}) + q, \\ \frac{1}{Eh} \cdot \Delta^2 \Delta^2 \Phi + D_k(W) &= -L\left(W' \frac{1}{2} W' + \mathbf{z}\right). \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

Уравнения (1.3) называются уравнениями смещенного типа, которые очень часто применяются в практике для расчёта инженерных задач теории пластин и оболочек в гибких и упругих стадиях.

На основе гипотезы Кирхофа-Лява сделаны выводы о системе общих нелинейных уравнений, которые приведены в работах О.Э.Х. Лява [64, 124], С.П. Тимошенко [99], А.И. Лурье [62, 63], Х.М. Муштари [72, 73], К.З. Галимова [25] и других учёных. Полученные результаты системы уравнений отличаются друг от друга. Это связано со временем составления уравнений равновесия, а также с выводом климатических и статистических соотношений.

Вместе с разработкой теории собственных колебаний также был предложен ряд методов применительно к решению дифференциальных уравнений в частных производных, которые описывают НДС оболочки. К примеру, в своих работах М.С. Корнишин [50] использует методы одинарных и двойных тригонометрических рядов, вариационного метода и других. Использование разных методов авторами обуславливается не только получением результата, но и качеством исследования. Однако многие из этих методов стали доступными лишь с появлением систем ЭВМ.

Важнейший шаг развития второго метода приводится в работах В.З. Власова и его учеников [18-20]. Теория, предложенная ими (гипотеза полубезмоментной теории В.З. Власова), развита на основе вариационного метода. Цель данной гипотезы заключается в решении задачи расчёта оболочек описываемой системой дифференциальных уравнений на основе вышеуказанных уравнений (1.1) – (1.3). В частных производных к одномерной задаче и интегрированию обычных дифференциальных уравнений данное решение удалось достичь из физического поведения оболочки, а также обобщённых методов строительной механики и теории упругости.

1.2. Расчёт трещиностойкости железобетонных тонкостенных оболочек при динамических воздействиях

Железобетонный материал является композиционным и основным. Свойство данного материала (железобетона), отличающего его от других строительных материалов, является НДС, которое обуславливается сложностью работы как композиционного материала в создании математической модели и алгоритмов в их расчётах.

Показано, что расчёт дифференциальных уравнений для железобетонной оболочки осуществляется тремя способами.

Первый метод является методом перемещений, в котором за неизвестные принимают составляющие усилия или силовые функции. В своей работе В.З. Вла-

сов [18] за неизвестные составляющие принял поперечные моменты и удлинения по продольному направлению конструкции, а также конструкцию с шарнирным закреплением. Стоит отметить, что состояние деформаций и внутренних сил, которые образуются в цилиндрической оболочке, принято балочной функцией, удовлетворяющей всем требованиям дифференциальных уравнений для расчёта оболочки, а также их закрепления на торцах конструкции.

На основе данного метода в работе [9] были построены уравнения с помощью вариационного метода для расчёта прямоугольных в плане складок с призматической формой, которые связаны между собой поперечным сечением с учётом их деформационного сдвига. Например, в работе П.А. Пастернак [84] рассматривает цилиндрическую оболочку средней длины в виде складок, имеющую “ n ” количество поперечных связных граней, и рассчитывает методом сил. В своей работе за неизвестные принял сдвигающие усилия и поперечные моменты.

Вторым подходом является метод интегрирования. Важно отметить, что значительный вклад в развитие методов интегрирования размещающих уравнений для оболочек был внесен В.З. Власовым [18]. Его разработки были использованы в работе Л.В. Канторовича [56]. На основе принципа возможных перемещений вариационный метод стал очень отличаться от методов Ритца-Тимашенко и Бубнова-Галёркина тем, что при решениях дифференциальных уравнений теории оболочек в частных производных в качестве неизвестных берутся не параметры конструкции, а функция от одной переменной величины, что делает задачу в решении более простой и точной, чем в вышеуказанных методах. Метод показал свою уникальность, что подтверждается дальнейшими исследованиями в области оболочки и пластин, которые приведены в работах Г.Г. Виноградова, Н.Д. Donnell [115], Ю.И. Немчинова [78], А.И. Осыкова [80]. Также метод был добавлен в действующие сегодня инструкции и нормы [75, 94] по расчёту оболочек и пластин, на основании которых было запроектировано и возведено большое количество оболочечных форм зданий и сооружений.

В.З. Власов также внес большой вклад в развитие третьего метода. Он в своих трудах вместе с Н.В. Колкуновым [52], П.А. Лукашом [66], Н.Н. Леонтьевым

вым [67], И.Ф. Образцовым [79] и другими учёными стал источником развития вариационного метода расчёта дифференциальных уравнений. Описывая их исследования, можно отметить два важных аспекта: 1) при помощи данного метода сделаны аналитические и полуаналитические анализы; 2) исследование и выводы в области практического применения для расчёта пространственных систем при проектировании в них оболочечных конструкций.

В последующих исследованиях над решением задачи применялась моментная теория упругих тонкостенных пространственных систем, с помощью которых получили решения пластин и оболочек с различным закреплением при действии произвольной нагрузки. В.В. Новожилов работал над этим вопросом в своей работе [75]. Он вывел систему уравнений пологих оболочек, как в системе В.З. Владова, в терминах комплексных усилий, которая имеет следующий вид:

$$-D = (\psi) + i \frac{h}{2\sqrt{3}(1-\mu^2)} \cdot \Delta^2 \Delta^2 \psi = q, \quad (1.4)$$

где в уравнении (1.4)

$$\psi = \varphi + i \frac{Eh^2}{2\sqrt{3}(1-\mu^2)} \cdot w.$$

Здесь D – жесткость оболочки, h – толщина оболочки, μ – коэффициент Пуассона.

Третий подход в решении дифференциальных уравнений является приближённым. Цель данного метода основана на приведении математической модели ребристой оболочки как гладкой оболочки с приведенными жёсткостными данными конструкции, подобные работы приводятся в работах [42, 71, 102].

На сегодняшний день благодаря развитию вычислительной машины можно рассчитать сложные конструктивные задачи (рёбер жесткости, отверстий в конструкции, граничных условий и т.п.), а также в зависимости от их жёсткостных характеристик. Программы вычислительных машин построены на методе конечных элементов (МКЭ), которому посвящены следующие научные работы [80, 84,

93]. При использовании МКЭ потенциальная энергия деформации определяется с помощью отдельных элементов и их параметров жёсткости.

Основные работы по разработке приближенных методов исследования изложены в работе [56], где рассматриваются геометрически нелинейные задачи изгиба пологих оболочек и пластин. В данном методе также широко используется вариационно-разностный метод, который приведен в работах [1, 69]. В работах Н.И. Кривошеева и М.С. Корнишина [50] рассматривается нелинейная задача расчётов ребристых и гладких оболочек ослабленными отверстиями.

Э.И. Григолюк [30], А.Н. Гузь [31], И.Н. Преображенский [85] и другие в своих работах изучали проблему расчета пластин и оболочек, имеющих несколько отверстий, за счёт которых они теряют долю несущей способности конструкции. Данное исследование требует строгого расчёта на прочность оболочки, который приводит к исследованию краевых задач. Для решения поставленной задачи необходимо найти максимальные значения напряжений в опасных зонах, а также важно оценить жёсткость оболочки в целом. Состояние исследования ребристых оболочек, как при статическом, так и при динамическом воздействии, приведено в работах И.Я. Амиро [5], П.И. Васильева [17], Б.Я. Кантора, С.И. Катарянова, В.В. Офий [44].

Исследованием НДС тонкостенных железобетонных оболочек и пластин в пределах текучести занимались как отечественные, так и зарубежные учёные. Данные исследования, приведенные в работах учёных, имеют практический и теоретический характер.

Основоположником практического метода исследования железобетонной цилиндрической оболочки был Б. Эллерс. Его метод расчёта основан на теории упругости. При расчёте этим методом принималось шарнирное оперение конструкции и не учитывалось в расчётах смещение ребер железобетонной оболочки. Данный метод приводит к решению системы дифференциальных уравнений четвертого порядка для определения моментов и перемещений ребер. Дальнейшим развитием предложенным методом занялись Г. Крамер и М. Грубер, которые в своих исследованиях начали учитывать смещения ребер.

Характеристику дифференциального уравнения (1.1) при $D_k(W) = D_k(\Phi) = 0$ для железобетонной оболочки и пластины с изгибными жёсткостями в двух направлениях D_{11}, D_{22} , а также жесткостью на кручение $D_{кр}$, исследовал М.Г. Нубер и привел в своей работе [118]. Он показал, что

$$D_{кр} = \sqrt{D_{11} \cdot D_{22}}, \quad (1.5)$$

где D_{11} и D_{22} выражаются через приведенные моменты погонного железобетонного сечения $J_{пр,x}$ и $J_{пр,y}$.

К сожалению, в теоретических и практических расчётах для железобетонных конструкций и железобетонных оболочек нужно проводить расчёт по предельным состояниям на различных стадиях работы. Такие исследования приведены в работах [2, 28, 80], где изучается вопрос деформации до и после образования трещин.

По первой группе предельного состояния для расчёта железобетонных оболочек и пластин широко применяется метод предельного равновесия, основанный на методе жесткопластического тела. По исследованиям С.М. Крылова [53], основные принципы расчёта были ещё заложены Кулоном, но полное разъяснение метода предельного равновесия и теоретического обоснования сделали в своих трудах А.А. Гвоздев [27, 28] и А.Р. Ржаницын [92]. Также сделаны предпосылки метода предельного равновесия: а) можно пренебречь изменением начальной формы конструкции, обусловленным деформацией системы; б) элементы системы не должны допускать значительные деформации без учёта уменьшения в них усилий, то есть испытывать хрупкого разрушения.

Исходя из этих предпосылок, при определении несущей способности методом предельного равновесия существует два способа.

Первый способ – нахождение максимальной нагрузки, при которой также возможно одновременно соблюдение условий равновесия и предельного условия.

Второй способ – рассматривается кинематическая нагрузка, возможное состояние оболочки. Для каждого состояния при этом определяется нагрузка, отвечающая условию равенства работ внешних и предельных усилий на возмож-

ные перемещения, в то же время отыскивается минимальная кинематическая нагрузка, отвечающая схеме излома конструкции при полной её потери несущей способности.

По второй группе предельного состояния (стадия образования трещин) принимается кинематический метод предельного равновесия, который исследован в работах В.Н. Ахвледиани [7], А.С. Дехтяря [35], Г.К. Хайдукова [103, 104], В.В. Шугаева [107] и других ученых. Данный метод применяется к более сложным конструктивным решениям оболочек. Как отметили выше, первая группа предельного состояния даёт нам максимальную нагрузку, которая может содействовать разрушению оболочки и корректироваться при помощи оптимального выбора форм оболочки и её армирования.

Считается, что основным затруднением такого подхода является получение экспериментальных данных наиболее возможной схемы разрушения конструкций. Экспериментально провел А.А. Чирас в своём исследовании [105]. Он предлагает определить схему разрушения конструкции в соответствии со скоростью изменения диссипации её энергии методом линейного программирования. Таким образом, на сегодняшний день для практического применения созданы многочисленные методы расчёта железобетонных оболочек с использованием линейной теории упругости, физических моделей образцов из железобетона при одноосном напряженном состоянии. Данный метод хорошо исследован на основе механических материалов и широко применяется в расчётах проектных организаций.

Исследование показывает, что в настоящее время работа железобетонной оболочки с трещинами под воздействием статистической или динамической нагрузки, особенно при двух- или трехосном напряжённом состоянии, исследована недостаточно глубоко.

С другой стороны, прогресс в мире требует практических решений для строительства пространственных конструкций при создании уникальных зданий и сооружений, и все более настойчиво утверждаются новые требования к расчёту оболочек в нормативных документах с учётом специфики работы бетона и арматуры.

1.3. Состояние исследования теории расчёта оболочек в условиях ползучести бетона

Методы статистической теории упругости не учитывают фактор времени, между тем даже при постоянной нагрузке НДС конструкция может меняться по времени в широких пределах. Многочисленные исследования и опыт в практике показывают, что во время неупругой деформации вследствие ползучести материала в некоторых случаях ползучесть материала намного превышают изначальные упругое и упругопластические деформации. Под словом «ползучесть» принято определение всей совокупности явлений, которые считаются источником деформаций твердых тел (конструкций), имеющие ограничение во времени, т.е. через некоторое время переходят на другую стадию, в отличие от термина «пластичности», где фактор времени не имеет значения. Коротко рассмотрим уравнения ползучести оболочки и их особенности, которые построены на основе трех теорий.

Первая теория течения получила известность и широкое применение после исследования М. Качанова в своей работе [43], он получил хорошие результаты для мало меняющихся нагрузок (рисунок 1.1).

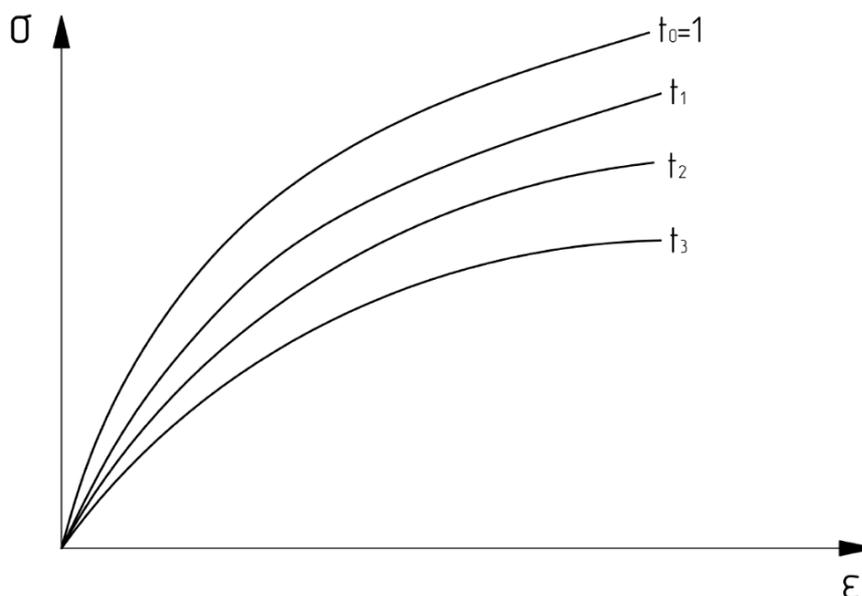


Рисунок 1.1 – Изохронные кривые ползучести для моментов времени

Уравнение теории течения следующее:

$$\varepsilon = B_1(t) \cdot \sigma^m + \frac{1}{E} \cdot \sigma, \quad (1.6)$$

где $B_1(t)$ – положительная убывающая функция времени, отсчитываемая с момента начала ползучести симптоматически стремящейся к предельному значению B_1 ; B_1, m – постоянные, характерные для композиционного материала при заданной температуре.

Вторая теория старения – деформация ползучести связана с напряжениями и временем конечной зависимостью, которая имеет следующий вид:

$$\varepsilon_{\text{п}} = f(\sigma, t). \quad (1.7)$$

Тогда полная деформация при этапной зависимости и подобии кривых ползучести выглядит следующим образом:

$$\varepsilon = \Omega(t) \cdot \sigma^m + \frac{\sigma}{E}. \quad (1.8)$$

Уравнение (1.8) используется только при действии постоянной нагрузки. Для всех нагрузок, действующих на конструкцию, используется теория, предложенная Ю.Н. Работовым [88], основываясь из кривизны ползучести при постоянных нагрузках, строятся изохронные кривые ползучести для моментов времени $t_0, t_1, t_2, t_3 \dots$ (рисунок 1.2).

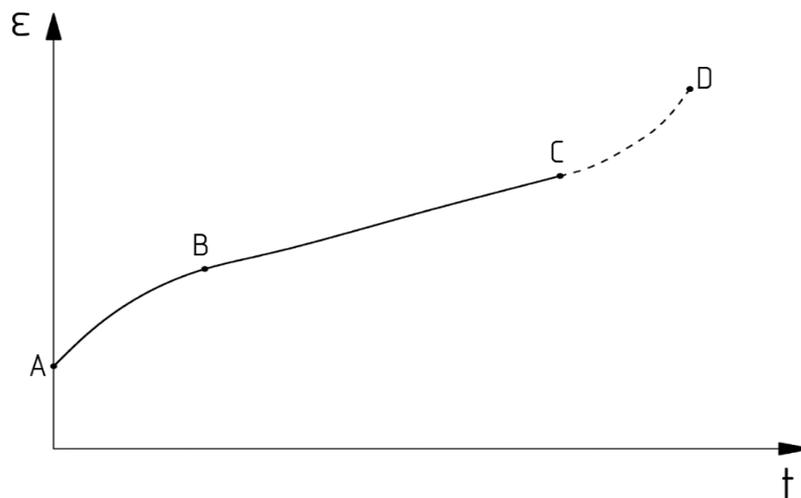


Рисунок 1.2 – Линия кривой ползучести в зависимости от времени

Эти кривые позволяют использовать в решении теории пластичности задачи теории ползучести. Важно отметить, что к теории старения также относят уравнение Н.М. Беляева [166]. Уравнение имеет следующий вид:

$$\varepsilon = \sigma \cdot \left[1/E + \int_0^t B_1(t) \cdot \sigma^{m-1} \cdot dt \right]. \quad (1.9)$$

Третья теория – теория упрочнения, где скорость ползучести в каждый момент времени определяется величиной деформации ползучести, которая имеет следующий вид:

$$P = f(\sigma) / g(p), \quad (1.10)$$

где P – деформация ползучести; $f(\sigma), g(p)$ – возвращающие функции.

Для простоты расчётов часто принимают исследования Ю.Н. Работнова [88]

$$\left. \begin{aligned} f(\sigma) &= K \cdot \exp(\sigma) \cdot \frac{1}{A}; \\ K &\geq 0, \quad A \geq 0; \end{aligned} \right\} \begin{aligned} g(\varepsilon_p) &^\alpha; \\ \alpha &\geq 0. \end{aligned} \quad (1.11)$$

Из исследования Л.М. Качанова [43] можно сделать вывод, что лучше всего использовать для обработки экспериментальных данных теорию упрочнения

$$P = \varphi(\sigma, \lambda). \quad (1.12)$$

Здесь λ – работа деформации ползучести. $\lambda = \int \sigma \cdot dP$.

Интерес теории упрочнения вызван в использовании хрупких материалов, особенно стоит отметить бетон и полимербетон. Использование данных материалов в качестве конструкционных вызывает ряд особенностей в течение действия нагрузок и их изменении, которые удовлетворительно описывают ползучесть бетона. Теория основана на интегральных наследственных зависимостях, разработанных Больцманом и Вольтером, и получила дальнейшее развитие в работах Ю.Н. Работнова [88], М.И. Розовского [90], А.Р. Ржаницына [92] и др. Уравнение наследственной ползучести в общем виде из работы Н.Х. Арутюнана [6] имеет вид

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E(t)} \cdot \left[\sigma(t) + \int_0^t \sigma(\tau) \cdot K(t, \tau) \cdot d\tau \right]. \quad (1.13)$$

В уравнении (1.13) $K(t, \tau)$ – ядро ползучести, и оно подбирается с помощью экспериментальных функций, например границы – меры ползучести, приведенные в работе [9]:

$$K(t, \tau) = -E(t) \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{1}{E(t)} \right] - \frac{\partial}{\partial \tau} C(t, \tau) \right\}. \quad (1.14)$$

В случае если ядро уравнений имеет вид

$$K(t, \tau) = \sum_{i=1}^n f_i(t) \cdot \varphi_i(\tau). \quad (1.15)$$

Здесь $f_i(t)$ и $\varphi_i(\tau)$ – две системы линейно независимых функций, то в таком случае ядро называется вырожденным.

В таком случае уравнение (1.13) может быть сведено к линейному дифференциальному уравнению первого порядка, что даёт возможность реализации задач теории наследственной ползучести. Для описания работы бетона в процессе ползучести в своей работе [6] Н.Х. Арутюнан предложил уравнение:

$$E(t) \cdot \varepsilon(t) = \sigma(t) \cdot t \cdot \int_0^t \sigma(t) \cdot K_1(t, \tau) \cdot d\tau + \int_{l_0}^t f(\sigma) \cdot K_2(t, \tau) \cdot d\tau. \quad (1.16)$$

В уравнении (1.15) $K_1(t, \tau)$ и $K_2(t, \tau)$ – вырожденные ядра; $f(\sigma)$ – функция нелинейности.

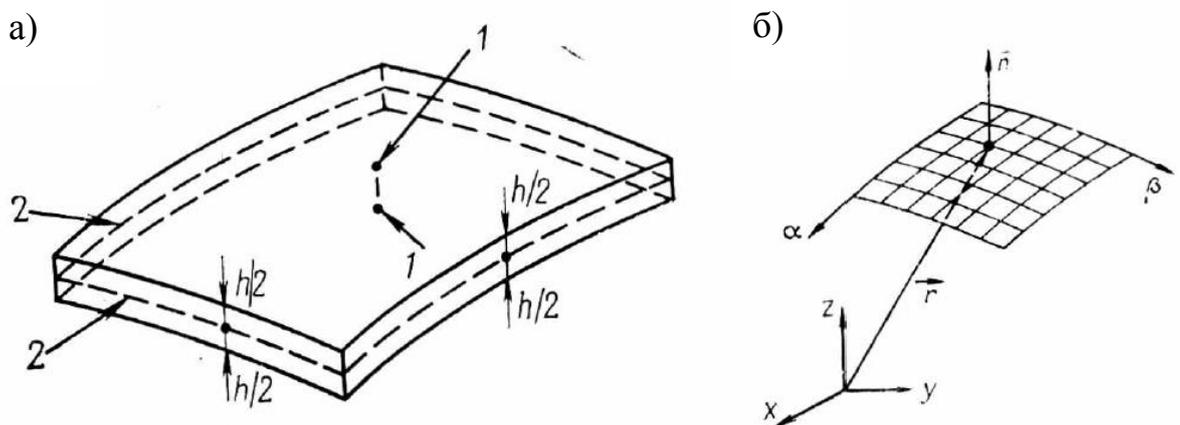
Уравнение (1.16) соответствует требованиям для определения нелинейных задач, которые рассматривались отечественными и зарубежными учёными М.И. Розовским и Лидерманом, выведенных для упругих материалов.

1.4. Исследования предельного равновесия цилиндрических оболочек при изменении напряженно-деформированного состояния

Расчётная схема, метод и точность расчёта пространственной тонкостенной конструкции определяются её значимостью и ответственностью, а также степенью изученности рассматриваемой конструктивной формы, которая зависит от

формы оболочки. Часто используется упрощённая или приближённая расчётная схема, однако здесь представляется теория тонких оболочек.

Для того чтобы спроектировать, исследовать характер НДС оболочки и проверить её прочность (устойчивость) нужно провести анализ геометрии оболочки в пространстве. Конструктивная схема и геометрическая форма оболочки влияют при определении внутренних усилий, моментов, а также перемещений оболочки (рисунок 1.3). Анализ НДС оболочек в условиях ползучести исследовался А.С. Волмером, П.Г. Зыкиным, А.П. Кузнецовым, П.М. Куршиным



1 – лицевая поверхность; 2 – боковая поверхность

Рисунок 1.3 – Момент и усилия в тонкостенной цилиндрической оболочке

а – усилия и моменты, учитываемые при расчете; б – усилия и моменты, не учитываемые при расчете

Из поверхностей оболочки удобнее всего описать среднюю поверхность (см. рисунок 1.3, а), граничный контур и толщину оболочки δ, h . Обычно среднюю поверхность относят к криволинейным координатам α, β , задавая векторным равенством (см. рисунок 1.3, б).

$$\vec{r} = \vec{r}(\alpha, \beta). \quad (1.17)$$

После заданной средней поверхности можно определить квадрат дифференциала длины дуги произвольной линии поверхности. Представим, что криволи-

нейные координаты α и β образуют поверхность ортогональной сетки, тогда квадрат дифференциала будет равен

$$ds^2 = ds_\alpha^2 + ds_\beta^2 = A^2 \cdot d\alpha^2 + B^2 d\beta^2. \quad (1.18)$$

Здесь A и B – коэффициенты первой квадратичной формы поверхности (параметры Ляме).

Коэффициенты первой квадратичной формы определяются по следующим формулам:

$$A = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \alpha}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \alpha}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \alpha}\right)^2};$$

$$B = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \beta}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \beta}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \beta}\right)^2}. \quad (1.19)$$

Параметры Ляме являются основными множителями, с помощью которых связующие приращения дуг координатных линий с приращениями соответствующих криволинейных координат рассчитывают по формуле

$$ds_\alpha = A d\alpha; \quad ds_\beta = B d\beta. \quad (1.20)$$

Нормали к срединной поверхности, проведенные в соседних точках в общем случае, друг с другом не пересекаются (рисунок 1.4), но всегда есть два направления, для которых это пересечение имеет место. Эти направления на поверхности (линии кривизны) называются главными или линиями главных кривизн. Нормали к поверхности, проведенные в двух бесконечно близких точках, лежащих на линиях главной кривизны, пересекутся в точке, называемой центром кривизны. Расстояние от центра кривизны до поверхности в рассматриваемой точке называется радиусом кривизны. В каждой поверхности одна из этих точек может быть охарактеризована двумя радиусами кривизны R_α и R_β .

$$k_\alpha = \frac{1}{R_\alpha}; \quad k_\beta = \frac{1}{R_\beta}. \quad (1.21)$$

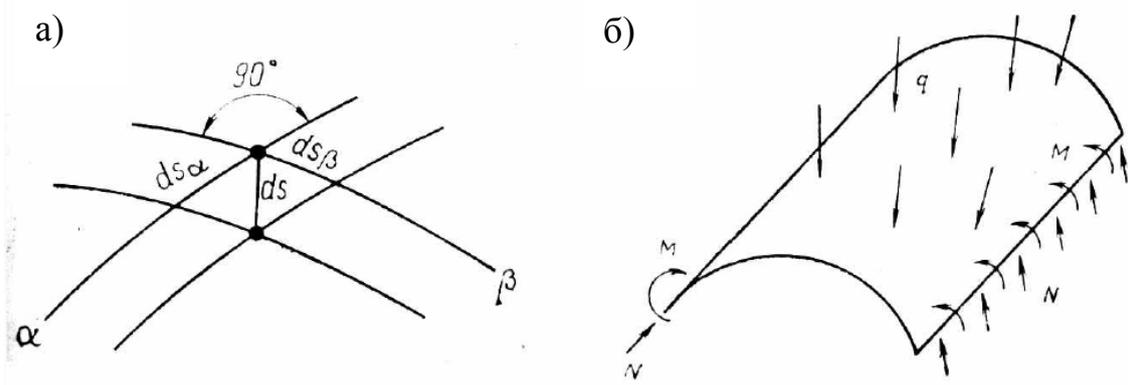


Рисунок 1.4 – Разомкнутая оболочка под действием внешних нагрузок:

а – криволинейные координаты; б – разомкнутая оболочка
под действием момента нормальных сил

Кривизной средней поверхности тонкостенных оболочек называют обратные величины радиусов кривизны поверхности оболочек, а величины, обратные к главным радиусам, называются главными кривизнами в данной точке. В практике формы поверхности оболочек классифицируются по гауссовой кривизне. Это кривизна определяется как произведение кривизны оболочки, т.е. $K = k_1 \cdot k_2$. Примеры встречаемых гауссовых кривизн приведены на рисунке 1.5.

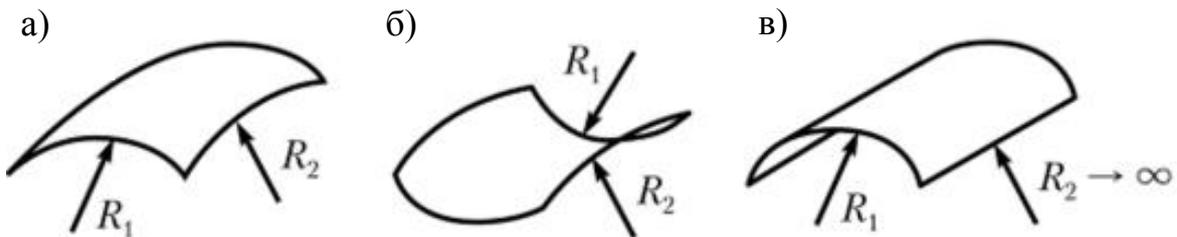


Рисунок 1.5 – Образцы гауссовых кривизн: а – положительная;

б – отрицательная; в – нулевая

Важной особенностью работы тонкостенной цилиндрической оболочки является форма гауссовой кривизны поверхности (см. рисунок 1.5), которая может быть положительной, отрицательной и нулевой.

$$k = k_\alpha k_\beta = \frac{1}{R_\alpha R_\beta}. \quad (1.22)$$

Параметры Ляме и радиусы кривизны связаны между собой уравнениями Кодации-Гаусса. Более подробные сведения о геометрии оболочек можно найти в работах [61, 97, 98].

Учитывая то, что оболочка имеет относительно других параметров малую толщину, действующее напряжение в сечении конструкции можно заменить обычными статистическими эквивалентными усилиями и моментами. В результате чего можно проанализировать равновесие срединной поверхности, нагруженной верхней части поверхности нагрузкой q , а также краевыми усилиями N и краевым моментом M (см. рисунок 1.4).

Для данного элемента можно составить шесть уравнений равновесия в соответствии с координатами

$$\left. \begin{array}{lll} \sum X = 0; & \sum Y = 0; & \sum Z = 0; \\ \sum M_x = 0; & \sum M_y = 0; & \sum M_z = 0. \end{array} \right\} \quad (1.23)$$

Пять из шести уравнений в развернутом виде представляют собой дифференциальные зависимости, а шестой будет иметь следующий вид:

$$T_{\alpha\beta} - T_{\beta\alpha} + \frac{M_{\alpha\beta}}{R_\alpha} - \frac{M_{\beta\alpha}}{R_\beta} + \frac{M_\alpha - M_\beta}{R_{\alpha\beta}} = 0. \quad (1.24)$$

Из уравнения (1.24) можно найти равенство, введя симметричные усилия T и H , определяемые следующими формулами:

$$\begin{aligned} T &= T_{\alpha\beta} - \frac{M_{\beta\alpha}}{R_\beta} + \frac{M_{\alpha\beta}}{R_{\alpha\beta}} = T_{\beta\alpha} - \frac{M_{\alpha\beta}}{R_\alpha} + \frac{M_\beta}{R_{\alpha\beta}}; \\ H &= \frac{M_{\alpha\beta} - M_{\beta\alpha}}{2} \approx M_{\alpha\beta} \approx M_{\beta\alpha}. \end{aligned} \quad (1.25)$$

Останется пять других уравнений, в которые будут входить восемь неизвестных усилий. Из этих пяти уравнений можно исключить поперечные силы Q .

В итоге останется три уравнения, в которые входит только шесть неизвестных усилий:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial BN_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial A^2 T}{\partial \beta} - \frac{\partial B}{\partial \alpha} N_\beta + \frac{1}{R_\alpha} \left(\frac{\partial BM_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial A^2 H}{\partial \beta} - \frac{\partial B}{\partial \alpha} M_\beta \right) - \\
& - \frac{1}{R_\beta} \left(\frac{\partial AM_\beta}{\partial \beta} + \frac{1}{B} \cdot \frac{\partial B^2 H}{\partial \alpha} - \frac{\partial A}{\partial \beta} M_\alpha \right) + \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{A}{R_\alpha} H - \frac{A}{R_{\alpha\beta}} M_\beta \right) + \\
& + \frac{\partial A}{\partial \beta} \left(\frac{1}{R_\beta} H - \frac{A}{R_{\alpha\beta}} M_\alpha \right) + ABq_\alpha = 0; \\
& \frac{\partial BN_\alpha}{\partial \beta} + \frac{1}{B} \frac{\partial B^2 T}{\partial \alpha} - \frac{\partial B^2 T}{\partial \alpha} - \frac{\partial A}{\partial \beta} N_\alpha + \frac{1}{R_\beta} \left(\frac{\partial BM_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{1}{A} \frac{\partial A^2 H}{\partial \beta} - \frac{\partial B}{\partial \alpha} M_\beta \right) + \\
& + \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{B}{R_\beta} H - \frac{R}{R_{\alpha\beta}} M_\alpha \right) + \frac{\partial B}{\partial \alpha} \left(\frac{1}{R_\alpha} H - \frac{R}{R_{\alpha\beta}} M_\beta \right) + ABq_\beta = 0; \\
& \frac{N_\alpha}{R_\alpha} - \frac{2T}{R_{\alpha\beta}} + \frac{N_\beta}{R_\beta} - \\
& - \frac{1}{AB} \left\{ \frac{\partial}{\partial \alpha} \frac{1}{A} \left(\frac{\partial BM_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{1}{A} \frac{\partial A^2 H}{\partial \beta} - \frac{\partial B}{\partial \alpha} M_\beta \right) + \frac{\partial}{\partial \beta} \frac{1}{B} \left(\frac{\partial AM_\beta}{\partial \beta} + \frac{1}{B} \frac{\partial B^2 H}{\partial \alpha} - \frac{\partial A}{\partial \beta} M_\alpha \right) \right\} + \\
& + \frac{1}{R_{\alpha\beta}} \left[- \left(\frac{1}{R_\alpha} + \frac{1}{R_\beta} \right) H + \frac{M_\alpha + M_\beta}{R_{\alpha\beta}} \right] = q_n. \tag{1.26}
\end{aligned}$$

Следовательно, из уравнений видно, что задача о равновесии оболочки является статически неопределимой, и для её решения необходимо дальнейшее изучение вопроса устойчивости пространственной конструкции, а именно тонкостенной железобетонной разомкнутой оболочки, и определения дополнительных условий, которыми могут быть уравнения, связывающие деформации и усилия, а также деформации с перемещениями под действием динамических нагрузок.

1.5. Исследования устойчивости тонкостенной цилиндрической оболочки при динамических воздействиях

Цилиндрические оболочки используются во многих отраслях промышленности, и проблема их устойчивости стала актуальной темой для развития многих наук. Колебанием замкнутых и разомкнутых оболочек занимались многие исследователи.

дователи, в том числе В.З. Власов [18-20], В.Д. Кубенко [46-47], Г.С. Лейзерович [58-61], А.А. Малинин [67], Х.М. Муштари [72, 73], Н.А. Тарануха [94, 95], С.П. Тимашенко [99], а также зарубежные исследователи М. Amabili [109], S.C. Kattimani [119], Т.Н. Lee [122], R.S. Lew [123], N.J. Mallon [125, 126], H.G. Donnell [115] и др.

Первое уравнение для расчёта колебания оболочки разомкнутой формы было опубликовано Жермен-Лагранжа в 1802 г., описывающее малые колебания пластины, которые приводятся в работах E.F.F. Chladni [111, 112]. Он доказал, что уравнение описывает малые поперечные колебания изотропной пластины при $|x| < a$, $|y| > b$, оболочки постоянной толщины h , δ приводятся в следующем виде:

$$D\Delta\Delta\omega + \rho \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} = 0, \quad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}. \quad (1.27)$$

В уравнении (1.27) D – цилиндрическая жёсткость оболочки, $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$; Δ – двухмерный оператор Лапласа, E – модуль упругости материала, ρ – плотность материала, μ – коэффициент Пуассона ($\mu = 0,2$), t – время, ω – поперечный прогиб.

При решении задачи колебания оболочки в линейной постановке имеют малую долю погрешности порядка δ/R в сравнении с единицей (толщины и радиуса оболочки). Нижеприведенные уравнения описывают колебания оболочки.

$$\frac{\partial N_1}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial S_{12}}{\partial \theta} + P_1 - \rho h \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0, \quad (1.28)$$

$$\frac{\partial S_{21}}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial N_1}{\partial \theta} + \frac{1}{R} Q_2 + P_2 - \rho h \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0. \quad (1.29)$$

В случае решения задачи определение собственных частот и форм колебаний пластин и оболочек с учётом граничного условия сводится к вычислению W прогиба и частоты $k^4 = \rho h \omega^2 / D$ из однородной краевой задачи:

$$\Delta\Delta W - k^4 W = 0. \quad (1.30)$$

При условии $x = \pm a$

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} = 0; \quad (1.31)$$

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^3} + (2 - \nu) \frac{\partial^3 W}{\partial y^3 \partial x} = 0. \quad (1.32)$$

А при $x = \pm b$

$$\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} = 0; \quad (1.33)$$

$$\frac{\partial^2 W}{\partial y^3} + (2 - \nu) \frac{\partial^3 W}{\partial y \partial x^2} = 0. \quad (1.34)$$

Исследователи Э.И. Григолюк и И.Т. Селезнев [30] в своей работе изучали вопрос колебательного движения цилиндрической разомкнутой оболочки при шарнирном оперении с двух сторон, а с других сторон – не закреплена. В результате выявили численные формы прямых колебаний, а также отметили, что при вибрации небольшие отклонения в перемещении оболочки можно определить по найденным формам прямых колебаний. Из найденной криволинейной конечной математической модели, описывающей математически колебания разомкнутой оболочки, приведено следующее:

$$\left. \begin{aligned} D\nabla^4 w - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} - m\omega^2 w &= 0, \\ \frac{1}{E} \nabla^4 \Phi + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1.35)$$

В уравнениях (1.35) ∇ – бигармонический оператор Лапласа, в случае упругих пластин равен: $\Delta^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \partial^2 / \partial y^2$; $w(x, y, t)$ – динамический прогиб; $\Phi(x, y, t)$ – функция напряжений в срединной поверхности; ρ – плотность материала; t – время; $\delta(x, y)$ – функция Дирака.

В работе [77] по линейной теории исследовались классы задач о свободных колебаниях оболочек, для которых в результате были получены зависимости от трех подходов: теория оболочек с учетом сдвига (по модели Тимашенко), класси-

ческая теория оболочек (по модели Кирхгофа-Лява) и пространственная теория упругости.

Таким образом, вышеизложенный обзор литературных источников позволяет сделать выводы и указать нерешенные проблемы в области динамической устойчивости железобетонных оболочек при динамическом воздействии:

1. Существующие математические модели в неполной мере описывают колебания железобетонных оболочек при динамическом воздействии на всех стадиях нагружения.

2. Мало подтверждённых экспериментальных исследований о задаче влияния процента армирования на процесс колебания тонкостенной цилиндрической оболочки.

3. Не полностью решена задача влияния модуля упругости на устойчивость оболочки при динамических воздействиях.

4. Не в полной мере исследовано воздействие сочетания статистических нагрузок и малой присоединенной массы на частоты колебания железобетонной оболочки.

5. Теоретически и экспериментально не выявлено влияние класса бетона на характер процесса динамических колебаний тонкостенных оболочек.

Исходя из этого выясняется, что проблема прочности и динамической устойчивости тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек от влияния процента армирования и классов бетона остаётся весьма актуальной. Для решения перечисленных выводов нужно выполнить следующие задачи:

- получить теоретические зависимости колебаний тонкостенных цилиндрических оболочек при изменении класса бетона;

- получить экспериментальные зависимости влияния класса бетона и процента армирования на частотные характеристики колебаний тонкостенных разомкнутых цилиндрических оболочек при динамических воздействиях;

- разработать математическую модель для расчета частоты колебаний тонкостенной разомкнутой железобетонной оболочки, учитывающую усредненный модуль упругости при воздействии динамических нагрузок;

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

- разработать методику проведения экспериментальных исследований моделей разомкнутой железобетонной тонкостенной цилиндрической оболочки для определения влияния класса бетона и процента армирования на устойчивость оболочек к динамическим воздействиям;

- провести экспериментальную проверку разработанной математической модели и установить соответствия с экспериментальными данными;

- разработать устройство погашения колебаний для сохранения устойчивости и долговечности зданий и сооружений оболочечного типа.

ГЛАВА 2. ПРОГРАММА, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ И ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЯ РАЗОМКНУТОЙ ОБОЛОЧКИ

Чтобы выполнить поставленные цели и задачи, была разработана комплексная программа проведения экспериментальных исследований свободных и вынужденных колебаний разомкнутых оболочек при изменении процента армирования, класса бетона и вида закрепления образцов. Цель разработанной программы заключается в определении частотных спектров железобетонных оболочек с помощью экспериментальных исследований. Созданная экспериментальная база и разработанная методика исследования, позволяющие с достаточной точностью проводить и получить экспериментальные результаты частотных спектров колебаний замкнутых и разомкнутых оболочек, способствуют обеспечению долговечности и надёжной эксплуатации.

2.1. Исследование влияния модуля упругости на частоты колебания железобетонной оболочки при разных нагрузениях

Одна из поставленных задач – это экспериментальные исследования над тонкостенными цилиндрическими железобетонными разомкнутыми оболочками, для чего и была разработана экспериментальная программа. Важно отметить, что результаты, полученные автором, сопоставляются с численным расчётом, выполненным с использованием «ОСКРОСМ2017».

Железобетон является композиционным материалом, сочетающим бетон (таблица 2.1) и арматуру (стальные стержни), которые дополняют друг друга во время работы при сжатии и растяжении конструкции, что увеличивает несущую способность данных строительных конструкций. Из-за своей формы разомкнутые оболочки обладают высокой жесткостью, но при длительных воздействиях на же-

лезобетонную конструкцию происходит потеря устойчивости. Жесткость оболочки определяется по формуле

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)}, \quad (2.1)$$

где E – модуль упругости; h – толщина стенки оболочки; μ – коэффициент Пуассона.

Таблица 2.1

Физико-механические характеристики испытываемых образцов

Класс бетона	Модуль упругости E , МПа	Допустимые напряжения $\sigma_{\text{доп}}$, МПа	Осевое сжатие $R_{b,n}$, МПа	Осевое растяжение $R_{bt,n}$, МПа
B15	$23,5 \times 10^3$	6,10	8,5	0,75
B20	$27,5 \times 10^3$	6,30	11,5	0,9
B30	$32,5 \times 10^3$	6,65	22,0	1,75
B40	$36,0 \times 10^3$	7,0	29,0	2,10

Как известно, предварительно напряжённую арматуру пространственной конструкции рассчитывают по двум факторам – прочности и трещиностойкости. Вопрос об образовании трещин решается с использованием бетонов высоких классов, которые более устойчивы к появлению трещин в ранних стадиях работы конструкции. Исходя из этого, расчёт на прочность производится как для обычной железобетонной конструкции.

Площадь сечения рабочей арматуры определяется для каждого 1 м участка следующим образом:

$$Tk = F_{a.п.} \cdot \sigma_{п.п.} + F_{a.н.} \cdot \sigma_T, \quad (2.2)$$

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

$$F_{a.н.} = \frac{Tk - F_{a.п.} \cdot \sigma_T}{\sigma_{п.п.}}. \quad (2.3)$$

Величина работы арматуры на сжатие вычисляется из условия равенства деформации сердечника ε_a и ε_b по закону Гука

$$\frac{\sigma_{a.н.}}{E_a} = \frac{\sigma_b}{E_b}; \sigma_{a.н.} = \frac{E_a}{E_b} \sigma_b. \quad (2.4)$$

В уравнении E_a – модуль упругости арматуры; E_b – модуль упругости бетона. Подставляя полученные значения, получим следующее уравнение:

$$\sigma_b = \frac{E_a \cdot \sigma_{a.н.}}{E_b + nFe} \quad (2.5)$$

или выражаем через коэффициент армирования

$$\sigma_b = \frac{\mu_n}{1 + n\mu_n} \sigma_{a.н.}. \quad (2.6)$$

Исходя из процента армирования, нужно определить минимальную толщину разомкнутой железобетонной оболочки следующим уравнением:

$$\delta_{min} = 3,25 \frac{T}{\sigma_b}. \quad (2.7)$$

Видно, что величина коэффициента армирования влияет на толщину оболочки, от которой зависит и вес конструкции, чем тяжелее конструкция, тем она хуже воспринимает динамические усилия, что заставляет нас (исследователей) изучить вопрос влияния процента на устойчивость к динамическим воздействиям.

2.2. Экспериментальная база для исследования

Для проведения экспериментального исследования в лабораторных условиях ФГБОУ ВО «КнАГУ» был спроектирован и создан испытательный стенд (рисунок 2.1), позволяющий проводить испытания над оболочками разомкнутой формы и пластинами. Исследования проводились над железобетонными образцами с разными классами бетона и процентом армирования. В ходе проведения ис-

пытательных исследований были использованы сертифицированные и апробированные устройства: спектрометр «NEX CG Rigaku», вихретоковый пробник «Zet701», анализатор спектра колебаний и семейство программ «ZetLAB».

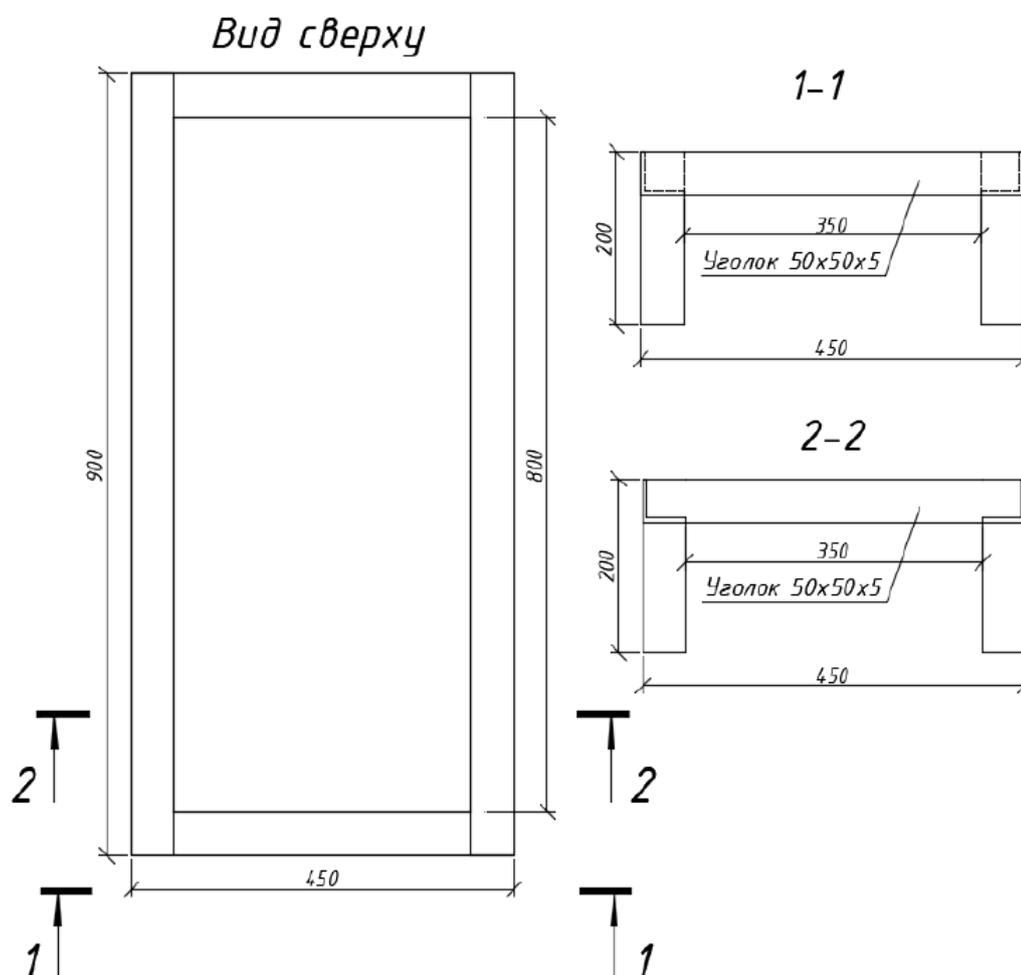


Рисунок 2.1 – Схема испытательной установки образца исследования

Для постановления экспериментальных исследований был изучен состав сделанных образцов.

На базе лабораторий железобетонных конструкций кафедры «Строительство и архитектура» ФГБОУ ВО «КнАГУ» было изготовлено более 50 образцов, но многие из них были непригодными (таблица 2.2). Марки бетона были определены с помощью гидравлического прессы после проведения испытаний над образцами из бетона марок от В15 до В40 (рисунок 2.2). Учитывая габариты образцов,

используемые марки бетона имеют достаточную прочность, можно считать их высокопрочными (рисунок 2.3).

Таблица 2.2

Габариты испытательных образцов

Тип образца	Длина L , мм	Ширина b , мм	Высота h , мм	Толщина δ , мм	Класс бетона В	Количество, шт.
1	800	400	60	15	15	16
2	800	400	60	15	20	11
3	800	400	60	15	30	14
4	800	400	60	15	40	8



Рисунок 2.2 – Испытательный пресс ТП-1-1500
(два диапазона 30/150 т)

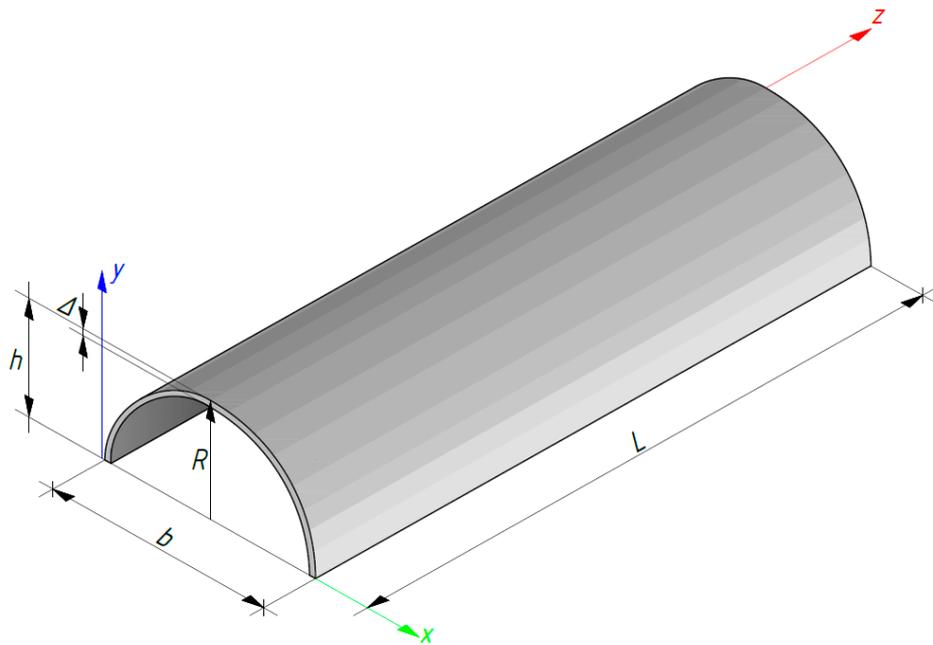


Рисунок 2.3 – Геометрия тонкостенной цилиндрической разомкнутой оболочки и её система координат

С помощью контактных датчиков ZETLab BC110, ZET 701 (рисунки 2.4 – 2.5) были определены численные характеристики колебания тонкостенной железобетонной оболочки, датчики (таблицы 2.3 – 2.4) служили в качестве сосредоточенных масс.

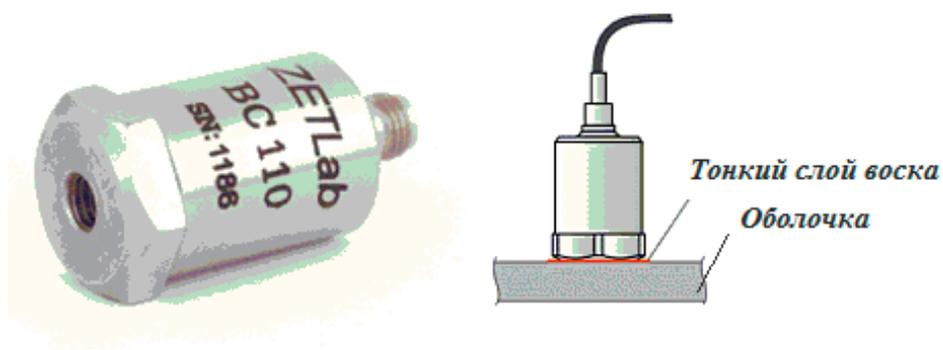


Рисунок 2.4 – Контактный датчик ZETLab BC110



Рисунок 2.5 – Типовое изображение
вихретокового пробника ZET701

Таблица 2.3

Характеристика работы контактного датчика ZETLab BC110

Параметры	Единицы измерения	Величина
Чувствительность	–	–
Частотный диапазон	–	–
Относительная поперечная чувствительность	%	<5
Амплитудный диапазон	g	±50
Собственный шум, СКЗ	mg	<0,5
Температурный диапазон	°C	+40 ... +70
Напряжения питания	В	+18 ... +30
Ток питания	мА	3
Уровень постоянного напряжения на выходе	В	10 ... 13
Выходное сопротивление	Ом	<500
Материал корпуса	–	Нержавеющая сталь
Тип соединителя	–	SMA
Поставляемые принадлежности	–	Кабель, шпилька
Кабель (длина кабеля)	–	SMA-BNC, 2

Характеристики вихретокового пробника ZET 701

Метрологические характеристики	
Диапазон измерения	0...8000 мкм
Технические характеристики	
Тип разъёма для подключения первичного преобразователя	SMA
Измеряемый параметр	Расстояние/перемещение
Способ измерения	Бесконтактный
Частота выдачи данных	1, 10, 50, 100, 500, 1000 Гц
Интерфейс передачи данных	CAN 2.0
Защита от переплюсовки	+
Защита от входа от электростатического разряда 4 кВ	+
Эксплуатационные характеристики	
Масса	40 г
Питание устройства	От 9 до 24 В
Потребляемый ток при напряжении 12 В	До 110 мА
Температурный диапазон эксплуатации	От -40 до +100 °С

Колебательный импульс создавался механическим путём с помощью молотка «AU03» (рисунок 2.6), импульс от датчиков передается через кабель «SMA-BNC» на цифровой преобразователь программного обеспечения (далее ПО) «ZETLab». Полученные данные от VC110 анализируются ПО «ZETLab» и выявляется спектр колебательного процесса в тонкостенной железобетонной оболочке, что позволяет получить характеристику материала на динамическую устойчивость. Схема по проведению испытательных исследований приведена на рисунке 2.7.



Рисунок 2.6 – Молоток возбуждения колебаний AU03

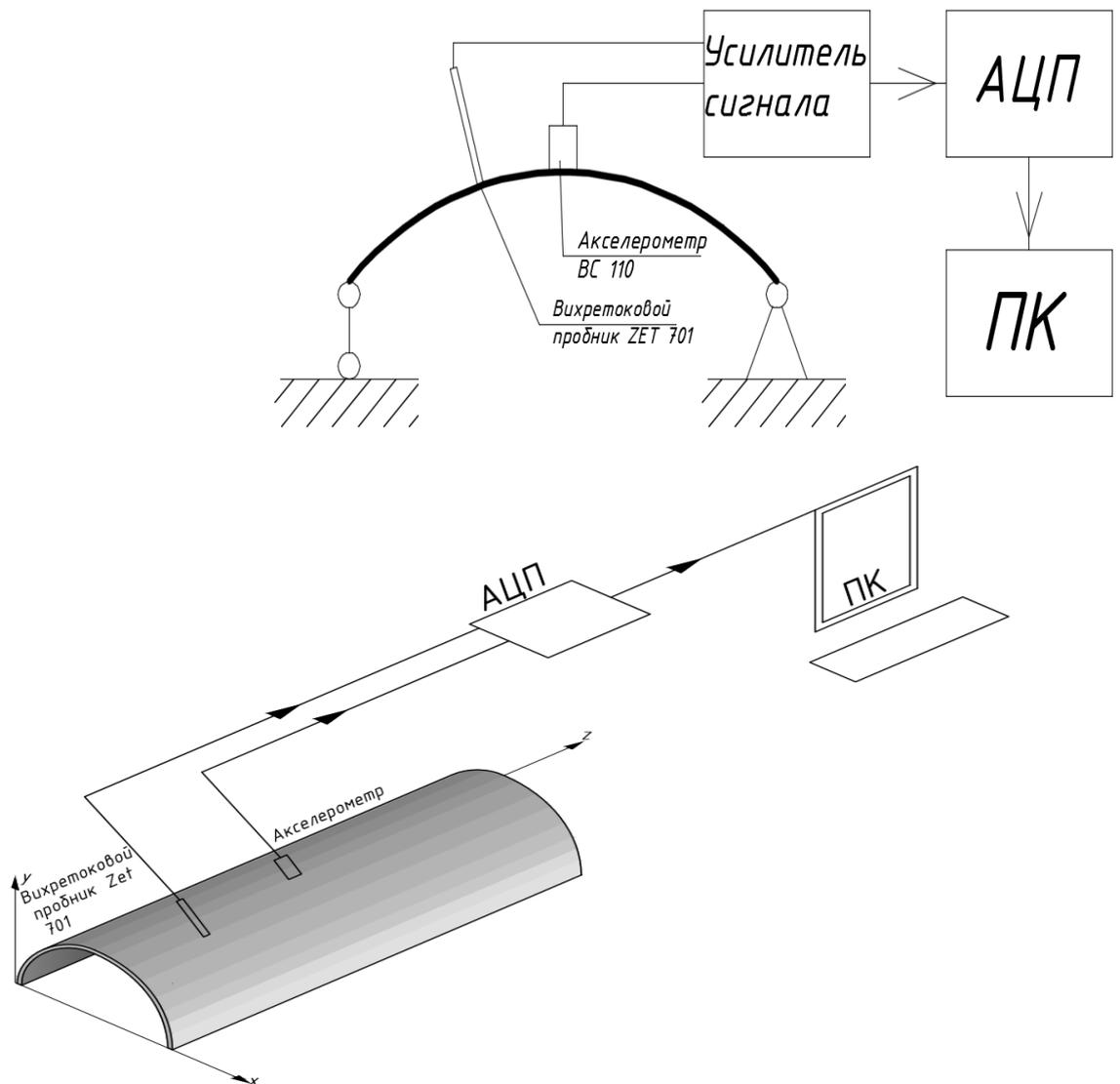


Рисунок 2.7 – Блок-схема установки для проведения исследований

2.3. Методика проведения испытательных исследований

Цель проведения исследований заключается в определении влияния модуля упругости и процента армирования разомкнутых железобетонных образцов оболочки на вынужденные колебания. Для достижения поставленной задачи была создана программа по проведению экспериментальных исследований, содержащая параметры влияния внешних сил на оболочку к реальным воздействиям (таблица 2.5). Исходя из программы, образец устанавливается в испытательном стенде (см. рисунок 2.1) и прикладывается действующая сосредоточенная нагрузка (рисунок 2.8).

Таблица 2.5

Программа по проведению экспериментальных исследований

Вид закрепления образцов		Шарнирная		Жесткая	
		Сосредоточенная масса		Сосредоточенная масса	
Воздействие присоединённой массы					
Процент армирования		2	5	2	5
Класс бетона	B15	+	+	+	+
	B20	+	+	+	+
	B30	+	+	+	+
	B40	+	+	+	+

Испытательные образцы тонкостенных цилиндрических железобетонных разомкнутых оболочек были изготовлены в лаборатории «Строительных материалов» ФГБОУ ВО «КНАГУ» из бетона и контактной сетки в качестве армирования. Габариты и физико-механические свойства изготовленных образцов приведены в таблицах 2.1 – 2.2.

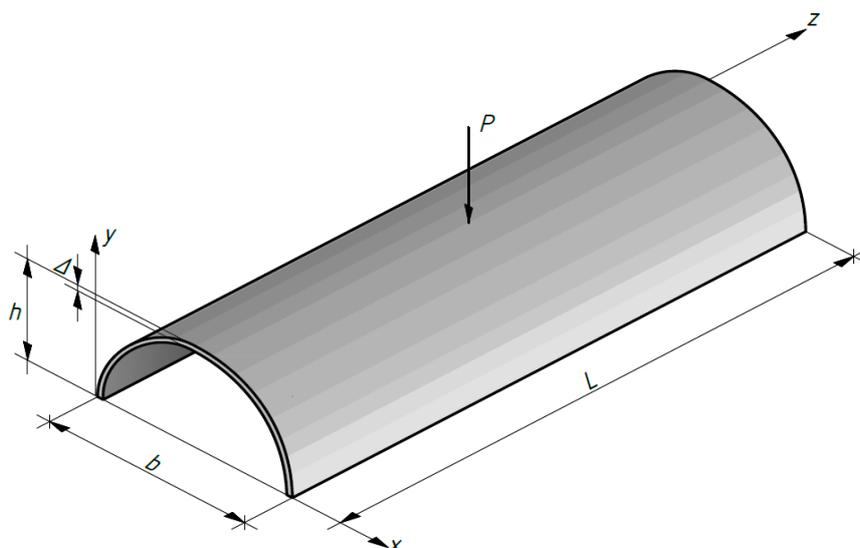


Рисунок 2.8 – Разомкнутая тонкостенная оболочка
под сосредоточенной нагрузкой

Прежде чем произвести экспериментальные исследования над железобетонными тонкостенными разомкнутыми оболочками, теоретическим путём были получены: 1) осевая деформация; 2) окружная деформация; 3) перемещения.

Анализируя графики, изображенные на рисунках 2.9 – 2.11, можно увидеть, что класс бетона влияет на вычисленные показатели перемещений, а именно в каждом графике с каждым классом уменьшаются величины от 5 до 12 % осевой и окружной деформаций тонкостенных разомкнутых цилиндрических оболочек, а эти показатели являются фактором несущей способности исследуемой разомкнутой оболочки. Для подтверждения теоретических данных требуется провести экспериментальные исследования.

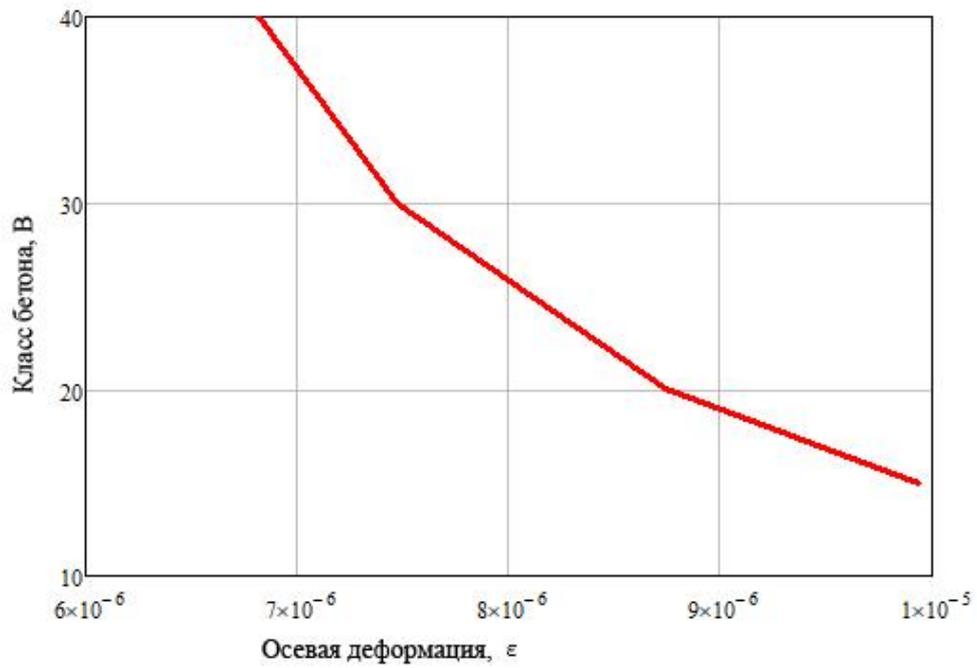


Рисунок 2.9 – График осевой деформации от класса бетона

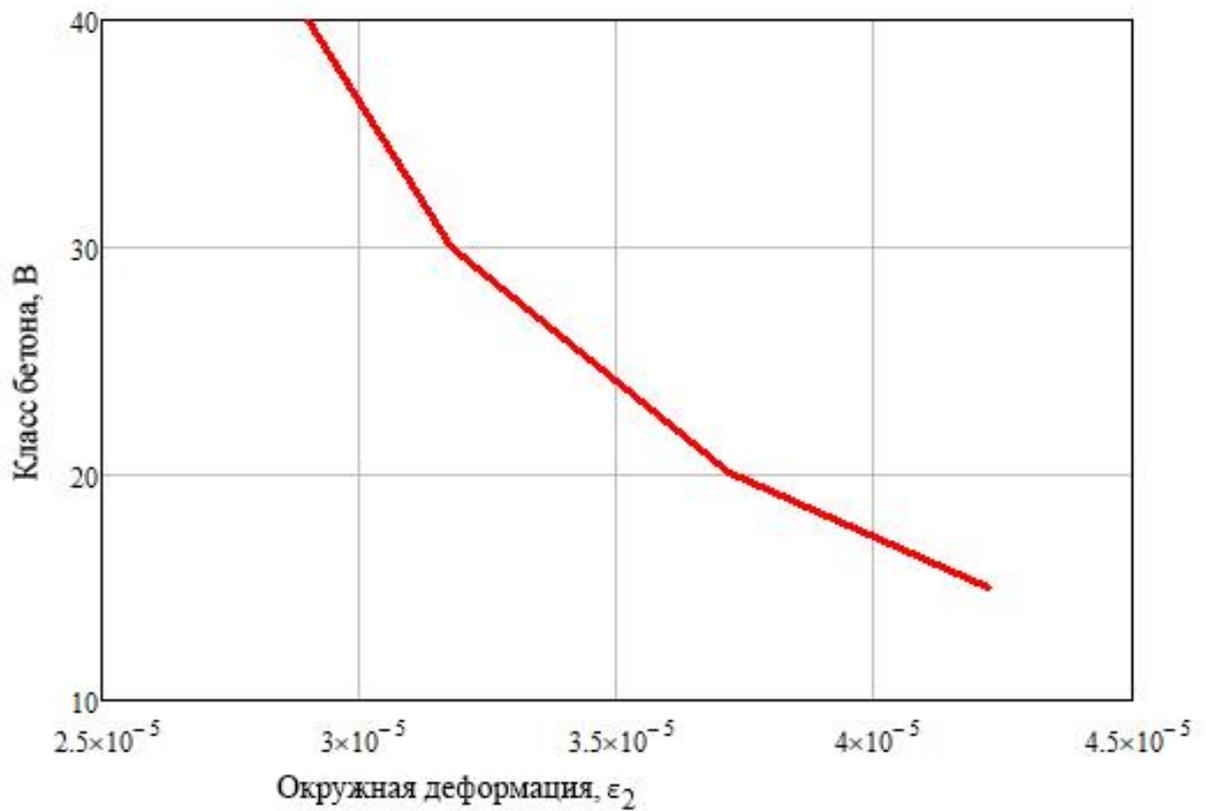


Рисунок 2.10 – График окружной деформации от класса бетона

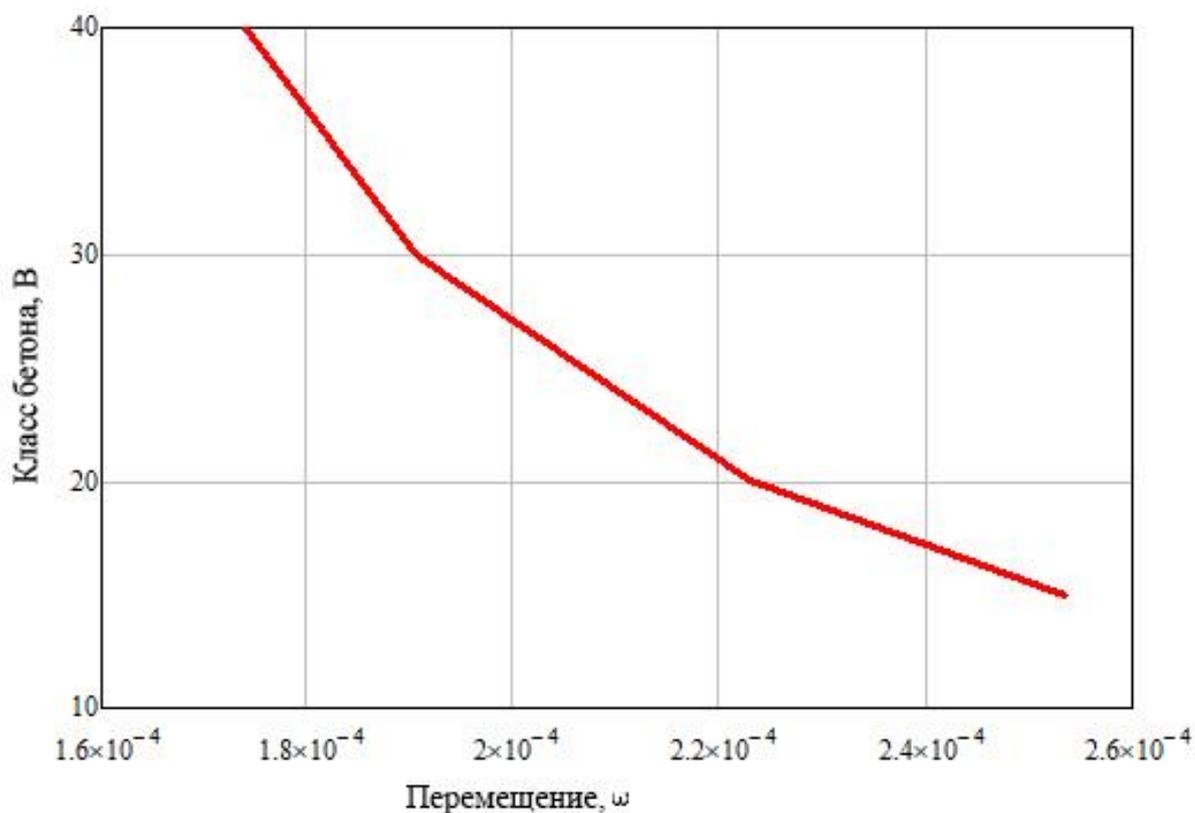


Рисунок 2.11 – График перемещения в зависимости от класса бетона

Получение испытательных результатов на вынужденные колебания оболочек путём взаимодействия испытательного молотка (см. рисунок 2.6) с оболочкой (стук) дает нам рабочую схему, которая часто встречается в эксплуатируемых зданиях. Сигнал – информация о колебании оболочки – принимается датчиками типа ВС110, который также выполняет роль сосредоточенной массы. В результате исследования колебания тонкостенных цилиндрических оболочек были получены экспериментальные результаты проводимых исследований над железобетонными оболочками с разными классами бетона и процентом армирования (рисунок 2.12). Важно отметить, что для получения достоверного результата было проведено по несколько испытаний над образцами.

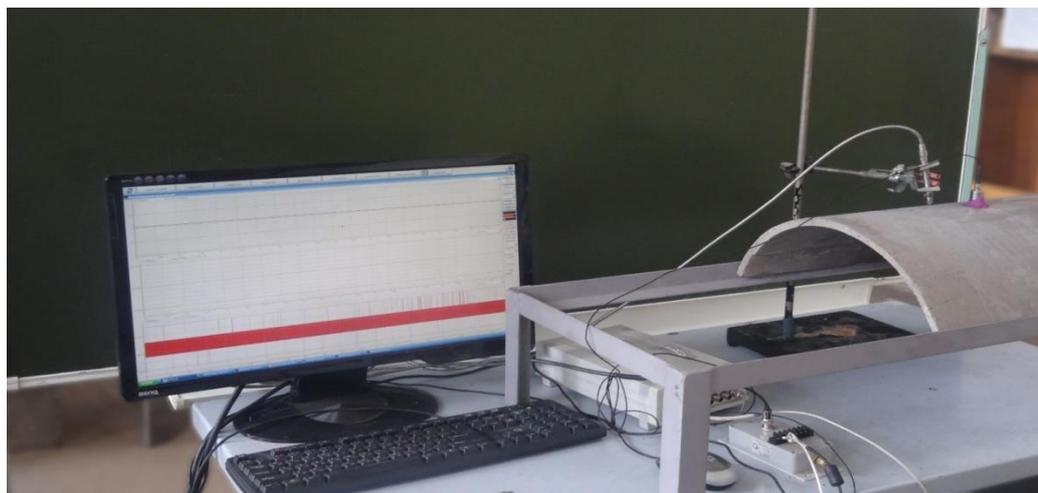


Рисунок 2.12 – Фотография проведения эксперимента с железобетонными оболочками

С использованием ПО «ZetLAB» был проанализирован график спектра колебаний тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек, выданный персональным компьютером (далее ПК).

2.5. Полученные результаты

С помощью разработанной методики проведения экспериментальных исследований над образцами разработаны и зарегистрированы в Роспатенте Российской Федерации ПО. Данные ПО позволяют анализировать полученные экспериментальные данные, а также численный результат колебаний тонкостенных железобетонных разомкнутых оболочек.

Итогом проведения экспериментальных исследований является спектр частотных колебаний образцов (см. рисунок 2.9). Полученные данные способствуют определению характера несущей способности динамических воздействий на железобетонную разомкнутую оболочку. Исследовано восемь образцов с разными модулями упругости и процентом армирования, по каждому из которых проведено по несколько нагружений. Итог приведен в таблице 2.6. В данной таблице, помимо экспериментальных результатов, приведены аналитические результаты исследования, а также отклонения между ними.

На рисунках 2.13 – 2.14 приведены диаграммы и экспериментальные результаты частотных спектров реальных колебаний тонкостенной разомкнутой железобетонной оболочки под воздействием сосредоточенной нагрузки.

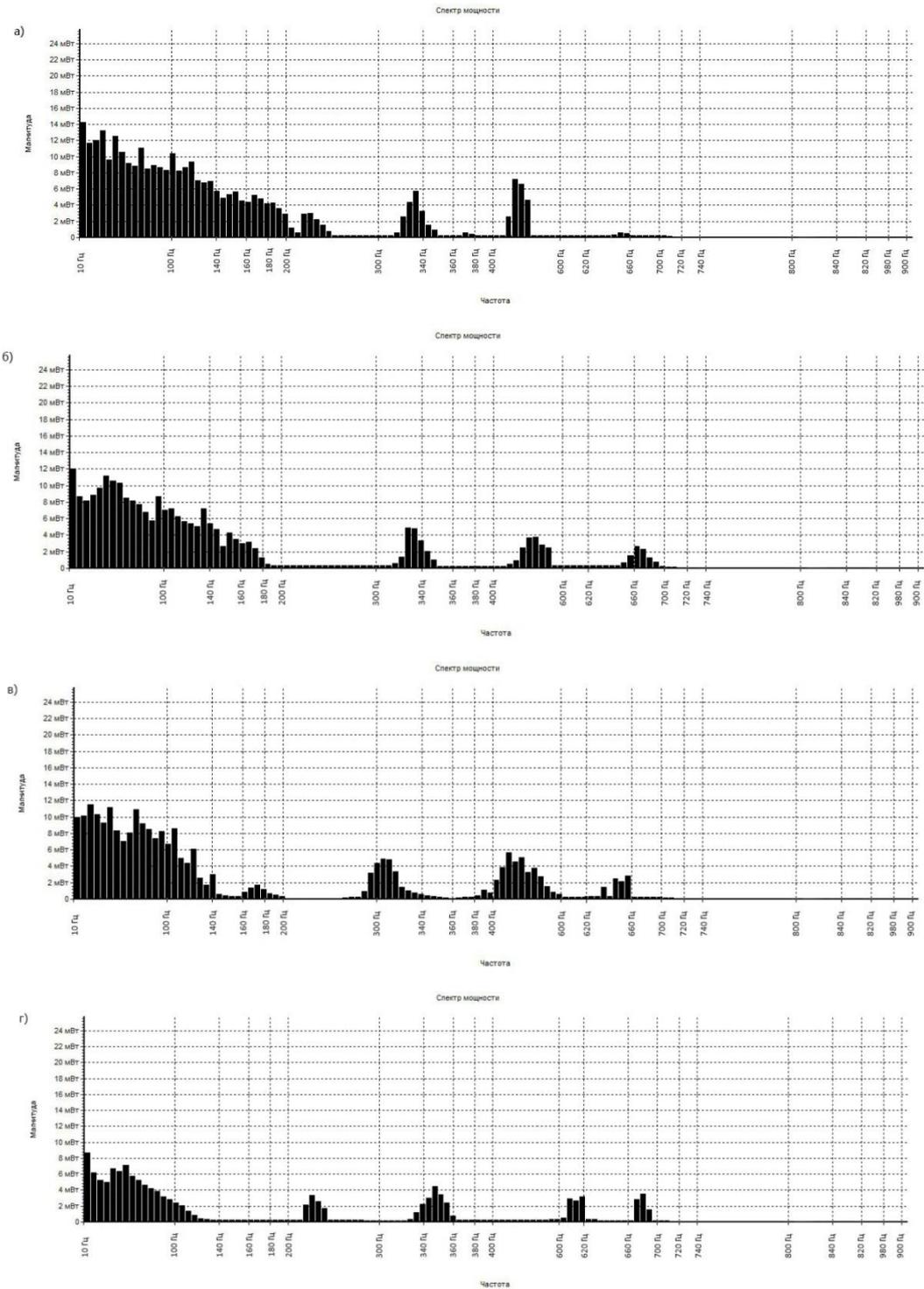


Рисунок 2.13 – Экспериментальные результаты частотных спектров вынужденных колебаний тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек при 2 % армирования: а – В15; б – В20; в – В30; г – В40

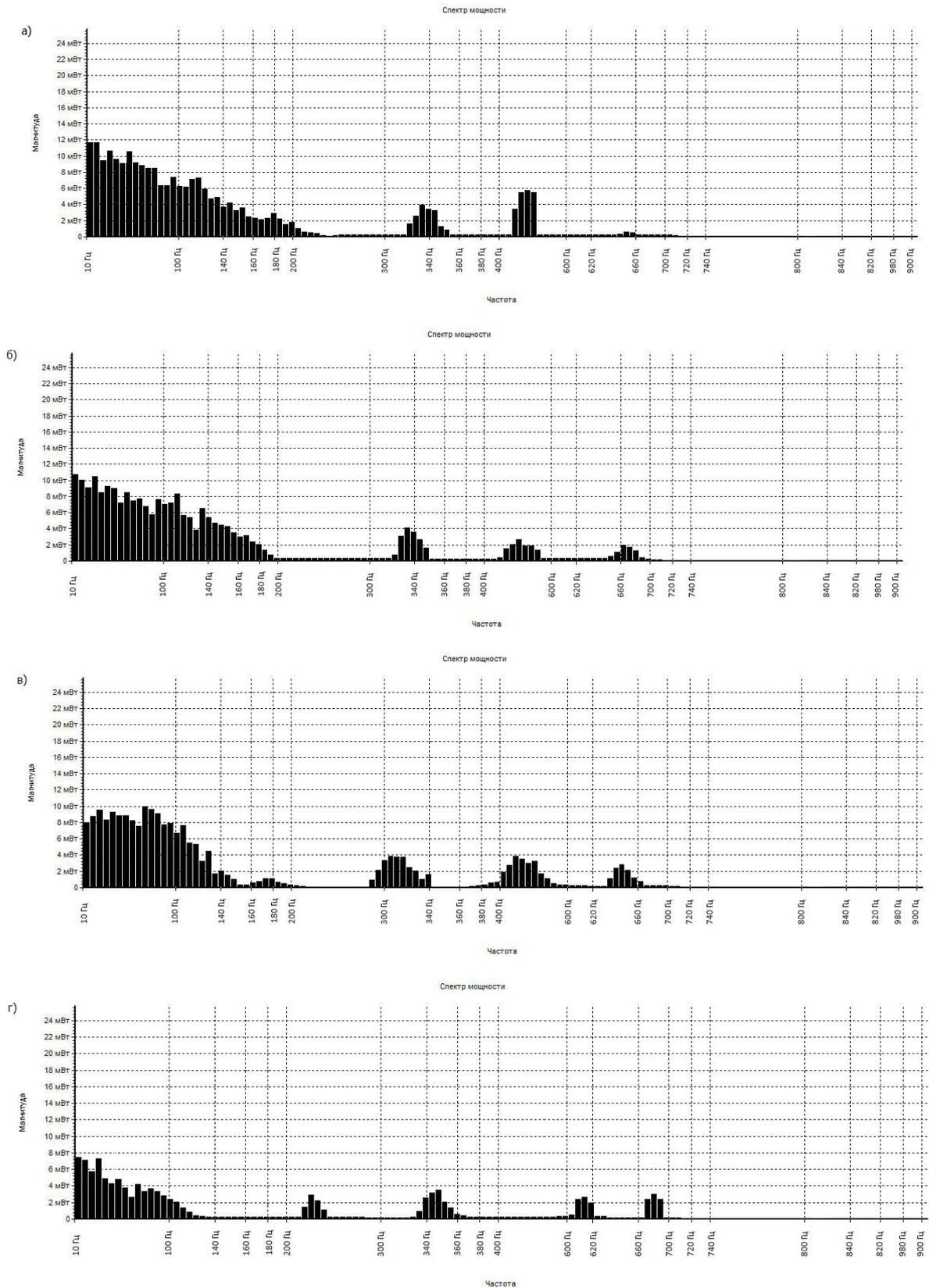


Рисунок 2.14 – Диаграммы частотных спектров вынужденных колебаний тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек при 5 % армирования: а – В15; б – В20; в – В30; г – В40

Из полученных результатов анализируются большие магнитуды в начальных частотах от 10 до 100 Гц. Из диаграмм видно, что с ростом класса бетона образцов уменьшается магнитуда с 14,4 до 8,8 мВт. В средних частотах до 700 Гц периодически появляются магнитуды разной мощности. Для исследования эффективности процента армирования были испытаны образцы при 5 % армирования (см. рисунок 2.14).

Из исследования 5%-ных образцов на вынужденное колебание процесс ещё усугубляется. При сравнении исследуемых образцов в начальных частотах от 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 замечаются в первую очередь уменьшение показателя частот от 3...5 % и сокращение диапазона вынужденных колебаний в каждом образце.

Выводы по второй главе:

1. Разработана программа проведения экспериментальных исследований для получения зависимостей влияния класса бетона и процента армирования на вынужденные колебания тонкостенной цилиндрической разомкнутой оболочки.
2. Создана универсальная экспериментальная установка на базе ПО «ZETLab», позволяющая проводить экспериментальные исследования в зависимости от программы исследования и получать численные характеристики частоты вынужденных колебаний.
3. Проведены испытания над железобетонными оболочками и получены экспериментальные результаты вынужденных колебаний оболочек в зависимости от класса бетона и процента армирования оболочки.

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЁТА КОЛЕБАНИЙ ТОНКОСТЕННЫХ РАЗОМКНУТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

3.1. Определение частоты свободных колебаний тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек

Оболочные формы конструкции на сегодняшний день используются в строительстве по разному функциональному назначению, но чаще всего в качестве покрытия здания и сооружения. Преимущество в использовании оболочки в покрытии зданий и сооружений в том, что конструкция, т.е. оболочка, из-за формы может покрыть помещения большой площади без дополнительных опор, а их минимальная толщина дает конструкции преимущества с точки зрения материалоемкости.

Во время эксплуатации здания и сооружения подвергаются разным статическим и динамическим воздействиям, также из-за технических требований в виде вентиляции, освещения, водоотведения и др. Отверстия, которые влияют на НДС оболочки, имеют три вида: 1) мембранные напряжения, которые образуются в средней поверхности конструкции; 2) касательные и нормальные напряжения, отвечающие за изменения вдоль толщины оболочки по линейному закону; 3) поперечные касательные напряжения, в теории пологих оболочек учитываются только эти напряженные состояния (рисунок 3.1).

Как отмечается выше, физико-механические свойства влияют на значения прогибов конструкции. Следовательно, соотношение связывающих усилий и момента с деформациями при процессе колебания лежит в пределах упругого состояния, т.е. в этом случае выполняется закон Гука, при котором нормальные значения N_1, N_2 и касательное напряжение T связаны с уравнениями деформации в средней зоне поверхности оболочки следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= \frac{Eh}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2), \\ N_2 &= \frac{Eh}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1), \\ T &= Ghy = \frac{Eh}{2(1+\mu)} \gamma, \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

где E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; G – модуль сдвига.

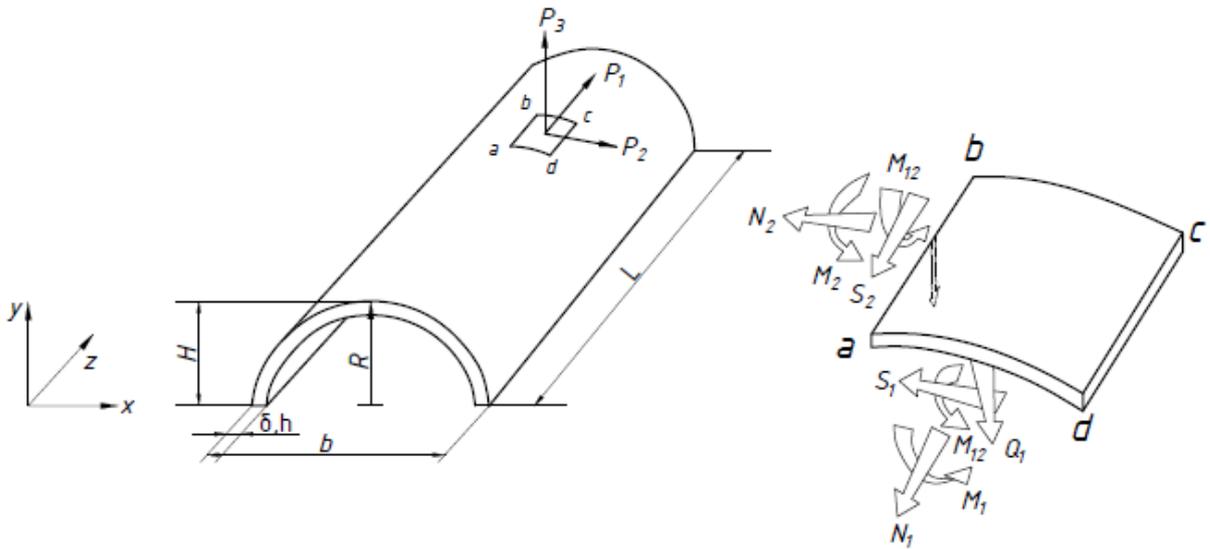


Рисунок 3.1 – Разомкнутая оболочка и равновесие элемента тонкостенной цилиндрической оболочки

Из переведённого ниже уравнения зависимостей деформации и напряжений также нужно записать связь между компонентами усилий, которые воздействуют на средней зоне поверхности оболочки и перемещений:

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= \frac{Eh}{1-\mu^2} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{w}{R} \right) \right], \\ N_2 &= \frac{Eh}{1-\mu^2} \left[\left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{w}{R} + \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right], \\ T &= \frac{Eh}{2(1+\mu)} \left[\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

Тогда погонные изгибающие моменты M_1, M_2 и крутящий момент M_0 равны

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \\ M_2 &= -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right), \\ M_0 &= -D(1 - \mu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

Для определения величин изгибов и прогибов после воздействия нагрузок, которые вызывают резонанс во времени, действует закон синуса, приложенный в точках x_1, y_1 , рассмотренный в следующем параграфе о свободных и вынужденных колебаниях разомкнутой оболочки.

Как отмечено в работах [13, 22], во время большинства внутренних процессов оболочек, изменяющихся с истечением времени, разрешается не учитывать процессы движения упругих волн, из-за чего при отсутствии касательных (инерционных) сил, а также игнорировании пересекающихся усилий на основе описания моментов получим математическую модель направлений перпендикуляра для срединной поверхности конструкции (оболочки)

$$\frac{\partial^2 M_1}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_2}{\partial y^2} + N_1 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_2 \left[\frac{1}{R} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] + 2T \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} - \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \quad (3.4)$$

где N_1, N_2 – внутренние нормальные усилия; T – касательное напряжение; M_1, M_2 – изгибающие моменты; M_0 – крутящий момент; ρ – плотность материала; h – толщина конструкции.

При этом условии положения всех уравнений в направлении осей x и y выражаются точно так же, в касательных напряжениях добавляются уравнения усилий в равноудалённой от плоскости оболочек $\Phi(x, y, t)$. Данными соотношениями являются

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= \sigma_1 h = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} h, \\ N_2 &= \sigma_2 h = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} h, \\ T &= \tau h = - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} h. \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Далее для определения величин изгибающих колебаний сделаем замену в уравнениях (3.1), (3.3) – (3.5), объединив два уравнения, которые помогут описать небольшие изгибные колебания оболочечных конструкций:

$$\left. \begin{aligned} \frac{D}{h} \nabla^4 w &= \frac{1}{R} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \\ \frac{1}{E} \nabla^4 \Phi &= -\frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}. \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

Уравнение (3.6) считается одним из основных при решении задач изгибных колебаний оболочек, а также используется при расчёте частотного характера колебаний замкнутых и разомкнутых тонкостенных цилиндрических оболочек (ТЦО).

3.2. Модель расчета собственных колебаний с учетом принципа Д’Аламбера

Данный принцип позволяет применять при расчёте собственных колебаний тонкостенной цилиндрической разомкнутой оболочки более упрощённые методы статики, что объясняется широким применением в инженерной практике. На этом принципе основывается метод кинестатики. Особенно он удобен в применении с целью установления реакций связей в ситуации, когда известен закон происходящего движения или он получен при решении соответствующих уравнений. В соответствии этому принципу нужно к внешней нагрузке добавить составляющие компоненты распределённых сил инерции отрицательными значениями

$$-\rho h \frac{\partial u}{\partial t^2}, \quad \rho h \frac{\partial v}{\partial t^2}, \quad \rho h \frac{\partial w}{\partial t^2}. \quad (3.7)$$

Исходя из вышесказанного (см. рисунок 3.1), дифференциальные уравнения динамики оболочки в перемещениях можно записать в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned}
& \frac{\partial^2 u}{dx^2} + \frac{1-\mu}{2R} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{1+\mu}{2R} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta \partial x} + \frac{\mu}{R} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{1-\mu^2}{E\delta} P_1 - \rho \frac{1-\mu^2}{E} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0, \\
& \frac{1+\mu}{2R} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial \theta} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} - \frac{\delta^2}{12R^2} \left(\frac{1}{R^2} \frac{\partial^3 w}{\partial \theta^3} + \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial \theta} - \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \right. \\
& \quad \left. - \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} \right) + \frac{1-\mu^2}{E\delta} P_2 - \rho \frac{1-\mu^2}{E} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0, \\
& \mu \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{1}{R} w + \frac{\delta^2}{12R^2} \left(R^3 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2R \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^2 \partial x^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial^3 v}{\partial \theta^3} - R \frac{\partial^3 v}{\partial \theta \partial x^2} \right) - \\
& \quad - \frac{R(1-\mu^2)}{E\delta} P_3 + \rho \frac{R(1+\mu^2)}{E} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0.
\end{aligned} \right\} (3.8)$$

Для решения системы уравнений (3.8) нужно определить величину перемещения в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned}
u &= A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi x}{L}\right) \cos(n\theta) \sin(\omega t), \\
v &= B_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{L}\right) \sin(n\theta) \sin(\omega t), \\
w &= C_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{L}\right) \sin(n\theta) \sin(\omega t),
\end{aligned} \right\} (3.9)$$

где m – число полуволн в продольном направлении; n – число полуволн в поперечном направлении; θ – угловая координата в направлении окружности; L – длина тонкостенной оболочки; A_{mn}, B_{mn}, C_{mn} – амплитуда колебаний вдоль направлений; ω – круговая частота колебаний; u, v, w – перемещения средней зоны.

Уравнения (3.9) позволяют учитывать в расчёте граничные условия как свободно опертой по двум краям оболочки при учёте $x = \mathbf{const}$, т.е. $x = \mathbf{0}$ и $x = L$. Важно отметить, что свободно опертая часть оболочки имеет опирание $w = \mathbf{0}$, но опора не может принимать изгибающие моменты по направлению x , т.е. M_1 . Однако при таком опирании опора не может воспринимать изгибающие моменты. Исходя из этого, задаем $M_1 = \mathbf{0}$. Такая опора не допускает также тангенциальные перемещения, $v = \mathbf{0}$.

После подстановки граничных условий в систему дифференциальных уравнений (3.9) и несложных математических преобразований получится система уравнений амплитуд

$$\left. \begin{aligned} A \left(\frac{n^2}{2} + \lambda^2 - \frac{n^2\mu}{2} - \Omega \right) + B \left(-\frac{n\lambda}{2} - \frac{n\lambda\mu}{2} \right) - C\lambda\mu &= 0, \\ A \left(-\frac{n\lambda}{2} - \frac{n\lambda\mu}{2} \right) + B \left(n^2 + k^2n^2 + \frac{\lambda^2}{2} + \frac{k^2\lambda^2}{2} - \frac{\lambda^2\mu}{2} - \right. \\ \left. - \frac{1}{2}k^2\lambda^2\mu - \Omega \right) + C(n + k^2n^3 + k^2n\lambda^2) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

В уравнении (3.10) $\lambda = \frac{m\pi x}{L}$ – параметр продольной колебательной волны, который обозначает количество продольных полуволин ($m = 1, 2, 3, \dots, n$); $k^2 =$

$$= \frac{\delta^2}{12R^2}.$$

В этом случае, когда определитель равен нулю, это даёт уравнение шестой степени относительной круговой частоты колебания ω :

$$\left. \begin{aligned} -\Omega^3 + \Omega^2 \left(1 + \frac{1-\mu}{2}(n^2 + \lambda^2) + k^2(n^2 + n^4 + \lambda^2 \left(\frac{1-\mu}{2} + 2n^2 \right) + \lambda^4 + \right. \\ \left. + \Omega \left(\frac{1-\mu}{2}(n^2 + n^4) + \lambda^2(n^2(1-\mu) + \frac{\mu-3}{2}\mu^2) + \lambda^4 \frac{1-\mu}{2} + k^2(-n^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + n^4 \frac{\mu+3}{2} + n^6 \frac{\mu-3}{2} + \lambda^2 \left(\frac{\mu-1}{2} + n^2 \frac{3+2\mu-\mu^2}{4} + n^4 \frac{\mu-9}{2} \right) + \lambda^4 \left(\frac{\mu-1}{2} \right. \right. \\ \left. \left. + n^2 \frac{3\mu-9}{2} \right) \right) + k^4 \left(\lambda^4 n^2 \frac{\mu-1}{2} + \lambda^4 n^2(1-\mu) + \lambda^6 \frac{\mu-1}{2} \right) + \left(\lambda^4 \right. \\ \left. \frac{\mu^3 - \mu^2 - \mu + 1}{2} k^2 \left(n^4 \frac{1-\mu}{2} + n^6(\mu-1) + n^8 \frac{\mu-1}{2} + \lambda^2 \left(n^2 \frac{5-2\mu-3\mu^2}{4} \right. \right. \right. \\ \left. \left. + n^4(-3+2\mu+\mu^2) + n^6(2-2\mu) \right) + \lambda^4 \left(\frac{\mu^3 - \mu^2 + \mu + 1}{2} + n^2(-2+\mu+ \right. \right. \\ \left. \left. + \mu^2) + n^4(3-3\mu) \right) \right) + k^4 \left(\lambda^2 n^6 \frac{1-2\mu-\mu^2}{4} + \lambda^4 n^4 \frac{2-3\mu-\mu^2}{2} + \lambda^6 n^2 \right. \\ \left. \left. \frac{5-6\mu-\mu^2}{4} + \lambda^8 \frac{1-\mu}{2} \right) \right) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

Здесь $\Omega = \frac{1-\mu^2}{E} R^2 \rho \omega^2$, члены в уравнении (3.11) с множителями, а именно $\lambda^4, \lambda^6, \lambda^8$ и k^4 , не влияют на окончательный результат, поэтому ими можно пренебречь, тогда уравнение (3.11) примет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned}
& -\Omega^3 + \Omega^2 \left(1 + \frac{3-\mu}{2} (n^2 + \lambda^2) + k^2 (n^2 + n^4 + \lambda^2 \frac{1-\mu}{2} + 2n^2) \right) + \\
& + \Omega \left(\frac{1-\mu}{2} (n^2 + n^4) + \lambda^2 \left(n^2 (\mu - 1) + \frac{\mu - 3}{2} + \mu^2 \right) + k^2 (-n^2 + n^4 \right. \\
& \left. \frac{\mu + 3}{2} + n^6 \frac{\mu - 3}{2} + \lambda^2 \left(\frac{1-\mu}{2} + n^2 \frac{3 + 2\mu - \mu^2}{4} + n^4 \frac{3 - 9\mu}{2} \right) \right) + \\
& + \left(k^2 \left(n^4 \frac{1-\mu}{2} + n^6 (\mu - 1) + n^8 \frac{1-\mu}{2} + \lambda^2 \left(n^2 \frac{5 - 2\mu - 3\mu^2}{4} + \right. \right. \right. \\
& \left. \left. \left. + n^4 (-3 + 2\mu + \mu^2) + n^6 (2 - 2\mu) \right) \right) \right) = 0.
\end{aligned} \right\} (3.12)$$

Рассмотрим тонкостенную железобетонную разомкнутую оболочку для определения спектра собственных частот колебания оболочки для каждой поперечной и продольной величины полуволн m, n . Исходные данные железобетонной разомкнутой оболочки с параметрами $R/L = 0,25$: классы бетона В15, В20, В30, В40, $\mu = 1/6$ (коэффициент Пуассона для ж/б конструкций), $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$.

3.3. Метод Бубнова-Галеркина для решения динамических задач тонкостенных разомкнутых цилиндрических оболочек

Для решения общих уравнений колебаний ТЦО является не простой задачей динамики оболочки, требующей детального анализа всей системы уравнения (3.6). Чтобы решить задачу и проанализировать, разработано много способов и методов, на основе которых созданы ПО в виде ЛИРА САПР, SCad, ANSYS и др. Но стоит отметить самый простой метод определения системы колебаний ТЦО – метод Бубнова-Галеркина. Из работы [41] можно сказать, что данный метод приводит исходную систему уравнений к определению другой группы дифференциальных уравнений. После чего переходим к определению главного периода процесса колебаний, который имеет простой вид с несколькими составляющими динамической модели колебаний тонкостенных цилиндрических разомкнутых оболочек.

Утверждено, что время для решения задачи растёт вместе со степенью свободы и формы решения исследуемого вопроса. Задачи для расчёта ТЦО с боль-

шими габаритами труднее посчитать из-за создания математической модели, также стоит учесть ошибки, которые могут возникнуть при расчёте. Применение различных методов и способов расчёта не может устранить ошибки во время расчёта, поэтому нужно использовать простые методы с минимальными габаритами математической модели.

Каждый из исследователей при решении задачи колебаний разомкнутой оболочки первым делом находит переменный изменяемый прогиб при $w(x, y, t)$. Изменения переменного прогиба – это важный момент, так как представляет основную точку, на которой базируется итоговый расчёт, и влияет на результат. Чтобы произвести переход от одного уравнения к частным производным, описывающим движение оболочки, к динамическим уравнениям, описывающим процесс системы колебания с конечным числом степени свободы, воспользуемся методом Бубнова-Галеркина.

В данной работе будет исследоваться подход к построению динамической конечной модели Бубнова-Галеркина, предложенный ранее в работах [30-35]. Согласно этим работам, данный подход учитывает присоединённую массу в линейной постановке, приводятся зависимости, связанные с изгибными формами процесса колебания оболочки и составляющие взаимодействие низкочастотных изгибных колебаний с высокоточными радиальными колебаниями. Исходя из данного подхода, прогиб ТЦО, несущей сосредоточенную присоединённую массу, можно выразить следующим уравнением:

$$w(x, y, t) = [\Phi_1(t)\sin\beta y + \Phi_{2_2}(t)\cos\beta y + \Phi_3(t)]\sin\alpha x, \quad (3.13)$$

где $\Phi_1(t) = \frac{E\alpha^2}{R(\alpha^2 + \beta^2)^2} f_1(t)$; $\Phi_2(t) = \frac{E\alpha^2}{R(\alpha^2 + \beta^2)^2} f_2(t)$; $\Phi_3(t) = \frac{E\alpha^2}{R(\alpha^2 + \beta^2)^2} f_3$; $\alpha = \frac{m\pi}{L}$, $\beta = \frac{n}{R}$ – параметры волнообразования, m, n – количество полуволен в продольном и поперечном направлениях; f_3 – радиальные колебания.

Функции напряжений в средней поверхности конструкции приводят к динамическим уравнениям, и для этого нужно добавить граничные условия, с по-

мощью которых можно выяснить взаимодействие изгибных и радиальных колебаний

$$\left. \begin{aligned} \ddot{a}_1 + a_1 + \frac{4M}{M_0} [\ddot{a}_1 \sin^2 \beta y_0 + \ddot{a}_2 \cos \beta y_0 \sin \beta y_0 + \ddot{a}_3 \sin \beta y_0] \sin^2 \alpha x_0 &= 0, \\ \ddot{a}_2 + a_2 + \frac{4M}{M_0} [\ddot{a}_1 \sin \beta y_0 \cos \beta y_0 + \ddot{a}_2 \cos^2 \beta y_0 + \ddot{a}_3 \cos \beta y_0] \sin^2 \alpha x_0 &= 0, \\ \ddot{a}_3 + (p/\omega_n)^2 a_3 + \frac{2M}{M_0} [\ddot{a}_1 \sin \beta y_0 + \ddot{a}_2 \cos \beta y_0 + \ddot{a}_3] \sin^2 \alpha x_0 &= 0. \end{aligned} \right\} (3.14)$$

В уравнении (3.14) $p^2 = 1 + \varepsilon \theta^4 / 12(1 - \mu^2)$ – квадрат безразмерных радиальных колебаний оболочки (без массы); $\varepsilon = n^2 (h/R)^2$ и $\theta = \pi R/nL$ – параметры волнообразования, зависящие от габаритных параметров оболочки (радиус, длина, толщина стенки), a_1, a_2, a_3 – безразмерные амплитуды, ω_n – собственная безразмерная круговая частота колебания.

Изменение инерционных сил в оболочке, которые возникли за счёт воздействия сосредоточенной присоединённой массы, тем самым создает изгибные и радиальные колебания. Здесь важно обратить внимание на вопрос исследования радиальных колебаний, которые возникли относительно недавно, первыми из исследователей являются В.Г. Карнаухов, С.В. Козлов [48].

3.4. Модифицированный подход в решении колебания тонкостенных разомкнутых цилиндрических оболочек при воздействии малой присоединённой массы

Исходя из того, что с помощью ранее рассмотренных уравнений невозможно полностью определить перемещение тонкостенной цилиндрической разомкнутой железобетонной оболочки под действием динамических нагрузок, новая математическая модель описывает те перемещения, которые необходимы для определения сдвиговых напряжений. Она описывается с помощью теории Райснера в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} D\Delta\Delta\Phi + \rho h\ddot{\Phi} - \frac{\rho h^3}{12} \left(1 + \frac{2}{\Gamma(1-\mu)}\right) \Delta\ddot{\Phi} + \frac{\rho^2 h^3}{12G\Gamma} (\ddot{\Phi}) \\ + \frac{M}{h} \delta(x - x_0, y - y_0) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0, \\ \Delta F - \frac{12\Gamma}{h^2} F - \frac{\rho}{G} \ddot{F} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

Для решения уравнения (3.15) необходимо определить поперечный прогиб w , вектор углов поворота ψ , а также вектор поперечной силы N и тензор моментов M . Для определения искомым воспользуемся нижеприведенными уравнениями

$$\left. \begin{aligned} w = -\Phi + \frac{h^2}{6\Gamma(1-\mu)} \Delta\Phi - \frac{\rho h^2}{12G\Gamma} \ddot{\Phi}, \quad \psi = \nabla\Phi + \nabla F \cdot n \\ N = D\nabla\Delta\Phi - \frac{\rho h^3}{12} \nabla\ddot{\Phi} + Gh\Gamma \nabla F \cdot n, \\ M = D \left[(1-\mu)\nabla\nabla\Phi + \mu\Delta\Phi a + \frac{1-\mu}{2} (\nabla\nabla F \times n - n \times \nabla\nabla F) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

В уравнении (3.16) D – цилиндрическая жёсткость; $Gh\Gamma$ – жесткость на сдвиг; ρ – плотность оболочки; h – толщина стенки оболочки, определяемые следующими уравнениями:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}, \quad G = \frac{E}{2(1-\mu)}, \quad (3.17)$$

где E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона.

С помощью данного уравнения найдем величину модуля упругости в зависимости от толщины каждого слоя и обозначим ее $E_{\text{ср}}$. Для составления усредненного модуля упругости $E_{\text{ср}}$ отобразим фрагмент тонкостенной оболочки (рисунок 3.2).

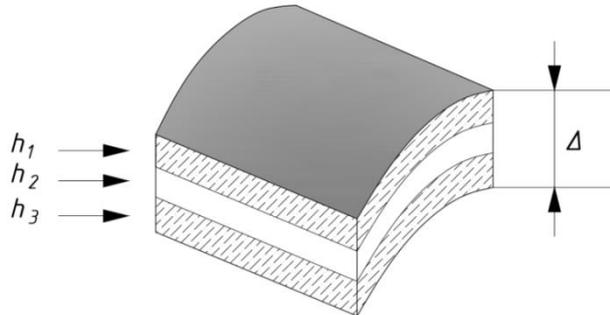


Рисунок 3.2 – Фрагмент разомкнутой оболочки со слоями (h_1, h_3 – толщины бетонных слоев; h_2 – толщина армирования)

$$E_{\text{ср}} = \frac{1 - \nu^2}{\Delta} \sum_{k=1}^3 \frac{E_k h_k}{1 - \nu_k^2}, \quad (3.18)$$

где ν – модуль Пуассона; Δ – общая толщина; h_k – сумма всех слоев; E_k – сумма модулей упругости.

Исследования проводились вариационным методом, были получены деформационные и колебательные уравнения, а также использовались гипотеза Киргоффа-Лява и закономерности.

Если отсутствует воздействие внешних факторов, то уравнения поперечных колебаний ТЦО примут следующий вид:

$$\nabla^2 \nabla^2 F = \frac{E\delta}{R} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(1 - \frac{h^2}{\beta} \nabla^2 \right) \chi, \quad (3.19)$$

$$D \left(1 - \frac{\Theta \delta^2}{\beta} \nabla^2 \right) \nabla^2 \nabla^2 \chi + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - \rho h \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(1 - \frac{\delta^2}{\beta} \nabla^2 \right) \chi = 0. \quad (3.20)$$

В уравнении (3.20) третье слагаемое представляет собой приходящую нагрузку на поверхность. Третье слагаемое ρh подразумевается суммированием.

$$\rho h = \sum_{k=1}^3 \rho_k \delta_k.$$

Оператор Лапласа $\nabla^2 = \frac{\delta^2}{\partial x^2} + \frac{\delta^2}{\partial s^2}$, а также связь между χ и ω осуществляются по следующей формуле:

$$\omega = \left(1 - \frac{\delta^2}{\beta} \nabla^2 \right) \chi.$$

Величину коэффициента β , которая связана с модулем поперечного сдвига, можно найти в работах [1, 2]. Жесткость оболочки D (сумма всех слоев оболочки) и коэффициент Θ определяются по следующим уравнениям:

$$D = \frac{E\delta^3}{12(1 - \nu^2)} \Theta, \quad \Theta = \frac{\Theta_1 \Theta_3 - \Theta_2^2}{\Theta_1 \Theta}. \quad (3.21)$$

Коэффициент Пуассона для многослойной конструкции определяется по следующему уравнению:

$$\mu = \sum_{i=3}^3 \frac{E_k h_k v_k}{1 - v_k^2} \left(\sum_{i=3}^3 \frac{E_k h_k}{1 - v_k^2} \right)^{-1},$$

а также

$$\Theta_1 = t_3^2 [1 + 2(\gamma_1 + \gamma_2) - 3(\gamma_1 + \gamma_2)^2],$$

$$\Theta_2 = 3t_3 \gamma_3 (\gamma_1 t_1 + \gamma_2 t_2) + 6\gamma_1 \gamma_2 t_3 (t_1 + t_2),$$

$$\Theta_3 = 4(\gamma_1 t_1^2 + \gamma_2 t_2^2 - 3(\gamma_1 + \gamma_2)^2),$$

$$\Theta = t_3^2 + 4\gamma_1 (t_3^2 + 3t_1 t_3 + 2t_1^2).$$

При свободно опёртой цилиндрической оболочке граничные условия примут следующий вид:

$$F = \nabla^2 F = \chi = \nabla^2 \chi = \nabla^2 \nabla^2 \chi = 0 \quad \text{при } x = 0 \text{ и } x = l. \quad (3.22)$$

Систему уравнений (3.19) – (3.20), используемую для введения разрешающей функции χ_1 , можно свести к одному уравнению

$$\chi = \nabla^2 \nabla^2 \chi_1, \quad F = \frac{Eh}{R} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(1 - \frac{\delta^2}{\beta} \nabla^2 \right) \chi_1, \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} D \left(1 - \frac{\theta \delta^2}{\beta} \nabla^2 \right) \nabla^2 \nabla^2 \nabla^2 \nabla^2 \chi_1 + \frac{Eh}{R^2} \frac{\partial^4}{\partial x^4} \left(1 - \frac{\delta^2}{\beta} \nabla^2 \right) \chi_1 = \\ = \rho h \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(1 - \frac{\delta^2}{\beta} \nabla^2 \right) \nabla^2 \nabla^2 \chi_1. \end{aligned} \quad (3.24)$$

Далее граничные условия уравнения (3.22) относительно функции χ_1 приобретут следующий вид:

$$\chi_1 = \nabla^2 \chi_1 = \nabla^2 \nabla^2 \chi_1 = \nabla^2 \nabla^2 \nabla^2 \chi_1 = \nabla^2 \nabla^2 \nabla^2 \nabla^2 \chi_1 = 0 \quad \text{при } x = 0 \text{ и } x = l. \quad (3.25)$$

Решение уравнения (3.24) может измениться в случае изменения опоры на свободно опёртую, определяется по формуле

$$\chi_1 = \chi_0 e^{i\omega t} \sin \frac{m\pi x}{l} \cos \frac{ns}{R}, \quad (3.26)$$

где m – число волн по образующей по продольному направлению ТЦО; n – число волн по поперечному направлению; ω – круговая частота поперечных колебаний; $\chi_0 = \text{const}$.

Подставляя уравнения (3.25) в (3.23), получим уравнения для определения круговой частоты колебания

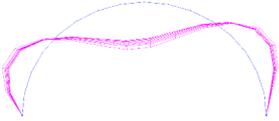
$$\omega^2 = \left[DB \left(1 - \frac{\theta h^2}{\beta} B \right) + \frac{E_{\text{ср}} h}{R^2} \left(\frac{m\pi}{l} \right)^4 \left(1 - \frac{h^2}{\beta} B \right) \right] \cdot \left[\rho h \left(1 - \frac{h^2}{\beta} B \right) \right]^{-1}, \quad (3.27)$$

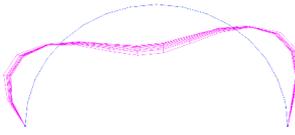
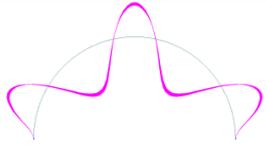
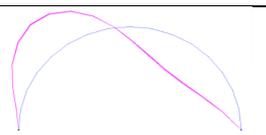
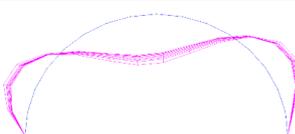
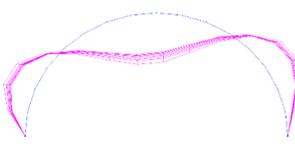
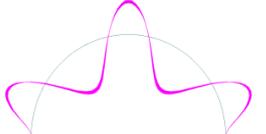
где $B = - \left(\left(\frac{m\pi}{l} \right)^2 + \left(\frac{n}{R} \right)^2 \right)$.

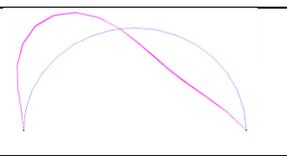
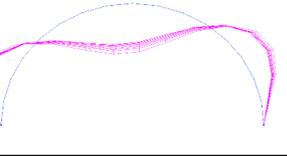
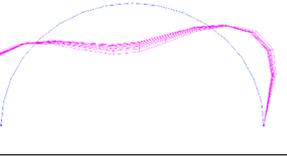
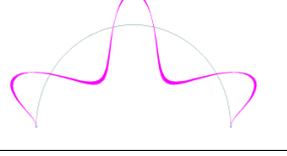
Результаты расчета приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Характеристика колебаний разомкнутых оболочек

Схема колебаний	Кол-во полу-волн n	Метод Бубнова-Галеркина	Полученный метод	Принцип Д'Аламбера	Метод Бубнова-Галеркина	Полученный метод	Принцип Д'Аламбера
1	2	3	4	5	6	7	8
Класс бетона	В40						
Процент армирования	2 %				5 %		
	2	108,71	103,8	115,86	100,25	103,7	107,21
	3	233,32	228,65	254,31	218,6	228,9	238,27
	4	436,94	442,1	470,74	408,35	442,15	435,95
	5	458,17	435,3	472,83	428,2	435,29	442,33

1	2	3	4	5	6	7	8
	6	477,14	455,6	517,38	441,8	451,2	448,58
Класс бетона	B30						
	2	113,5	118,9	121,2	103,85	108,2	110,90
	3	243,88	256,3	268,1	226,78	238,46	249,33
	4	453,43	463,9	483,9	426,22	441,11	454,86
	5	474,58	478,5	490,3	441,35	448,9	455,97
	6	502,8	520,6	552,6	465,09	485,3	511,15
Класс бетона	B20						
	2	118,46	112,8	126,7	108,4	112,3	115,93
	3	248,35	255,6	259,72	230,96	236,3	241,54
	4	469,73	488,2	505,68	441,54	443,5	445,34
	5	491,72	515,5	534,03	448,93	472,9	496,64

1	2	3	4	5	6	7	8
	6	524,83	545,8	566,3	485,46	504,8	523,83
Класс бетона	B15						
	2	123,5	125,92	130,89	113,0	112,3	119,76
	3	265,95	293,12	292,38	247,33	236,3	271,91
	4	494,34	482,75	505,12	464,68	443,5	474,81
	5	519,82	532,07	543,6	483,43	472,8	505,54
	6	554,84	571,8	589,33	513,22	502,4	545,13

Как видно из полученных результатов (рисунки 3.3 – 3.6), влияние класса бетона существенно, с его увеличением уменьшаются показатели ω частот колебаний, а также можно заметить, что с увеличением количества поперечных полуволн n вырастают показатели частот 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 E_{cp} .

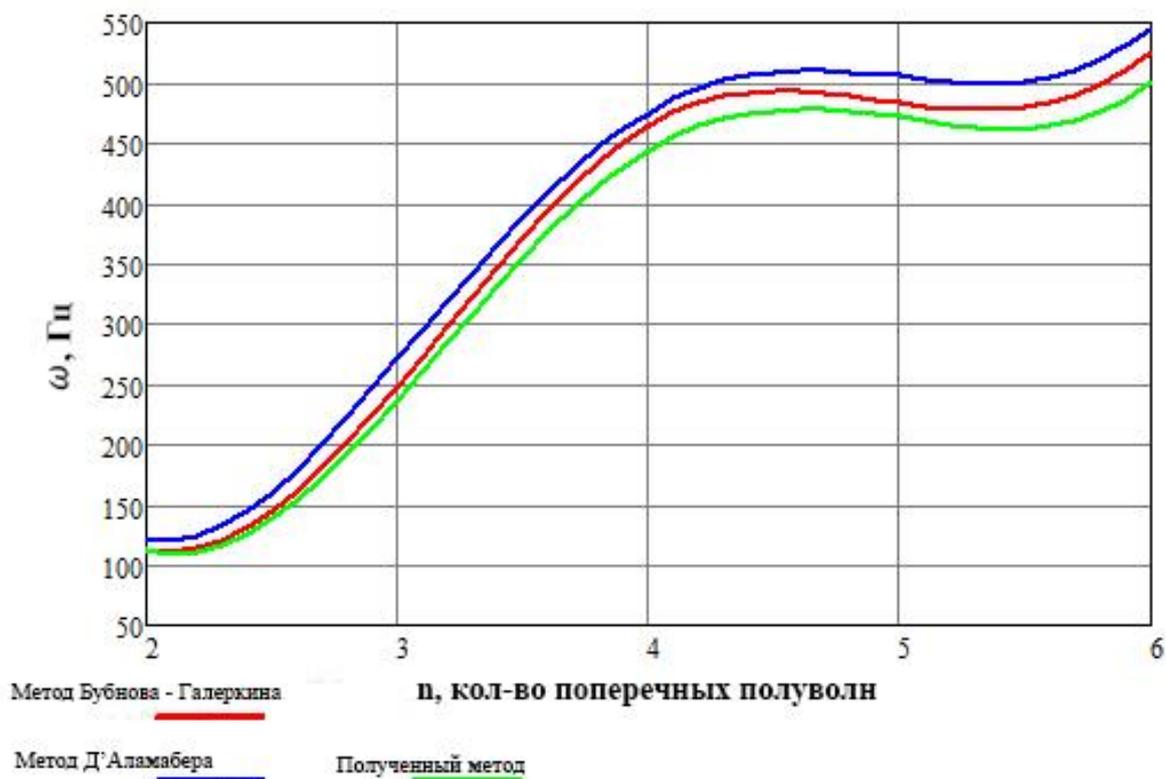


Рисунок 3.3 – Диаграмма собственных частот оболочки из бетона В15 при 5 % от числа полуволен в поперечном направлении

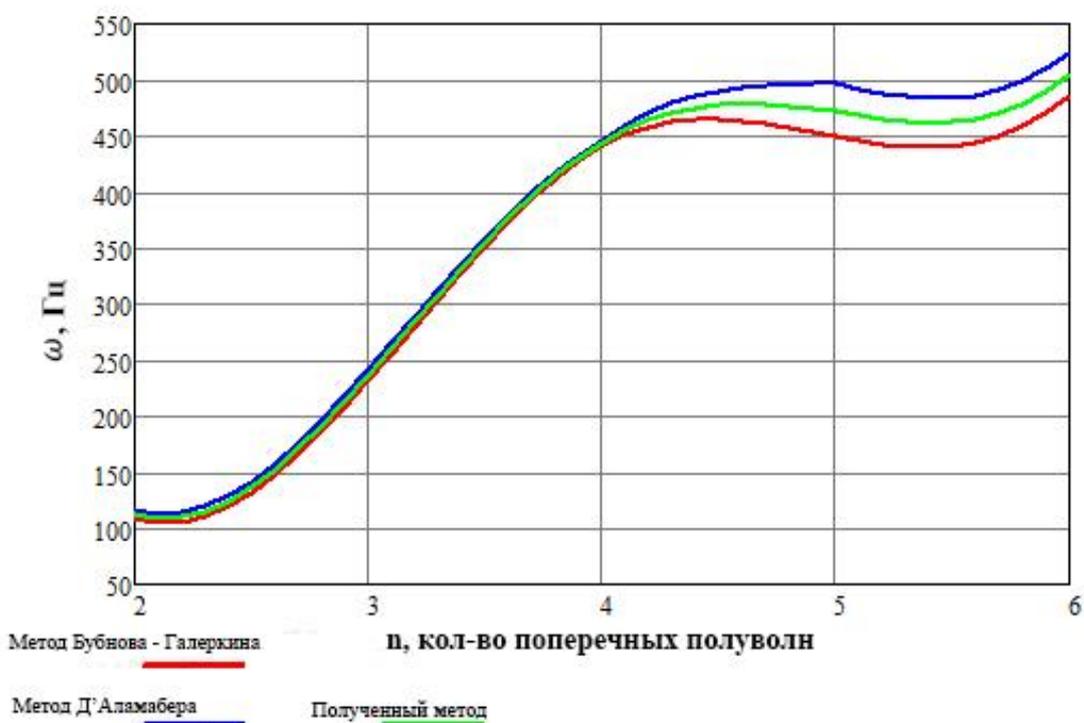


Рисунок 3.4 – Диаграмма собственных частот оболочки из бетона В20 при 5 % от числа полуволен в поперечном направлении

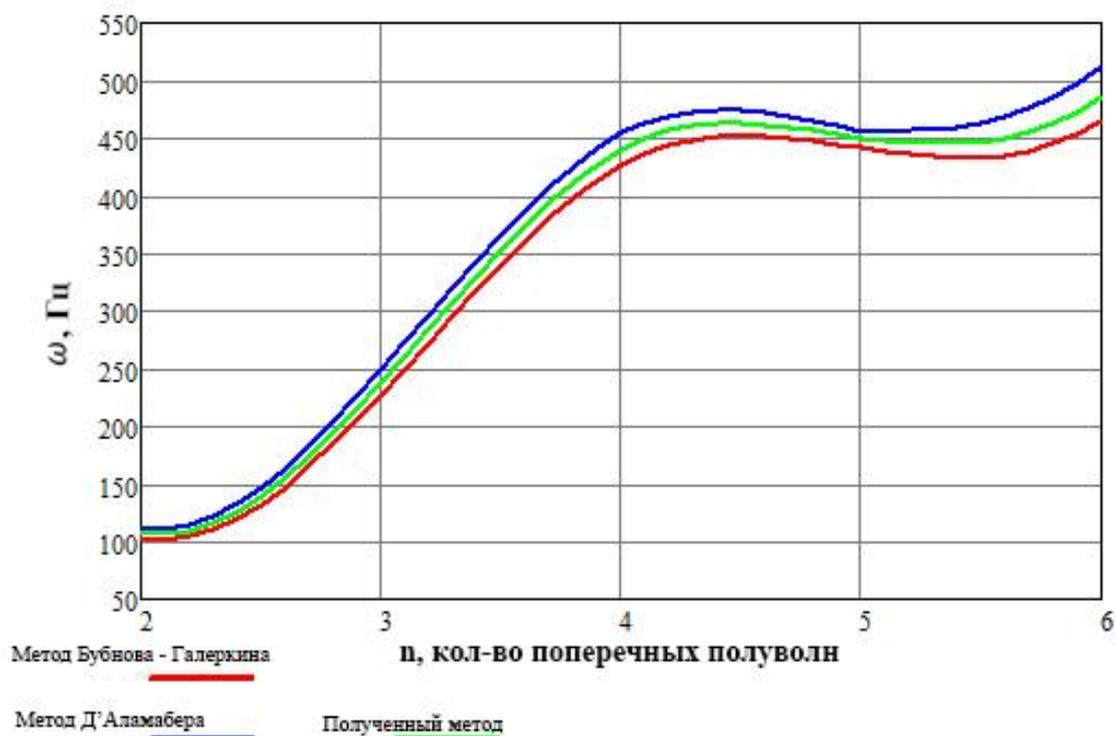


Рисунок 3.5 – Диаграмма собственных частот оболочки из бетона В30 при 5 % от числа поперечных полуволен в поперечном направлении

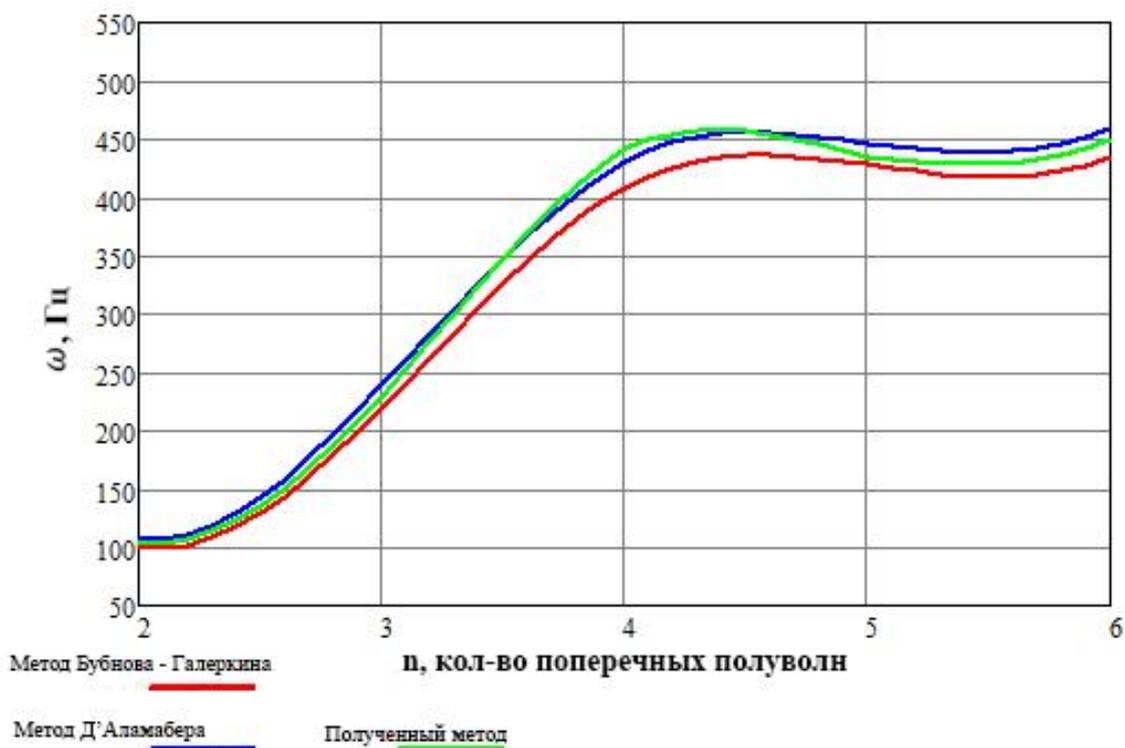


Рисунок 3.6 – Диаграмма собственных частот оболочки из бетона В40 при 5 % от числа поперечных полуволен в поперечном направлении

Процент армирования также может оказать влияние на показатели частот колебаний, так как из-за этого масса оболочки уменьшается и есть вероятность расчёта устойчивости к динамическим воздействиям тонкостенной цилиндрической разомкнутой оболочки при 2 % армирования.

Если сравнить полученные результаты между процентами армирования, то видим, что хоть масса оболочки и уменьшилась, но показатели в каждом классе бетона выросли, что подтверждает потери устойчивости к динамическим воздействиям.

Исходя из полученных результатов (рисунки 3.7 – 3.10), можно отметить, что разница между методами не так заметна, но при каждом классе бетона увеличивается несущая способность. Если анализировать между В15 и В20, то частота колебаний при 2 % армирования на всех количествах полуволокна выросла на 10...15 %. Это свидетельствует о том, что влияния модуля упругости и коэффициента армирования для железобетонных конструкций колоссальны.

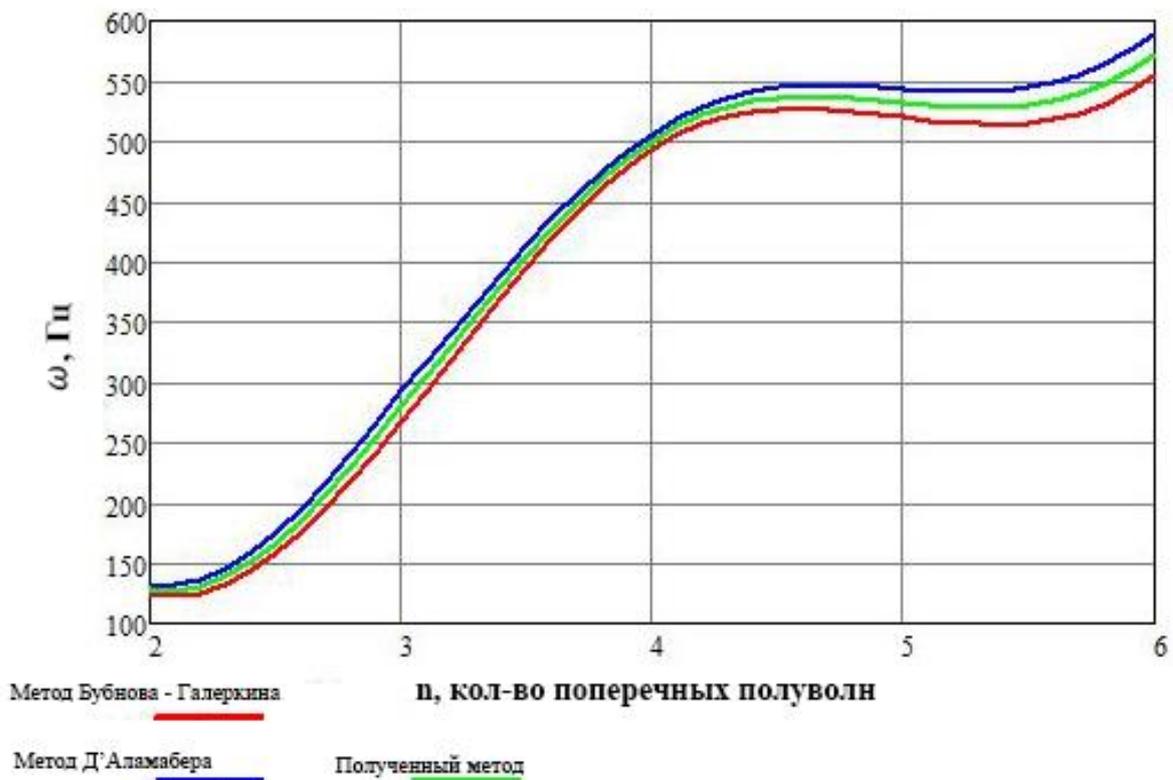


Рисунок 3.7 – Диаграмма собственных частот оболочки из бетона В15 при 2 % от числа полуволокон в поперечном направлении

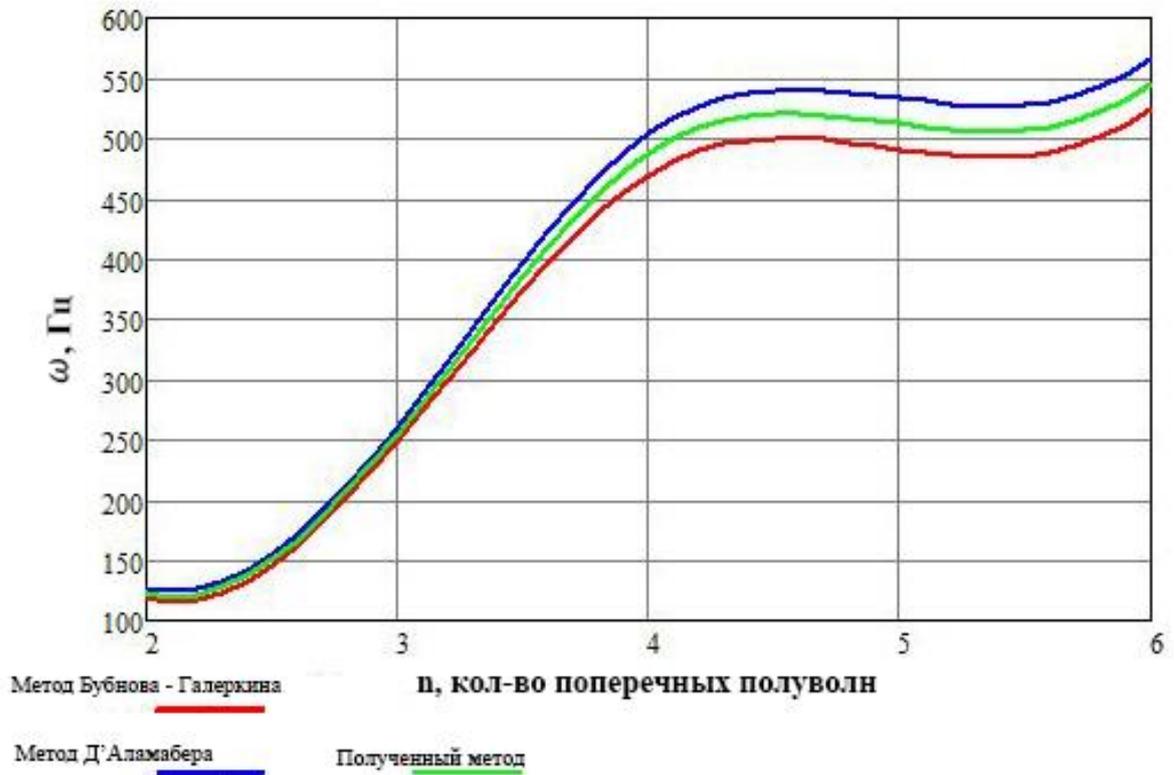


Рисунок 3.8 – Диаграмма собственных частот оболочки из бетона В20 при 2 % от числа поперечных полуволокн в поперечном направлении

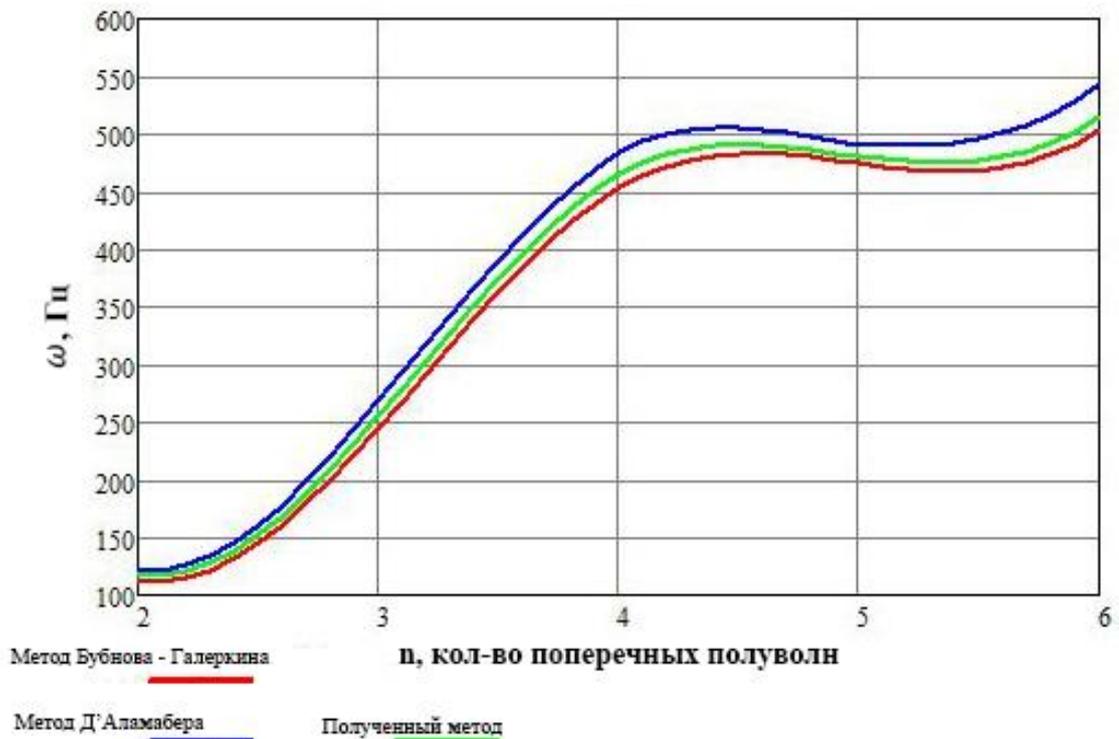


Рисунок 3.9 – Диаграмма собственных частот оболочки из бетона В30 при 2 % от числа поперечных полуволокн в поперечном направлении

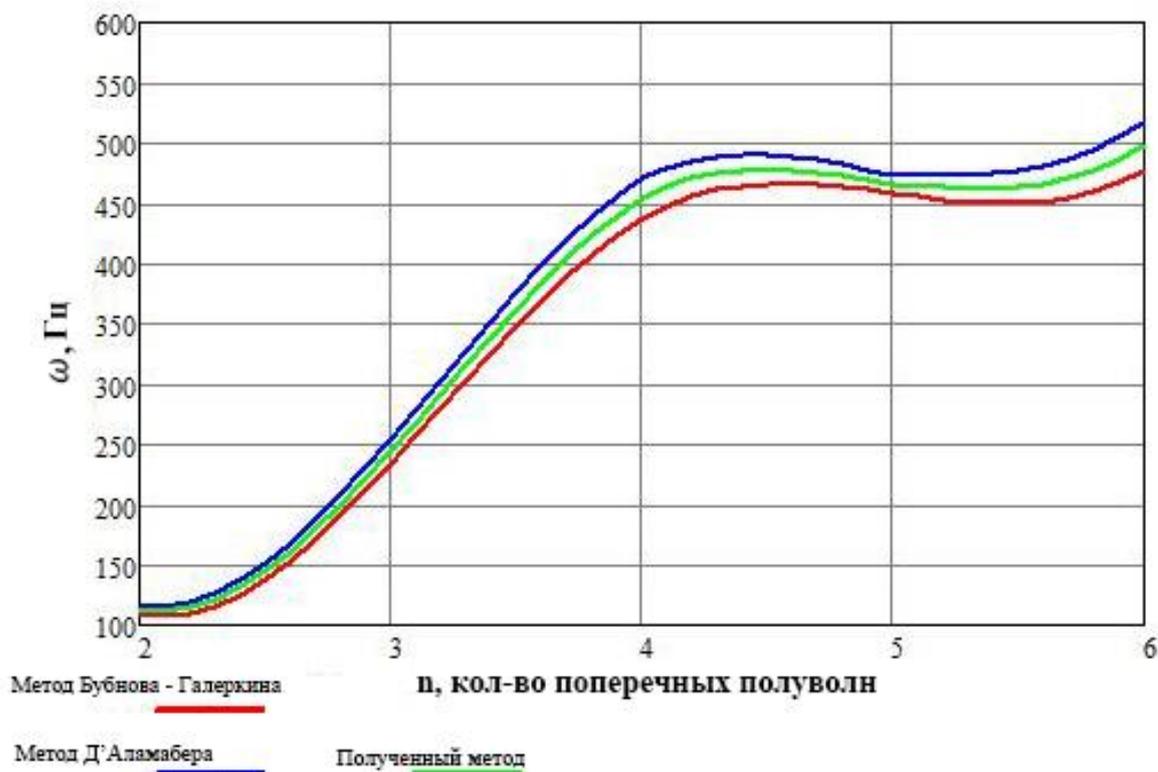


Рисунок 3.10 – Диаграмма собственных частот оболочки из бетона В40 при 2 % от числа поперечных полуволен в поперечном направлении

Выводы по третьей главе:

1. Проведен анализ математической модели Бубнова-Галеркина и принципа Д'Аламбера для определения свободных частот колебаний тонкостенных разомкнутых железобетонных оболочек под воздействием внешней нагрузки.
2. На основе модели Рейснера разработана математическая модель определения частот колебаний с использованием усреднённого модуля упругости.
3. Выполнено сравнение трех моделей и получены результаты, разработана модель.
4. Выявлено влияние модуля упругости на устойчивость оболочки при динамических воздействиях.
5. Получены зависимости влияния процента армирования от количества полуволен на частоты колебания разомкнутой оболочки.

6. Выявлено, что с повышением класса бетона и процента армирования уменьшаются частотные показатели собственных колебаний.
7. Выявлена эффективность использования усредненного модуля упругости.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РАЗОМКНУТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОБОЛОЧЕК, НЕСУЩИХ СОСРЕДОТОЧЕННУЮ МАССУ И ВОЗМОЖНОСТИ ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ КОНСТРУКЦИИ

Применение оболочечных форм конструкций зданий и сооружений обусловлено возможностью получения больших пролетов без дополнительных опорных конструкций и создания больших помещений. Оболочки также обладают хорошими технико-экономическими показателями, так как для их строительства расходуется меньше материалов по сравнению с другими конструкциями. Но тонкостенные оболочки, как показывает практика, очень чувствительны к вынужденным колебаниям, вызванным внешними воздействиями (ветровые, снеговые, сейсмические нагрузки). К сожалению, в настоящее время не производится обязательных расчётов зданий и сооружений на динамические колебания конструкций.

Источником динамической нагрузки могут быть как природные явления, так и технологические процессы, вследствие которых появляется резонанс в элементах здания и сооружения. Колебания оболочек в целом не так глубоко изучены. Подтверждение этому – многочисленные аварии, которые случились во многих странах до сегодняшнего дня. Динамические расчёты в строительстве производятся на ветровые нагрузки и сейсмику, а воздействия присоединённой массы или системы присоединённых масс учитываются очень редко. Исследования колебаний оболочки с присоединённой массой выполнены в следующих работах [26, 31, 33, 36, 48, 93-95, 97, 99, 119-121], но в них не учитываются ортотропность материала и наличие армирования в железобетонных или композиционных материалах оболочек при воздействии статистических и динамических нагрузок. Также представлены данные, подтверждающие математические модели. Недостаточно глубоко изучен вопрос влияния сочетания внешних нагрузок, изменяющих НДС оболочечных конструкций, на динамические колебания, которые оказывают существенное влияние на безопасность эксплуатации здания и сооружения.

В третьей главе можно сделать расчёт на динамическую устойчивость, а также предел прочности разомкнутых железобетонных оболочек. Вследствие расчёта выяснить, какой из параметров, т.е. габариты оболочки или физико-механические свойства конструкции, существенно влияет на процесс колебания.

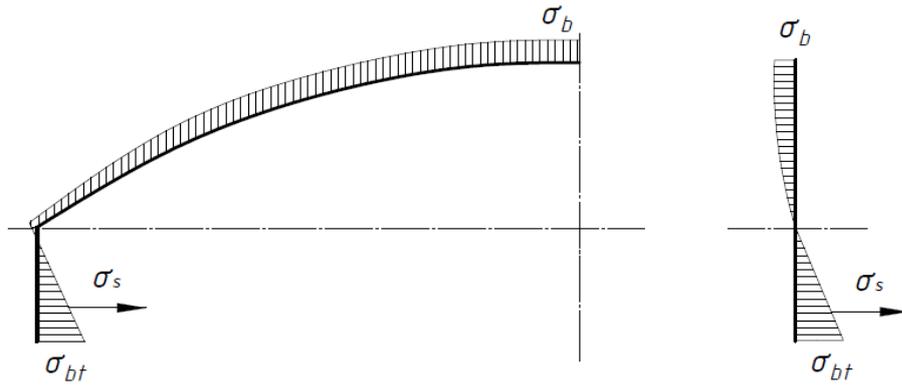
4.1. Напряженно-деформированное состояние тонкостенных цилиндрических железобетонных разомкнутых оболочек при нелинейном деформировании

Для проведения статистического расчёта оболочки и вычисления внутренних усилий, моментов и поперечных сил от внешних нагрузок в равнодействующих эпюрах нормальных и касательных напряжений единицы длины поперечного сечения без или с трещинами (возникающими в растянутой зоне). Важно отметить, что при исследовании НДС железобетонных оболочек возникает необходимость определить высоту сжатой зоны композиционного материала (бетона) в расчётных сечениях, так как в механике деформированного твердого тела есть гипотеза сплошности материала, которая является основной.

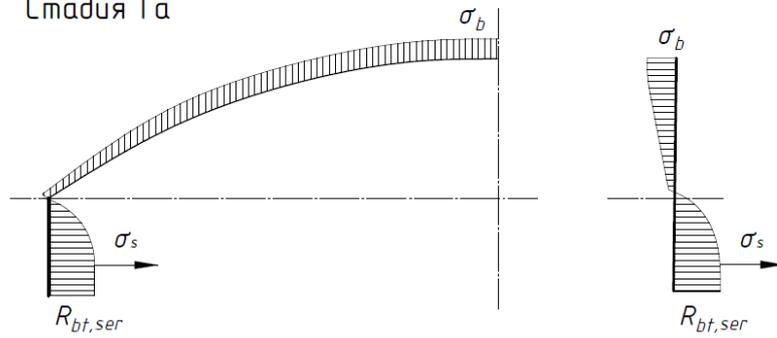
Как показывают практика и опыт в исследованиях с разными железобетонными конструкциями (изгибаемые, внецентренно сжатые (растянутые) и др.) при увеличении внешних нагрузок в железобетонном элементе можно рассмотреть три стадии НДС (рисунок 4.1).

Стадия I – при малом нагружении конструкции напряжения в ней не велики, а деформации в бетоне и арматуре носят преимущественно упругий характер. Эпюры между напряжениями и деформациями линейные, треугольные. С присоединением дополнительной нагрузки или увеличением на конструкцию в бетоне растянутой зоны начинают развиваться «неупругие деформации», а эпюра напряжений станет криволинейной. Стоит отметить, что напряжения приближаются к пределу прочности при растяжении.

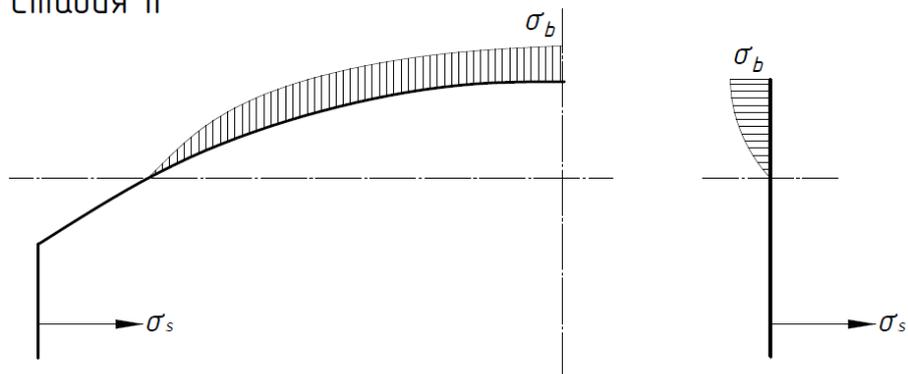
Стадия I



Стадия Iа



Стадия II



Стадия IIа

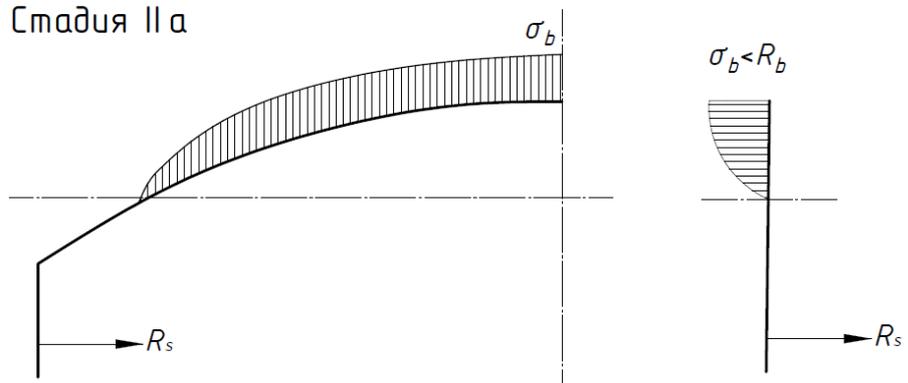


Рисунок 4.1 – Стадии напряженного состояния поперечных сечений оболочки

Стадия Ia – прочие неучтенные нагрузки в виде: спутниковых антенн, водяных (солнечных) коллекторов и другое переводят железобетонную конструкцию в другую стадию, где в бетоне растянутой зоны начинают образовываться микротрещины.

Стадии II и IIIa наступают с появлением микротрещин в растянутой зоне железобетонного элемента. В интервалах между появившимися трещинами сцепление арматуры с бетоном остаётся таким же, но с увеличением воздействующих нагрузок в бетоне сжатой зоны развиваются неупругие деформации. Эпюра нормальных напряжений в этом моменте искривляется, а ордината максимального напряжения перемещается с торца сечения в его глубину. Важно отметить, что напряжения в сжатой зоне в этой стадии остаются меньше призмической R_b , в растянутой зоне арматуры напряжения изначально равны σ_s , а на конечном этапе могут достигать предельных значений R_s .

На рассматриваемой конструкции действуют усилия мембранного типа (нормальные N_1, N_2 и сдвигающие S_1, S_2), моментного типа (изгибающие M_1, M_2 и крутящие M_{12}, M_{21}), а также поперечные силы Q_1, Q_2 (рисунок 4.2). Важно отметить, что при $t \ll R$ используется закон парности касательных усилий

$$S_{12} = S_{21}, M_{12} = M_{21}.$$

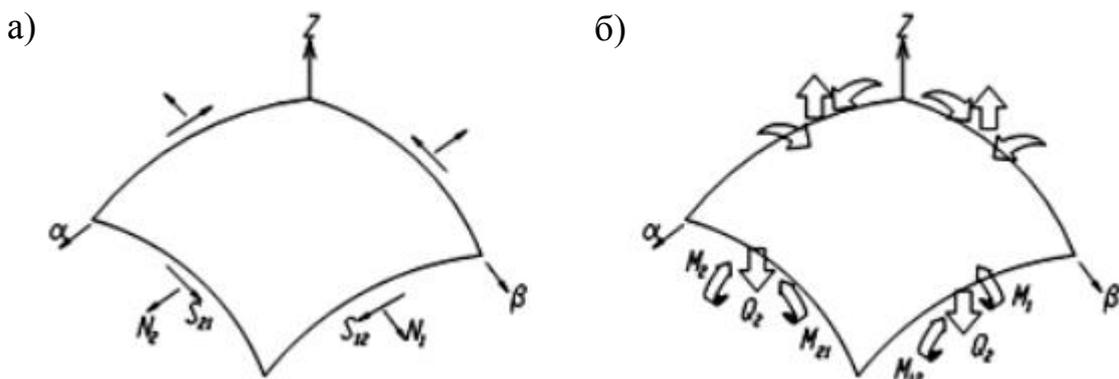


Рисунок 4.2 – Схема внутренних усилий в оболочных формах конструкций:
а – мембранные усилия; б – моментные усилия

Для определения других компонентов $(N_{1,2}, Q_{1,2}, M_{1,2}, S, \delta_{1,2})$ НДС нужно составить пять уравнений равновесия, шесть геометрических и физических уравнений.

Даны рекомендации для описания граничных условий, а также способы определения искомых величин и действующих нагрузок, метод численного интегрирования Рунге-Кутты, интерполяционные методы решения краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений.

Также отмечены методики по использованию линейных и нелинейных методов расчёта. В методиках приведены три вида стадии нелинейности: 1) физическая; 2) геометрическая; 3) конструктивная.

В первую очередь особое внимание уделяется выбору расчётной схемы тонкостенной цилиндрической железобетонной разомкнутой оболочки, которая приведена в работах А.В. Забагаева [40], Я.М. Немировского [77], В.В. Шугаева [107], и др. Указаны расчёт оболочных конструкций в работе конструкции упругой стадии и момент инерции. Площадь сечения допускается принимать как для бетонного или же приведенного к нему сечения, а во время расчёта в неупругой стадии приняты действительные физико-механические характеристики железобетонного материала.

В теории как математической модели принимают три вида модели: 1) контурную; 2) дискретную; 3) комплексную (дискретно-контурную). В отличие от теоретической практическая среда отличается, в ней рекомендуется принять деформации: а) аналитические, б) приближённые, в) предельного равновесия и г) упругопластические. Стоит отметить, что, исходя из вида конструкций, а также вида различных нагружений, используются разные методы расчёта.

Поверхность тонкостенной цилиндрической разомкнутой оболочки, образованная вращением плоской кривой относительно вертикальной оси, приведена на рисунке 4.3.

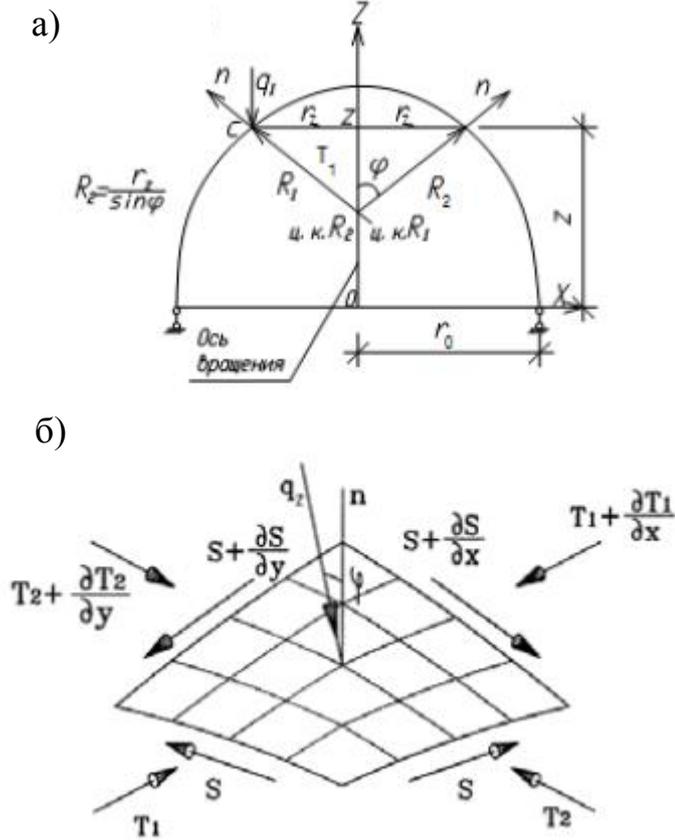


Рисунок 4.3 – Разрез разомкнутой оболочки (а)
и выделенный из нее элемент (б)

Дифференциальное уравнение равновесия

$$\frac{T_1}{R_1} + \frac{T_2}{R_2} + 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} S = q \cos \varphi. \quad (4.1)$$

Если скручивания поверхности не будет, то

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{T_1}{R_1} + \frac{T_2}{R_2} + 2S = q \cos \varphi. \quad (4.2)$$

Погонная нагрузка на кромку нижней части от веса верхней G_z

$$q_z = \frac{G_z}{2\pi r_z}. \quad (4.3)$$

Усилия T_1 и T_2

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= \frac{G_z}{2\pi r_z \varphi_z}, \\ T_2 &= q \frac{r_z}{\operatorname{tg} \varphi} - q_z \frac{r_z}{R_1 \sin^2 \varphi_z}. \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

Чистый изгиб разомкнутой оболочки от равномерно распределяющих крутящих моментов $m_{\text{кр}}$

$$M_{\text{из}} = m_{\text{кр}} r_0.$$

Сегодня в строительстве, как и в других отраслях, все чаще используются новые материалы, отвечающие требованиям современных строительных норм и правил. Новые строительные материалы обладают свойствами: а) анизотропии; б) разносопротивляемости. Разносопротивляющими материалами являются те материалы, у которых проявляется зависимость деформационных и прочностных характеристик от вида напряжённого состояния. Перечисленные качества встречаются не только в наноматериалах, но и у традиционных композиционных материалов типа железобетона.

Использование существующих классических теорий механики деформируемого твердого тела в момент расчёта не может обеспечить должную несущую способность конструкций из разносопротивляющих материалов. В механике деформируемого твердого тела изучение НДС таких материалов является достаточно новой (актуальной) областью. Поэтому необходимо подтверждение теории механики деформируемого твёрдого тела экспериментальными данными, так как в настоящее время во всех отраслях промышленности все больше используются легкие композиционные материалы. Важно отметить, что учёт эффекта разносопротивляющих материалов во время расчёта вносит значительные поправки в НДС тонкостенных цилиндрических оболочек. Из вышесказанных факторов поставлена цель определения НДС тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек. Для достижения поставленной цели необходимо экспериментальным и аналитическим путём определить НДС оболочки.

Объектами исследования являются тонкостенные цилиндрические разомкнутые железобетонные оболочки (рисунок 4.4), МКЭ в расчётной программе LIRA-САПР 2013. Закрепления производятся шарнирно.

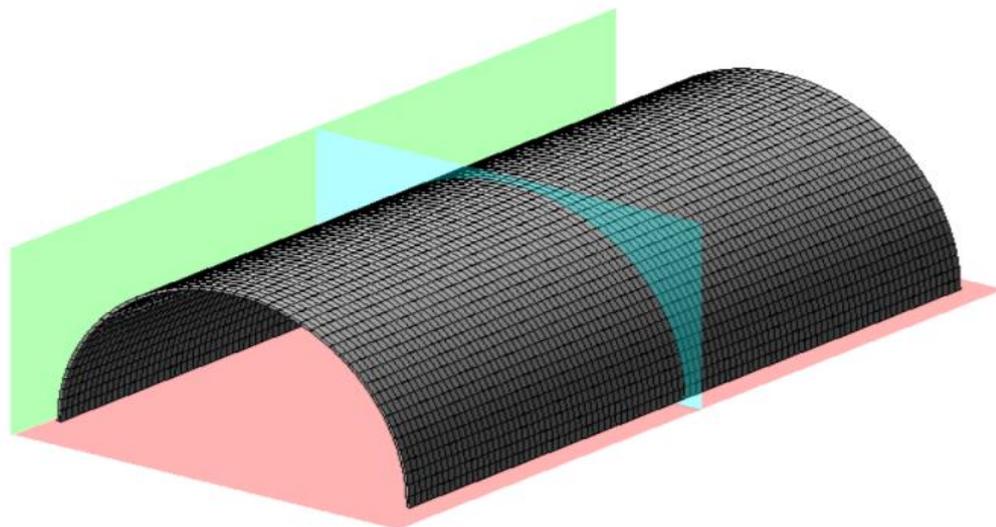


Рисунок 4.4 – Схема задачи

После того как задана жёсткость, далее будем нагружать железобетонную оболочку статическими нагрузками, а именно собственным весом, сосредоточенной нагрузкой и снеговым покровом. Также произведем расчёт на колебания расчётной модели от действующих нагрузок с разными сочетаниями (рисунок 4.5).

После задачи нагрузок нужно сформулировать «Расчётные сочетания нагрузок», а также «Таблицу динамических загрузений». Первое сочетание будет только от собственной массы конструкции; второе сочетание – от собственной массы и сосредоточенной нагрузки; третье сочетание – от собственной массы, сосредоточенной нагрузки и снегового покрова. После всех заданных параметров расчёта можно будет рассчитать усилия в оболочке и проанализировать изменения НДС формы оболочки от действующих нагрузок. Расчётная программа даёт нам возможность в виртуальном виде анализировать опасные зоны от действующих сочетаний, которые также приведены в таблице 4.1.

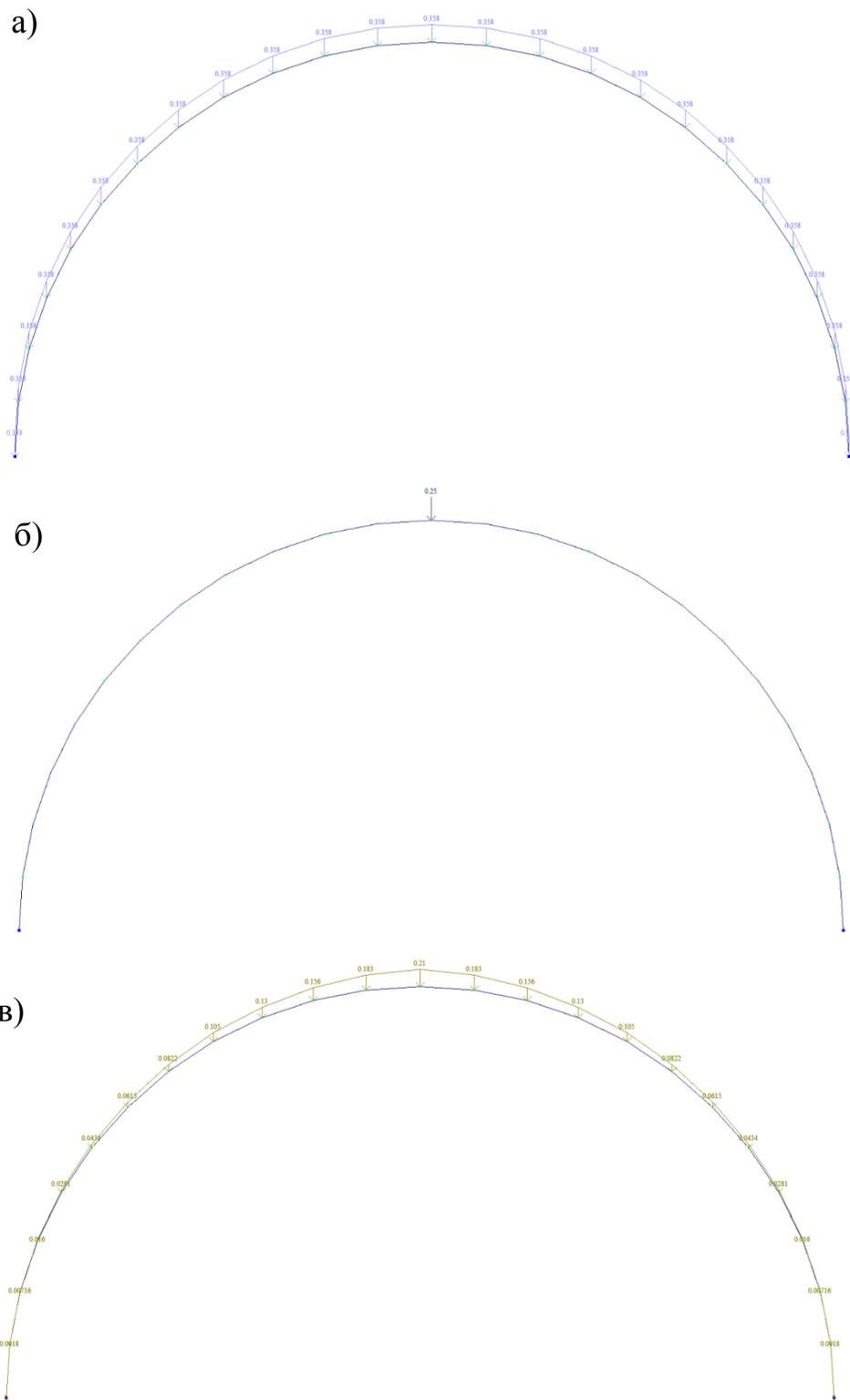


Рисунок 4.5 – Разомкнутая оболочка под воздействием внешних нагрузок:
 а – собственный вес (358 кг на точку); б – сосредоточенная нагрузка (250 кг);
 в – нагрузка от снегового покрова (расчётная величина
 для г. Комсомольск-на-Амуре 210 кг/пм)

Напряженно-деформированное состояние оболочки от действующих сочетаний нагрузок

Номер нагрузки	Наименование усилий в оболочке	Единицы измерения	Полученные результаты			
			Лири САПР		Аналитическим методом	
			max	min	max	min
От собственной массы						
1	Продольные силы (N)	т	-0,38	-0,12	-0,415	-0,135
2	Поперечные силы (Q)	т	0,0968	≈-0,007	-0,105	≈-0,0075
3	Изгибающие моменты (M)	т · м	≈0,1	-0,13	≈0,112	-0,125
От собственной массы и сосредоточенной нагрузки						
1	Продольные силы (N)	т	≈-0,5	-0,2	-0,522	-0,198
2	Поперечные силы (Q)	т	0,16	-0,1	0,172	-0,107
3	Изгибающие моменты (M)	т · м	0,343	-0,25	0,352	0,36
От собственной массы, сосредоточенной нагрузки и снегового покрова						
1	Продольные силы (N)	т	-1,35	-0,62	-1,42	-0,71
2	Поперечные силы (Q)	т	0,522	-0,167	0,64	-0,194
3	Изгибающие моменты (M)	т · м	0,946	-0,85	1,02	-0,963

Из полученных результатов видно, что с умножением к собственному весу оболочки других нагрузок, в частности сосредоточенной нагрузки и снегового покрова, эпюра моментов и сил тонкостенной цилиндрической железобетонной разомкнутой оболочки с каждой нагрузкой вырастает на ≈80 %.

4.2. Система для мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций во время эксплуатации в зданиях и сооружениях

Каждый из элементов здания и сооружения подвергается разным воздействиям, но большинство из них воспринимают именно покрытие. Оболочка из-за своей формы имеет большую несущую способность. Для этого очень много сделано, изучено для повышения несущей способности железобетонной оболочки. Но важно отметить, что очень много остается не учтённым во время проектирования, в том числе проблемы, которые существуют во время производственных работ. Исходя из того, что в то же время могут возникнуть импульсные воздействия на все несущие элементы здания и сооружения, критическим элементом в большинстве случаев является покрытие. Именно оно воспринимает нагрузку от природных явлений (снег, тайфун, ветер и т.п.), которые считаются импульсными нагрузками. Их очень трудно учесть во время проектирования, так как они являются источником резонансного процесса в несущих конструкциях. В то же время подкреплены другие дополнительные нагрузки в виде солнечных (водяных) коллекторов, систем вентиляции воздуха, спутниковых антенн и др. В сумме получится нагрузка, которую нереально учитывать при проектных работах, что может привести к критическим воздействиям для несущего элемента здания и сооружения независимо от запаса прочности.

Из проведенной работы по обзору литературы и исследованию колебаний ТЦО мы сделали вывод, что не все можно учесть в стадии расчёта. Это даёт нам возможность на разработку устройства для погашения возникающего резонанса в оболочке. Данное устройство будет обладать рядом функций практической значимости: онлайн-мониторинг состояний несущих конструкций, анализ НДС конструкций, аппарат для устранения резонансного процесса.

На создание вышеуказанного устройства на базе ФГБОУ ВО «КнАГУ» были подготовлены и зарегистрированы в Роспатенте Российской Федерации технические решения. Система комплексной безопасности позволяет в онлайн-режиме осуществлять мониторинг несущих конструкций. В момент появления резонанс-

ного процесса включаются виброобразователи работы противофаз, изменяя тем самым частоты колебания и их количество волн, выводя несущие элементы из колебательного процесса, что способствует увеличению несущей способности и устранению аварийных случаев, а также предотвращению гибели людей.

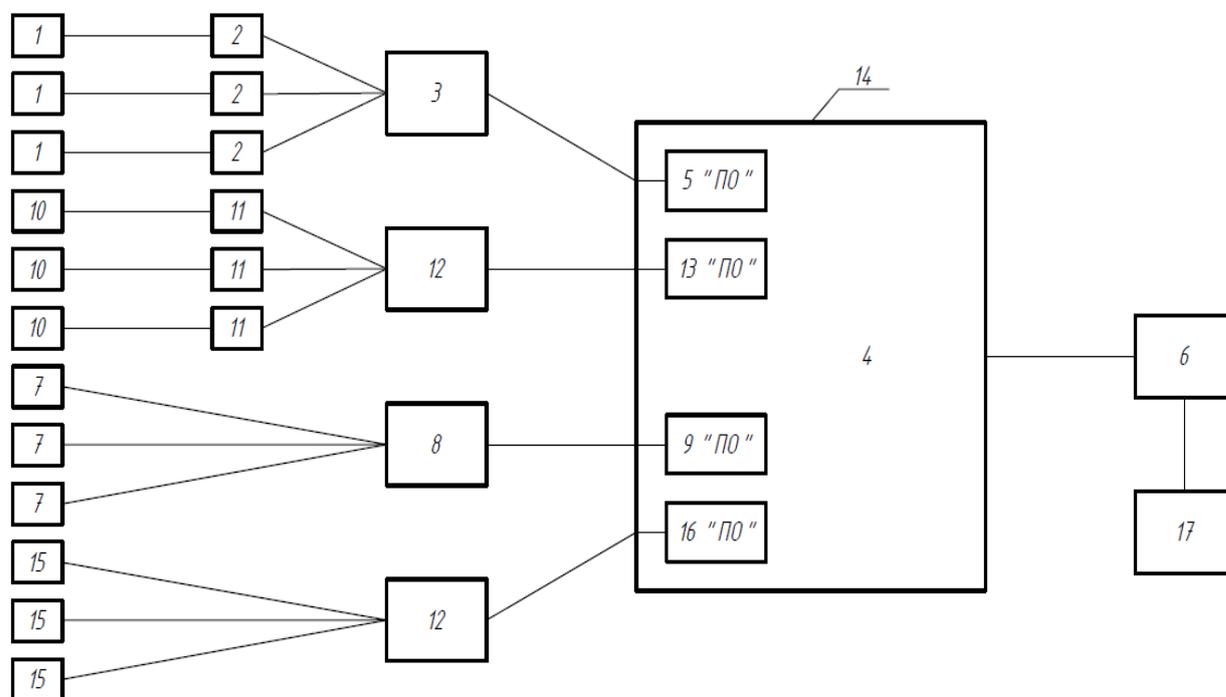
Система комплексной безопасности во время эксплуатации не только может дать сведения о состояниях несущих конструкций на основе сигналов акустической эмиссии, но и способствует получению дополнительных анализов о состоянии объекта в целом за счёт видеонаблюдения. Для приёма сигнала служат датчики ВС110. Они передают сигнал усилителям аналогового сигнала, который обрабатывается устройством приёма-передачи. В итоге мы получаем сведения о состоянии несущих конструкции в ПК.

Система комплексной безопасности относится к изобретению обеспечения надёжности и контроля несущих конструкций объекта. В свою очередь, за счёт вышеупомянутых качеств позволяет определять стадии работ несущих элементов по предельным состояниям. Устойчивость к динамическим воздействиям, конечно же, является преимуществом изобретенного устройства, но и есть другие плюсы: позволяет одновременно проводить видеонаблюдение деформаций конструкций и следить за состоянием структуры материала конструкции. Стоит отметить, что, как и любое устройство, имеет свои недостатки: не позволяет регистрировать виброколебания конструкций, а также влияния температуры на процесс колебания.

Задача изобретения заключается в определении предельного состояния несущих конструкций и их контролировании за счёт получения и обработки данных от акустической эмиссии и видеорегистраторов для обеспечения надёжности здания и сооружения. Также с помощью акселерометров и усилителей аналогового сигнала и аналого-цифрового преобразователя проводится измерение автоколебаний для определения момента вхождения в резонансный процесс.

Местоположение устройств изобретения можно увидеть на рисунке 4.6. Датчики ВС110 расположены в железобетонной оболочке либо в металлических конструкциях. Усилители аналоговых сигналов и устройство приёма-передачи, а

также аналого-цифровые преобразователи (АЦП) расположены внутри корпуса, подключены к ПК или ноутбуку. Изобретение имеет отличительные признаки: акселерометры и расположение всех других устройств внутри корпуса изобретения.



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

Рисунок 4.6 – Схема системы комплексной безопасности

Описание принципа работы системы. Система комплексной безопасности эксплуатации зданий и сооружений закрепляется к исследуемой конструкции (железобетонной тонкостенной оболочке), датчики ВС110 1 принимают сигналы резонансного процесса, которые возникают в конструкции. Сигналы передаются усилителям аналоговых сигналов 2, далее сигналы поступают на устройство приёма-передачи 3, принятые информации поступают на ПК 4, где с использованием

ПО «ZetLab» 5 обрабатывается информация. Панель управления 6 служит для контроля виброустройства, также для визуального наблюдения предусмотрены видеокamеры 7, расположенные в центре несущих конструкций, через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) подключены к ПК, где также через ПО обрабатывается полученный материал. Акселерометры (BC110) расположены в рабочем корпусе изобретения, они предназначены для определения частоты и амплитуды колебания. В свою очередь данные передаются через усилители аналоговых сигналов на АЦП. Полученные данные со всех устройств обрабатываются на ПК и анализируются специалистом.

Информационными датчиками являются датчики BC110 1, видеокamera 7, акселерометр 10, датчик температуры 14, которые управляются панелью оператора 6, содержащей звуковое и световое сопровождения. Все перечисленные устройства находятся в самом корпусе.

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

Во время эксплуатации здания и сооружения её несущие элементы в любое время года подвергаются циклическим воздействиям, что сказывается на физико-механические свойства материала конструкций. Изменение в структуре материала несущей конструкции вызывает акустическую эмиссию, можно прогнозировать критическое состояние несущей способности оболочки и её разрушение.

Виброконтроль – процесс отслеживания геометрических изменений оболочки и других несущих конструкций во время возникновения резонансного со-

стояния и перехода к динамическим колебаниям. Устройство мониторинга рассчитывает конструкции, используя следующие формулы:

$$\lambda_{1n} = \sqrt{\frac{\rho}{G} \frac{\omega_{0n}}{\Gamma + \frac{2}{(1-\mu)}} - \mu_n^2}, \quad \delta_n = \sqrt{\frac{\rho}{G} \omega_{0n} - \mu_n^2}, \quad \omega_{0n} = \omega_n^2 - \frac{12G\Gamma}{\rho h^2} - \frac{M}{M_0} \sin^2 \alpha x.$$

Вычисляется частота конструкций, при которой оболочки могут перейти от одного режима к другому. Исходя из полученных фактических результатов с помощью устройств (акселерометров и видеокамер) частоты и амплитуды колебаний несущих конструкций, а именно железобетонной оболочки, можно включить устройство, работающее противофаз входящим частотам и амплитудам колебания на их затухания. Вышеперечисленные предположения можно выполнить с помощью зарегистрированного устройства «Возбуждения колебаний». С использованием данного устройства механическим путём можно контролировать частоту и амплитуду колебаний несущих конструкций, которые могут стать источником вхождения резонансного режима несущих конструкций и тем самым причиной разрушению здания или сооружения.

Чтобы определить частоту и амплитуду колебаний нужно пройти несколько этапов:

1. Использование устройств в виде контактных датчиков и видеокамер и применение математических моделей.
2. Если величина входящих частот и амплитуд окажется больше расчётной, то включается устройство «Механического возбуждения колебаний» для погашения резонансного воздействия колебаний несущих конструкций.

4.3. Устройство механического возбуждения колебаний

Устройство механического возбуждения колебаний предназначено для создания противофаз к возникшим колебаниям амплитуд и тем самым обеспечивает надёжность несущих конструкций к динамическим воздействиям, а также анализ входящих величин амплитуд и частоты колебаний. Устройство может быть ис-

пользовано не только в строительстве, но и во многих промышленных сферах: машиностроении, ракетостроении, авиации и др.

Контролированием процесса колебания занимались намного раньше из существующего устройства для обеспечения безопасности от аварийных случаев (26.02.2015 г.), содержащего электропривод, стрежень, волновод и другие части (US 15220A).

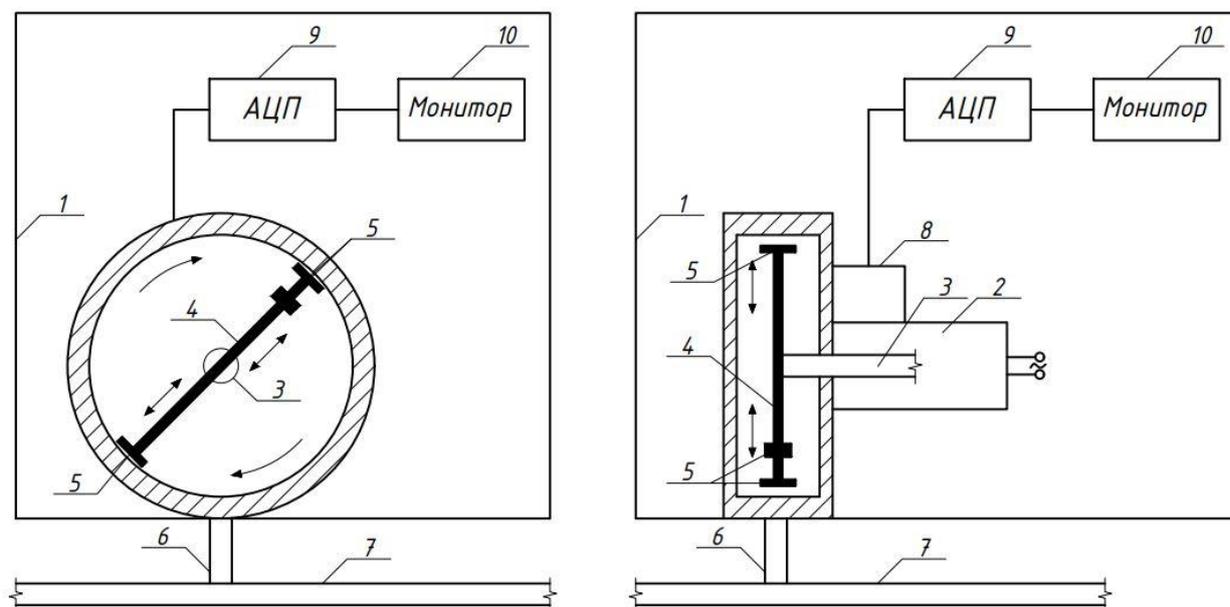
В своей работе С.П. Тимашенко [96] исследует определение амплитуды колебаний, вызываемых устройством, используя основные постулаты современной технической науки. Также возможно по теории определить эти амплитуды колебаний, источником которых могут быть внешние нагрузки. Важно отметить, что вращающиеся элементы физически не могут установить влияющие усилия (грузы) на определенное расстояние на стержне, а также способствуют изменению конечных колебаний устройства. Лишь совместная работа конструкции и механизма возбуждения колебаний, которой необходимо вызвать механические колебания и фактор износа механизма, влияет на итоговую величину амплитуды колебаний. С точки зрения экономики данная методика является непродуктивной, так как для определения механических колебаний требует дополнительных финансовых затрат на приобретение датчиков, преобразователей, усилителей аналоговых сигналов.

Цель создания устройства механического колебания заключается в возбуждении этих колебаний определённой величины противофаз к возникшим колебаниям несущих конструкций, тем самым обеспечив им динамическую устойчивость.

Требуемый результат от данного устройства заключается в получении данных о спектрах амплитуд и частот возникших динамических колебаний и обработке полученных данных на дисплее, в случае необходимости обеспечить динамическую устойчивость железобетонной разомкнутой оболочки, создавая механический колебательный процесс противофаз к возникшим.

Преимущество изобретённого устройства от современных существующих в том, что нынешние устройства не могут фиксировать частоты колебаний в случае

возникновения резонансного процесса в несущих конструкциях из-за отсутствия необходимых устройств (рисунок 4.7). В связи с этим в изобретённое устройство были предусмотрены датчики измерения колебаний, аналого-цифровой преобразователь, конструкция возбуждения колебаний и др.



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 – монитор; 11 – ПК

Рисунок 4.7 – Схема устройства возбуждения колебаний

Устройство возбуждения колебаний закрепляется на более слабых конструкциях через волновод 6 на корпус устройства 1. Корпус устройства выполнен в виде замкнутой оболочки прямоугольной формы, в плане она соединяется с электроприводом 2. В свою очередь элемент устройства 2 может быть разной мощности с преобразователем мощности. Внутри электропривода содержится вал 3, в момент работы вал входит в корпус устройства и своим вращением приводит в движение стержень 4, элемент устройства 5 – это груз, который крепится по длине стержня. Для фиксации частот колебаний внутри тела устройства расположен датчик. ПО ПК 11, анализируя полученные данные, сопоставляет расчётную

величину амплитуд частотных колебаний, и в случае уменьшения запас прочности железобетонной оболочки автоматом включается устройство для контроля резонансного процесса, пока разница между фактическим и требуемым частотными показателями будет меньше расчётных.

Принцип работы устройства. Устройство состоит из 11 элементов, каждый из которых выполняет предусмотренные задачи с включением электропривода 2, также в процесс входит вал 3, тем самым вращается стержень 4, где прикреплены груза 5. В процессе перечисленные элементы создают центробежную силу и тем самым возбуждают в корпусе 1 колебания широкого спектра. Колебания в широком спектре через волновод 6 передаются на исследуемую конструкцию для возбуждения механического колебания, элемент устройства 8 – датчики, предназначены для фиксации колебания. Полученные данные передаются в аналогово-цифровой преобразователь 9, анализируются и выводятся на монитор 10. ПО в ПК 11 анализирует полученные данные для контроля скоростью вращения вала 3 в электроприводе 2.

Заявляемое устройство было создано и протестировано в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет». Проверка проводилась с использованием сертифицируемого датчика измерения колебаний ВС110 и ПО версии «ZetLab». Исследуемые данные успешно подтвердились, имея погрешность не более 3 %.

Используемый датчик ВС110 в процессе проведения испытательных исследований работал стабильно при измерении высоких и низких показателей амплитуд и частот колебаний, т.е. не наблюдался срыв или перебой в получении результатов.

Предлагаемое техническое решение позволяет получить широкий спектр частот и амплитуд возбуждаемых колебаний при высокой стабильности и устойчивости работы устройства, а также точно фиксировать амплитуду колебаний.

На рисунке 4.8 приведены принцип и результаты работы устройства для обеспечения комплексной безопасности.

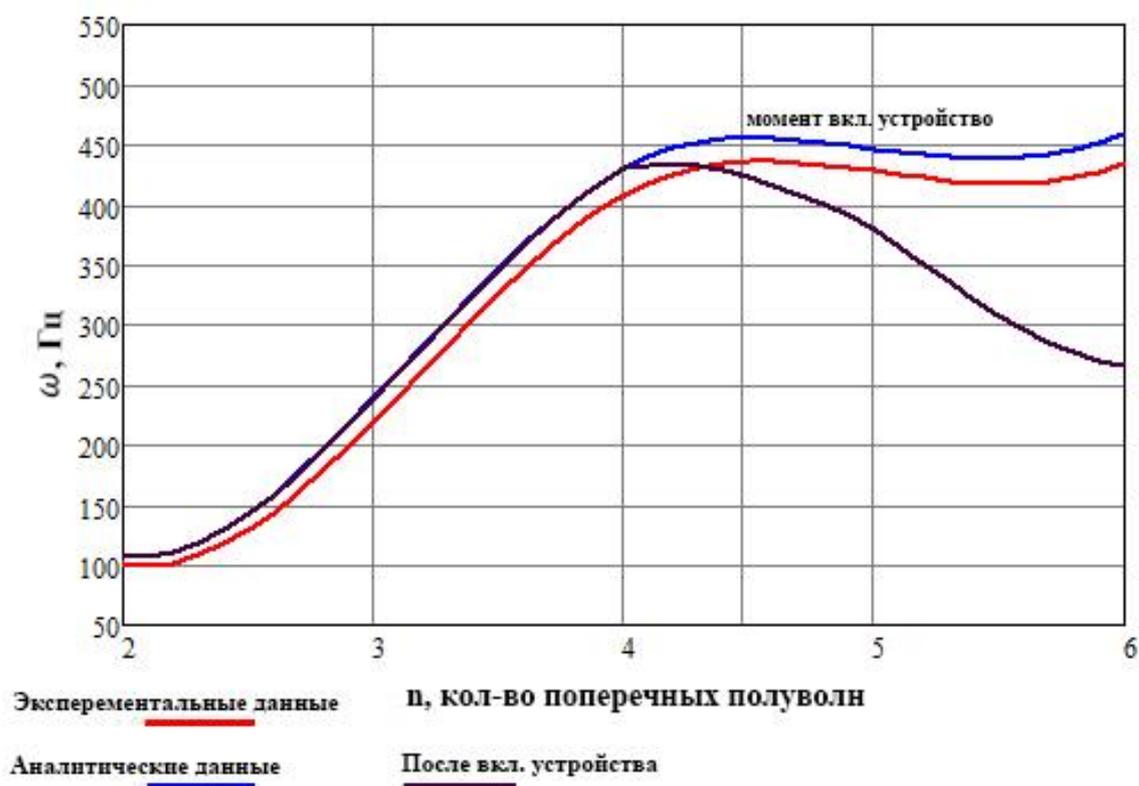


Рисунок 4.8 – Частотная диаграмма колебаний оболочки при наличии системы комплексной безопасности и устройства возбуждения колебаний конструкции

Из полученных теоретических и экспериментальных исследований выявлено, что с ростом колебательных показателей также увеличивается количество поперечных полуволн. Включение устройства поможет затуханию возникшего резонансного процесса в несущей конструкции. Как видно на рисунке 4.8, с включением устройства идет процесс снижения величин появившихся колебаний, а также количества поперечных полуволн.

Разработанное «Устройство обследования состояния конструкций» предназначено для мониторинга состояния конструкций, выполненных в виде тонкостенных цилиндрических оболочек, учитывает влияние кривизны оболочки и начальные неправильности на частотные характеристики и колебания конструкций. Устройство позволяет вести постоянный мониторинг и обеспечить безопасность эксплуатации оболочечных конструкций.

Выводы по четвертой главе:

1. Получены теоретические зависимости НДС от действия разного сочетания нагрузок.
2. Проведена экспериментальная проверка определения динамической устойчивости тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек с изменением класса бетона и процента армирования образцов.
3. Получены экспериментальные зависимости и влияния модуля упругости и процента армирования на процесс вынужденного колебания тонкостенных цилиндрических разомкнутых железобетонных оболочек.
4. Выявлены отклонения полученных результатов между экспериментальными и разработанной математической модели.
5. Разработано «Устройство обследования состояния конструкций» для мониторинга динамического состояния тонкостенных цилиндрических разомкнутых оболочек, гашения опасных колебаний и обеспечения безопасной эксплуатации конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 материала.
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^x и 5^{ти} процентов армирования выявлено, с увеличением процента армирования оболочка теряет свою пластичность, что способствует к 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, с увеличением армирования с 2% до 5 % уменьшается частота вынужденных колебаний с 3-8 %;

7. Выявлено влияние изменения напряжено-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 безопасного эксплуатации конструкций;

9. Зарегистрировано программное обеспечение «Определение состояния конструкций, расчет оболочек, строительных материалов ОСКРОСМ2017» для управления устройством механической 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 используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» при чте-

нии лекций кафедры «Строительство и Архитектура» и других технических факультетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абовский, Н. П.** Вариационные принципы теории упругости и теории оболочек / Н. П. Абовский, Н. П. Андреев, А. П. Деруга ; под редакцией Н. П. Абовского. – Москва : Наука, 1978. – 228 с.
2. **Абовский, Н. П.** Некоторые аспекты развития численных методов расчета конструкций / Н. П. Абовский, Л. В. Енджевский // Известия вузов. Серия «Строительство и архитектура». – 1981. – № 6. – С. 30–47.
3. **Абрамов, Л. Н.** Исследование устойчивости статически неопределимых стрелевых железобетонных конструкций при статическом нагружении с учётом физической и геометрической нелинейности / Л. Н. Абрамов // Статистика и динамика сложных строительных конструкций. – Ленинград, 1980. – С. 89–100.
4. **Антуфьев, Б. А.** Колебания неоднородных тонкостенных конструкций : монография / Б. А. Антуфьев. – Москва : МАИ, 2011. – 176 с.
5. **Амиро, И. Я.** Ребристые цилиндрические оболочки / И. Я. Амиро. – Киев: Наукова думка, 1973. – 248 с.
6. **Арутюнян, Н. Х.** Некоторые вопросы теории ползучести / Н. Х. Арутюнян. – Москва-Ленинград : Гос. изд. техн.-теорет. лит., 1952. – 323 с.
7. **Ахвледиани, Н. В.** О предельном равновесии армированных оболочек / Н. В. Ахвледиани // Пространственные конструкции зданий и сооружений. – Москва : Стройиздат, 1972. – Выпуск Г. – С. 51–53.
8. **Андреев, Л. В.** Динамика пластин и оболочек с сосредоточенными массами / Л. В. Андреев, А. Л. Дышко, И. Д. Павленко. – Москва : Машиностроение, 1988. – 200 с.
9. **Айнола, Л.** Нелинейная теория типа Тимошенко для упругих оболочек. / Л. Айнола // Известия АН СССР. Серия физ.-мат. и техн. наук. – 1965. – № 3.

10. **Байков, В. Н.** Проектирование железобетонных тонкостенных пространственных конструкций : учебное пособие для вузов / В. Н. Байков, Э. Хампе, Э. Рауэ. – Москва : Стройиздат, 1990. – 232 с.

11. **Багдасарян, Ж. Е.** Динамическая устойчивость анизотропной замкнутой цилиндрической оболочки / Ж. Е. Багдасарян, В. Ц. Гнуни // ДАН АрмССР. – 1981. – Т. 73. – № 5. – С. 278–281.

12. **Бачинский В. Я.** Некоторые вопросы, связанные с построением общей теории железобетона / В. Я. Бачинский // Бетон и железобетон. – 1979. – № 11. – С. 35–36.

13. **Болотин, В. В.** Динамическая устойчивость упругих систем / В. В. Болотин. – Москва : Гос. изд-во, 1956. – 600 с.

14. **Борисов, Ю. Б.** Влияние сосредоточенной массы на собственные частоты и формы колебаний круговой цилиндрической оболочки / Ю. Б. Борисов // Доклад 2-й науч.-техн. конф. по строительной механике корабля памяти академика Ю. А. Шиманского. – Ленинград, 1965.

15. **Богданович, А. Е.** Анализ неосесимметричного выпучивания цилиндрических оболочек при осевом динамическом сжатии / А. Е. Богданович, Э. Г. Феддмане // Известия АН СССР. Механика твердого тела. – 1982. – № 2. – С. 144–154.

16. **Бондаренко, В. М.** Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона / В. М. Бондаренко. – Харьков : Изд-во Харьк. ун-та, 1968. – 323 с.

17. **Васильев, П. И.** Нелинейные деформации ползучести бетона / П. И. Васильев // Известия ВНИИГ. – 1971. – Т. 95. – С. 59–69.

18. **Власов, В. З.** Избранные труды / В. З. Власов. – Москва : Изд-во АН СССР, 1962.

19. **Власов, В. З.** Тонкостенные пространственные системы / В. З. Власов. – Москва : Госстройиздат, 1958. – 502 с.

20. **Власов, В. З.** Принципы построения общей технической теории оболочек. Том II / В. З. Власов. – Москва : Изд. АН СССР, 1963. – 506 с.

21. **Варадан, Т. К.** Нелинейные свободные изгибные колебания тонкостенных круговых цилиндрических оболочек / Т. К. Варадан, Дж. Пратхап, Х. В. Рамани // *Аэрокосмическая техника*. – 1990. – № 5. – С. 21–24.
22. **Вольмир, А. С.** Нелинейная динамика пластин и оболочек / А. С. Вольмир. – Москва : Наука, 1972. – 431 с.
23. **Вольмир, А. С.** Гибкие пластины и оболочки / А. С. Вольмир. – Москва : Наука, 1956. – 420 с.
24. **Виноградов, Г. Г.** Расчет строительных пространственных конструкций / Г. Г. Виноградов. – Москва : Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 264 с.
25. **Галимов, К. З.** Основы нелинейной теории тонких оболочек / К. З. Галимов. – Казань, 1975. – 328 с.
26. **Гаранин, Л. С.** Расчет пологих оболочек / Л. С. Гаранин. – Москва : Стройиздат, 1964.
27. **Гвоздев, А. А.** Расчет несущей способности конструкций по методу придельного равновесия / А. А. Гвоздев. – Москва : Госстройиздат, 1949. – 280 с.
28. **Гвоздев, А. А.** Теоретические и экспериментальные исследования работы железобетона с трещинами при плоском однородном и неоднородном напряжённом состоянии / А. А. Гвоздев, Н. И. Карпенко, С. М. Крылов // Совершенствование расчёта статически неопределимых железобетонных конструкций : сборник статей / НИИЖБ. – Москва, 1968. – С. 5–43.
29. **Гольденвейзер, А. Л.** Теория упругих тонких оболочек / А. Л. Гольденвейзер. – Москва : Госиздат, 1953. – 544 с.
30. **Григолюк, Э. И.** Неклассические теории колебаний пластин и оболочек / Э. И. Григолюк, И. Т. Селезнев // *МТДТ*. – Москва : ВИНТИ, 1973. – Т. 5. – С. 5–230.
31. **Гузь, А. Н.** Концентрация напряжений около отверстий в тонких оболочках (обзор) / А. Н. Гузь // *Прикладная механика*. – 1969. – Т. 5. – Вып. 3. – С. 1–17.

32. **Даревский, В. М.** Свободные колебания цилиндрической оболочки с сосредоточенной массой / В. М. Даревский, И. Л. Шарин. – Москва : Наука, 1966. – С. 350–354.

33. **Дырдина, Е. В.** Расчет многослойных пологих оболочек с учетом поперечных сдвигов и несовершенного контакта слоев : дис. ... канд. техн. наук / Е.В. Дырдина. – ЛИСИ. Л, 1991. – 154 с.

34. **Дышко, А. П.** Динамика оболочек вращения с присоединенными массами / А. П. Дышко, И. Д. Павленко // Актуальные проблемы механики деформируемых сред. – Днепропетровск : Изд-во ДГУ. – 1979. – С. 108–112.

35. **Дехтярь, А. С.** Несущая способность тонкостенных конструкций / А. С. Дехтярь, О. А. Рассказов. – Киев : Будивельник, 1990. – 152 с.

36. **Добрышкин, А. Ю.** Расчет частоты ВЧКК-2015 / А. Ю. Добрышкин, О. Е. Сысоев, И. Р. Мишина, Я. Ю. Григорьев, А. Л. Григорьева // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2016619086. Заявка 2016616226 от 15.06.2016. Приоритет от 12.08.2016.

37. **Добрышкин, А. Ю.** Определение состояния конструкций, расчет оболочек, строительных материалов «ОСКРОСМ2017» / А. Ю. Добрышкин, О. Е. Сысоев, Сит Ньянг Нейн, К. К. Кахоров // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2017613622. Заявка 2016662970 от 28.11.2016. Приоритет от 22.03.2017.

38. **Сысоев, О. Е.** Влияние присоединенной массы на вынужденные колебания разомкнутых оболочек / О. Е. Сысоев, А. Ю. Добрышкин, С. Н. Нейн // Ученые записки КНАГТУ. – 2016. – № 3.

39. **Сысоев, О. Е.** 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.

40. **Забегаев, А. В.** Расчёт железобетонных оболочек и плит на ударные воздействия / А. В. Забегаев // Простран. конструкции здания и сооружения. – Москва : ЦНИИСК, НИИЖБ. – Вып. 7. – С. 15–23.

41. **Заруцкий, В. А.** Вынужденные колебания продольно подкрепленной оболочки, несущей локально присоединенную массу / В. А. Заруцкий // Прикладная механика. – 1982. – 18, № 1. – С. 50–56.
42. **Кабанов, В. В.** Устойчивость неоднородных цилиндрических оболочек / В. В. Кабанов. – Москва : Машиностроение, 1982. – 253 с.
43. **Качанов, Л. М.** Теория ползучести / Л. М. Качанов. – Москва : Физматгиз, 1960. – 455 с.
44. **Кантор, Б. Я.** Обзор теории оболочек, подкрепленных ребрами с 1972-80 г. / Б. Я. Кантор, С. И. Катарянов, В. В. Офий // Институт проблем машиностроения АН УССР. – 1982. – № 167. – 78 с.
45. **Каиров, А. С.** Определение собственных частот и форм свободных колебаний конических и цилиндрических оболочек вращения, несущих систему жестко присоединенных сосредоточенных масс / А. С. Каиров // Судостроение. – Киев – Одесса. – 1984. – Вып. 33. – Ч. 1. – С. 42–48.
46. **Кубенко, В. Д.** Нелинейное взаимодействие форм изгибных колебаний цилиндрических оболочек / В. Д. Кубенко, П. С. Ковальчук, П. С. Краснопольская – Киев : Наукова думка, 1984. – 220 с.
47. **Кубенко, В. Д.** Нелинейные колебания цилиндрических оболочек / В. Д. Кубенко, П. С. Ковальчук, Н. П. Подчасов. – Киев : Выща школа 1989. – 208 с.
48. **Козлов, С. В.** К вопросу об определении собственных частот и форм малых колебаний ортотропной цилиндрической оболочки с присоединенными массами / С. В. Козлов // Прикладная механика. – 1981. – 17, № 2. – С. 46–52.
49. **Клюев, Ю. П.** Собственные колебания оболочек вращения с сосредоточенными массами / Ю. П. Клюев, Е. В. Павлов // Тезисы докладов XI Всес. 11 конф. по теории оболочек и пластин. – Москва : Наука. – 1977. – С. 30.
50. **Корнишин, М. С.** Нелинейные задачи теории пластин и пологих оболочек и методы их решения / М. С. Корнишин. – Москва : Наука, 1964.
51. **Кононенко, В. О.** Свободные колебания ребристой цилиндрической оболочки с присоединенной массой / В. О. Кононенко, В. Г. Паламарчук, А. М. Носаченко // Прикладная механика. – 1977. – 13, № 1. – С. 40–46.

52. **Колкунов, Н. В.** Основы расчета упругих оболочек : учебное пособие / Н. В. Колкунов. – 3-е издание, переработанное и дополненное. – Москва : Высшая школа, 1987. – 256 с.

53. **Крылов, С. М.** Перераспределение усилий в статически неопределимых железобетонных конструкциях / С. М. Крылов. – Москва : Стройиздат, 1964. – 168 с.

54. **Крысько, В. А.** Колебания пологих прямоугольных в плане оболочек с присоединенными массами / В. А. Крысько, Б. И. Червоткин. – Рукопись представлена Саратовским политехн, институтом. Деп. в ВИНТИ 28.07.77, № 3128–77. – 1977. – 12 с.

55. **Кривошеев, Н. И.** К выводу сеточных уравнений изгиба пластин с отверстиями и пластин ступенчато-переменной жесткости / Н. И. Кривошеев, М. С. Корнишин // Известия вузов. Серия «Строительство и архитектура». – Новосибирск. – 1970. – № 8. – С. 50–54.

56. **Канторович, Л. В.** Один прямой метод приближенного решения задачи о минимуме двойного интеграла / Л. В. Канторович // Известия АНОМЕН. – № 5. – 1933.

57. **Краснопольский, Т. С.** Регулярная и хаотическая динамика систем с ограниченным возбуждением / Т. С. Краснопольский // М-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований. – 2008. – 280 с.

58. **Лейзерович, Г. С.** О нелинейных формах движения тонких круговых цилиндрических оболочек / Г. С. Лейзерович // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – Т. 42. – № 4. – С. 161–164.

59. **Лейзерович, Г. С.** Неочевидные особенности динамики круговых цилиндрических оболочек / Г. С. Лейзерович, Н. А. Тарануха // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2008. – № 2. – С. 96–105.

60. **Лейзерович, Г. С.** О влиянии малой присоединенной массы на колебания разнотолщинного кругового кольца / Г. С. Лейзерович, Н. Б.

Приходько, С. В. Серегин // Строительство и реконструкция. – 2013. – № 4. – С. 38–41.

61. **Лейзерович, Г. С.** О влиянии малой присоединенной массы на расщепление частотного спектра кругового кольца с начальными неправильностями / Г. С. Лейзерович, Н. Б. Приходько, С. В. Серёгин // Строительная механика и расчет сооружений. – 2013. – № 6. – С. 49–51.

62. **Лурье, А. И.** Статика тонкостенных упругих оболочек / А. И. Лурье. – Москва ; Ленинград : Гостехиздат, 1947. – 252 с.

63. **Лурье, А. И.** Общие уравнения оболочки, подкрепленной ребрами жесткости / А. И. Лурье. – Ленинград, 1948. – 28 с.

64. **Ляв, О. Э. Х.** Математическая теория упругости, ОНТИ, НКТИ СССР / О. Э. Х. Ляв. – Москва : ОНТИ, 1935. – 674 с.

65. **Лиходед, А. И.** Собственные колебания бочкообразных оболочек однородных с сосредоточенными массами / А. И. Лиходед, А. А. Малинин // Известия АН СССР. МТТ. – 1972. – № 3. – С. 167–170.

66. **Лукаш, П. А.** Расчет пологих оболочек и плит с учетом физической и геометрической нелинейности / П. А. Лукаш // Расчет конструкций, работающих в упругопластической стадии: Тр. ЦНИИСКА. – Москва. – 1961. – Вып. 7. – С. 268–320.

67. **Леонтьев, Н. Н.** Обобщенный вариант вариационного метода Власова Санторовича и его применение к решению двумерных задач теории пластин и оболочек / Н. Н. Леонтьев // Проблемы расчета пространственных конструкций / МИСИ. – Москва. – 1980. – Т. 2.

68. **Малинин, А. А.** Собственные колебания оболочек вращения переменной толщины с присоединенными массами / А. А. Малинин // Прикладная механика. – 1973. – 9, № 3. – С. 56–61.

69. **Маневич, А. И.** Устойчивость и оптимальное проектирование подкрепленных оболочек / А. И. Маневич. – Киев ; Донецк : Высшая школа, 1979. – 152 с.

70. Методические рекомендации по расчету сборных железобетонных волнистых покрытий / А. А. Цейтлин, В. И. Колчунов. – Киев : НИИСК Госстроя СССР, 1975. – 50 с.

71. **Михлин, С. Г.** Вариационные методы в математической физике / С. Г. Михлин. – Москва, 1957. – 440 с.

72. **Муштари, Х. М.** Теория упругих оболочек / Х. М. Муштари, А. Л. Гользенвейзер. – Москва : Гостехиздат, 1953. – 544 с.

73. **Муштари, Х. М.** Теория упругого равновесия пластин и оболочек с учётом начальных напряжений / Х. М. Муштари // Известия КФАН СССР. Серия Физ.-мат. и техн. наук. – 1950. – № 2. – С. 39–52.

74. Методические рекомендации по расчету сборных железобетонных волнистых покрытий / А. А. Цейтлин, В. И. Колчунов. – Киев : НИИСК Госстроя СССР, 1975. – 50 с.

75. **Новожилов, В. В.** Теория тонких оболочек / В. В. Новожилов. – Ленинград : Судпромгиз, 1951. – 344 с.

76. **Новичков, Ю. Н.** Распространение волн в слоистых цилиндрических оболочках / Ю. Н. Новичков // Известия АН СССР. Механика твердого тела. – 1973. – № 2. – С. 51–60.

77. **Немировский, Я. М.** Исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов с учетом работы растянутого бетона над серединой и пересмотр на этой основе теории расчета деформаций и раскрытия трещин / Я. М. Немировский // Прочность и жесткость ж/б-х конструкций. – Москва, 1968. – С. 47–54.

78. **Немчинов, Ю. И.** Расчет пространственных конструкций (метод конечных элементов) / Ю. И. Немчинов. – Киев : Будівельник, 1980.

79. **Образцов, И. Ф.** Строительная механика скошенных тонкостенных систем / И. Ф. Образцов, Г. Г. Онанов. – Москва : Машиностроение, 1973. – 659 с.

80. **Осыков, А. И.** Метод расчета железобетонных панелей-оболочек и складок с учетом трещинообразования: дисс. ... канд. техн. наук / А. И. Осыков. – Москва, 1985. – 175 с.

81. **Пастернак, П. Л.** Железобетонные конструкции / П. Л. Пастернак. – Москва : Стройиздат, 1952.
82. Постнов, В. А. Использование метода конечных элементов в расчете устойчивости подкрепленных оболочек / В. А. Постнов, В. С. Корнеев // Прикл. механика. – 1976. – 12, № 5. – С. 44–49.
83. **Папков, С. О.** Установившиеся вынужденные колебания призмы при заданных на границе смещениях / С. О. Папков // Акуст. вісн. – 2008. – 11, № 4. – С. 36–43.
84. **Пастернак, П. Л.** Практический расчет складок и цилиндрических оболочек с учетом изгибающих моментов / П. Л. Пастернак // Проект и стандарт. – 1932. – № 2. – С. 26–31.
85. **Преображенский, И. П.** Устойчивость и колебания пластинок и оболочек с отверстиями / И. П. Преображенский. – Москва : Машиностроение, 1981. – 191 с.
86. Патент на полезную модель (РОСПАТЕНТ) / С. В. Серёгин, О. Е. Сысоев Устройство для возбуждения механических колебаний / Патент на полезную модель № 151220. Заявка № 2014130510. Приоритет от 26.02.2015.
87. Патент на полезную модель (РОСПАТЕНТ) / О. Е. Сысоев, А. Ю. Добрышкин, Сит Ньянг Д. Г. Нейн, Колыхалов Устройство обследования состояния конструкций / Патент на изобретение № 2636789 от 28.11.2017. Заявка 2016141216. Приоритет от 16.10.2016.
88. **Работнов, Ю. Н.** Ползучесть элементов конструкций / Ю. Н. Работнов. – Москва : Наука, 1966. – 252 с.
89. **Рашевский, П. К.** Курс дифференциальной геометрии / П. К. Рашевский. – 4-е издание. – Москва : ГИТТЛ, 1956. – 420 с.
90. **Розовский, М. И.** Ползучесть и длительное разрушение материалов / М. И. Розовский // Журнал техн. физики. – 1951. – Т. XXI, № 11. – С. 1311–1318.
91. **Розин, Л. А.** Метод конечных элементов в применении к упругим системам / Л. А. Розин. – Москва : Стройиздат, 1977. – 129 с.

92. **Ржаницын, А. Р.** Предельное равновесие пластинок и оболочек / А. Р. Ржаницын. – Москва : Наука, 1983. – 258 с.
93. Руководства по проектированию железобетонных пространственных конструкций покрытий и перекрытий. – Москва : Стройиздат, 1979. – 421 с.
94. **Серёгин, С. В.** Динамика тонких цилиндрических оболочек с присоединенной массой / С. В. Серёгин. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2016. – 175 с. ISBN 978-5-7765-1250-6
95. **Серёгин, С. В.** Динамические характеристики тонкой круговой цилиндрической оболочки, несущей сосредоточенную массу / С. В. Серёгин, О. Е. Сысоев / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015611558, 2014 г.
96. **Серёгин, С. В.** Линейные колебания кольца с присоединенной массой / С. В. Серёгин, О. Е. Сысоев / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2014613923, 2014 г.
97. **Тарануха, Н. А.** Динамика неправильных оболочек / Н. А. Тарануха, Г. С. Лейзерович. – Москва : Дальнаука, 2005. – 423 с.
98. **Тарануха, Н. А.** Новые решения в динамике неправильных оболочек / Н. А. Тарануха, Г. С. Лейзерович. – Москва : Дальнаука, 2007. – 203 с
99. **Тимашенко, С. П.** Пластины и оболочки / С. П. Тимошенко. – Москва : ГИТТЛ, 1948. – 460 с.
100. **Тимашев, С. А.** Устойчивость подкрепленных оболочек / С. А. Тимашев. – Москва : Стройиздат, 1974. – 256 с.
101. **Темнов, В. Г.** Конструктивные системы в природе и строительной технике / В. Г. Темнов. – Ленинград : Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. – 256 с.
102. **Филипов, А. П.** Колебания деформируемых систем / А. П. Филипов. – Москва : Машиностроение, 1970.
103. **Хайдуков, Т. К.** Исследование работы железобетонных оболочек за пределом упругости / Т. К. Хайдуков // Тр. VI Всесоюзной конференции по теории пластин и оболочек. – П., 1975.

104. **Хайдуков, Т. К.** Экспериментально-теоретическое решение задач о несущей способности железобетонных оболочек // Пространственные конструкции зданий и сооружений. – Москва : Стройиздат, 1975. – Вып. 2. – С. 80–92.

105. **Чирас, А. А.** Методы линейного программирования при расчете упругопластических систем / А. А. Чирас. – Ленинград : Стройиздат, 1969. – 199 с.

106. **Чернышов, В. Н.** Расчет гибких ребристых пологих оболочек: автореф. дисс. канд. техн. наук / В. Н. Чернышов. – Новосибирск, 1980. – 19 с.

107. **Шугаев, В. В.** Несущая способность пологих железобетонных оболочек при локальной схеме разрушения с учетом влияния изменения геометрии: дисс. ... д-ра техн. наук / В. В. Шугаев. – Москва : НИИЖБ, 1979. – 464 с.

108. Aron, H. Das Gleichgewicht und die Bewegung einer unendlich dünnen beliebig gekrümmten elastischen Schale / H. Aron // Journ. für reine und angewandte Mathematik. Bd.78, 874. – P. 136-174.

109. Amabili, M. Nonlinear vibrations and stability of shells and plates / M. Amabili. – New York, USA. Cambridge university press, 2008. – 374 p.

110. Alijani, F. Non-linear vibrations of shells: a literature review from 2003 to 2013 / F. Alijani, M. Amabili // International journal of nonlinear mechanics 2014. – Pp. 233–257.

111. Boltzman L. Zur Theorie elastischen Nachwirkung. Wiener, Ber. 10. 1874

112. Chladni E. F. F. Die Akustik. – Leipzig: Breitkopf und Hartel, 1802. – 242 p.

113. Chladni E. F. F. Neue Beiträge zur Akustik. – Leipzig: Breitkopf und Hartel, 1817. – 90 p.

114. Codazzi, D. Sulle coordinate curvilinee d'una superficie dello spazio." Ann. math. pura applicata 2, 101–19, 1868–1869.

115. Donnell. H.J. Effect of imperfections on buckling of cylinders under external pressure. Appl.Mech. – 1956, 4. 569–575.1

116. Dischinger F. Untersuchungen über die Knicksicherheit, die elastische Formung und des Kriechen des Betons bei Bogenbrücken. Bauingenier. 1937. H ;3/34, 35/36, 39/40.

117. Huber M. G. Zur Theorie der Berührung fester elastischer Körper // *Annalen der Physik*. – 1904. – 4, № 1. – P. 153–163.

118. Huber M. G. Ogólna teoria płyt żelazo-betonowych i jej praktyczne zastosowanie do płyty prostokątnej podpartej wzdłuż całego obwodu // *Ibid.* – 1914. – 32, 11. – P. 129–132; № 12. – P. 141–144; № 13. – P. 153–155.

119. Kattimani S.C. Association among stress, hypocortisolism, systemic inflammation, and disease severity in chronic urticaria. *Ann Allergy Asthma Immunol* 2016; 116(4): 348.

120. Karman T., Tsien H.S. The buckling of thin cylindrical shells under axial compression. – *J. Aeronaut. Soc*, 1941, v.8, № 8.

121. Khalili, S.M.R. Free vibrations of laminated composite shells with uniformly distributed attached mass using higher order shell theory including stiffness effect / S. M. R. Khalili, S. Tafazoli, K. Malekzadeh Fard // *Journal of Sound and Vibration*. – 2011. – Vol. 330, Issue 26. – P. 6355–6371.

122. Lee T. H. Vibration of shallow spherical shells with concentrated mass / T. H. Lee // *J. Applied Mech. (Trans. ASME, Ser. E)*. – 1966. – Vol. 33. – № 4. – P. 938-939.

123. Lew R.S. Dynamic response of pressurized stiffened cylinders with attached concentrated masses / R. S. Lew, R. W. Jewell // *AIAA Symposium on structural Dynamics and Aero elasticity (American Institute of Aeronautics and Astronautics, New York)*. – 1965. – P. 316–328.

124. Love A.E.H. On the small free vibrations and deformation of thin elastic shell.- *Phil.Trans.Roy.Soc.* – Vol. – 1888. – № 19(A).

125. Marllon N.J. Dynamic stability of a thin cylindrical shell with top mass subjected to harmonic base-acceleration / N. J. Mallon // *International Journal of Solids and Structures*. – 2008. – 45 (6). – P. 1587–1613.

126. Marllon N.J. Dynamic stability of a base-excited thin orthotropic cylindrical shell with top mass: simulations and experiments / N. J. Mallon, R. H. B. Fey, H. Nijmeijer // *Journal of Sound and Vibration*. – 329. – 2010. – P. 3149–3170.

127. Mirsky I. Vibrations of orthotropic, thick, cylindrical shells / I. Mirsky // J. Acoustical Soc. Amer. 1964. Vol. 36. № 1. P. 41–51.

128. Nilsen A.H. Nonlinear analysis of reinforced concrete by the element method A C I J. – 1968. – 65. – № 9. – P. 757–766.

129. Reissner, E. Stationäre, axialsymmetrische, durch eine schüttelnde Masse erregte Schwingungen eines homogenen elastischen Halbraumes / E. Reissner // Ing. Arch. 1936. – V. 7. – № 6. – P. 381–396.

130. Soedel, W., 1993, Вибрации оболочек и пластин, Нью Йорк: Marcel Dekker Inc., (второе издание).

131. Valliappan S., Doolan T.F. Nonlinear stress analysis of Reinforced concrete. – Struct.Div., ASCE, April. – 1972. – V. 98. – № ST 4. – P. 885–898.

Приложение А

Свидетельство о регистрации программы на ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017613622

ОСКРОСМ2017

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «КнАГТУ») (RU)*

Авторы: *Добрышкин Артем Юрьевич (RU), Сысоев Олег Евгеньевич (RU), Нейн Сит Ньянг (MM), Кахоров Комилджон Кахорович (TJ)*

Заявка № 2016662970

Дата поступления 28 ноября 2016 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 22 марта 2017 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



Приложение Б

Патенты на изобретения

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(19) **RU**⁽¹¹⁾ **2 636 789**⁽¹³⁾ **C1**(51) МПК
G01N 29/00 (2006.01)**(12) ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

(21)(22) Заявка: 2016141216, 19.10.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
19.10.2016

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 19.10.2016

(45) Опубликовано: 28.11.2017 Бюл. № 34

Адрес для переписки:

681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина,
27, ФГБОУ ВО "КнАГТУ"

(72) Автор(ы):

Сысоев Олег Евгеньевич (RU),
Добрышкин Артем Юрьевич (RU),
Нейн Сит Наинг (RU),
Колыхалов Дмитрий Геннадьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Комсомольский-на-Амуре
государственный технический университет"
(ФГБОУ ВО "КнАГТУ") (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 125709 U1, 10.03.2013. RU
2391655 C2, 10.06.2010. RU 153908 U1,
10.08.2015. RU 2471161 C1, 27.12.2012. JP
2014134462 A, 24.07.2014. RO 122162 B1,
30.01.2009.**(54) УСТРОЙСТВО ОБСЛЕДОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ****(57) Формула изобретения**

Устройство комплексной безопасности эксплуатации конструкций, выполненное с возможностью крепления к металлической конструкции, включающее пьезоэлектрические датчики, усилители аналогового сигнала, устройство приема-передачи, подключенное к компьютеру, видеокамеры, подключенные к компьютеру, панель оператора со звуковым и световым сопровождением, отличающееся тем, что дополнительно содержит датчик температуры, акселерометры, находящиеся внутри корпуса и подключенные через усилители аналоговых сигналов и аналого-цифровой преобразователь к компьютеру, при этом пьезоэлектрические датчики и акселерометры, находящиеся внутри корпуса, соединены с усилителями аналоговых сигналов и аналого-цифровым преобразователем, а видеокамера, установленная в корпусе устройства, через аналого-цифровой преобразователь - с компьютером.

RU 2 636 789 C 1

RU 2 636 789 C 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 185398

УСТРОЙСТВО ВОЗБУЖДЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ
КОЛЕБАНИЙ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Комсомольский-на-Амуре государственный университет" (ФГБОУ ВО "КнАГУ") (RU)*

Авторы: *Сысоев Олег Евгеньевич (RU), Добрышкин Артем Юрьевич (RU), Нейн Сит Ньянг (RU), Кахоров Комилджон Кахорович (RU)*

Заявка № 2018108657

Приоритет полезной модели 20 апреля 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 04 декабря 2018 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 20 апреля 2027 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) RU (11)

185 398⁽¹³⁾ U1(51) МПК
B06B 1/16 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(12) ФОРМУЛА ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ(52) СПК
B06B 1/161 (2006.01)

(21)(22) Заявка: 2018108657, 20.04.2017

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
20.04.2017Дата регистрации:
04.12.2018

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 20.04.2017

(45) Опубликовано: 04.12.2018 Бюл. № 34

Адрес для переписки:

681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина,
27, ФГБОУ ВО "КнАГУ", отдел защиты
интеллектуальной собственности

(72) Автор(ы):

Сысоев Олег Евгеньевич (RU),
Добрышкин Артем Юрьевич (RU),
Нейн Сит Ньянг (RU),
Кахоров Комилджон Кахорович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Комсомольский-на-Амуре
государственный университет" (ФГБОУ ВО
"КнАГУ") (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 151220 U1, 27.03.2015. RU
2310521 C1, 20.11.2007. RU 2275971 C1,
10.05.2006. EP 1867402 A1, 19.12.2007. WO
1997004291 A1, 06.02.1997.

RU 185398 U1

(54) УСТРОЙСТВО ВОЗБУЖДЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

(57) Формула полезной модели

Устройство возбуждения механических колебаний, выполненное с возможностью передачи сигнала на компьютер и состоящее из корпуса, выполненного в виде замкнутой круговой оболочки прямоугольного профиля, электропривода с функцией регулировки мощности, вала, выполненного с возможностью вращения, и стержня, на котором закреплены несколько грузов различного веса одновременно, датчика измерения колебаний, аналогово-цифрового преобразователя и монитора.

Приложение В

Акт о внедрении научных результатов



КОМИТЕТ ПО АРХИТЕКТУРЕ И СТРОИТЕЛЬСТВУ
ПРИ ПРАВИТЕЛЬСТВЕ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ «СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА»

734025 г. Душанбе, улица Хусейнзаде 36-А

Тел.: (992 37) 227-77-60, 227-77-61, Факс: (992 37) 227-77-60. E-mail: niisa.tj@mail.ru

от «10» 09 2021 года, № 336

АКТ

Об использовании результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Кахорова Комилджона Кахоровича

Результаты научно – исследовательской работы «ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РАЗОМКНУТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОБОЛОЧЕК» представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, нашли свое применение в деятельности ГУП "Научно-исследовательский институт "Строительство и архитектура"

Полученные в диссертационной работе теоретические и численные результаты способствовали улучшения качества некоторых технологических процессов, связанных с обеспечением динамической устойчивости несущих конструкции здания и сооружения, так как, наш регион находится в сейсмической зоне, динамическая устойчивость является актуальным вопросом, что способствует более точному подходу к оценке влияния малой присоединённой массы при решении технологических вопросов конструкторскими службами предприятия.

Директор

ГУП "Научно-исследовательский
институт "Строительство и архитектура"



Саломов Муродбек
Мухторович