На правах рукописи

Theysitt

Ньейн Ситт Найнг

# ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА СОБСТВЕН-НЫЕ ЧАСТОТЫ И ФОРМЫ КОЛЕБАНИЙ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕ-СКИХ ОБОЛОЧЕК

Специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре - 2019

Работа выполнена на кафедре «Механика и анализ конструкций и процессов» в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет».

Научный руководитель:	Сысоев Олег Евгеньевич, доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой «Строительство и архитектура», ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», г. Комсомольск-на-Амуре.					
Официальные оппоненты:	Козлов Владимир Анатольевич, доктор физмат. наук, доцент, зав. кафедрой «Теоретическая и прикладная механика» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж.					
	Любимова Ольга Николаевна, кандидат физмат. наук, до- цент, профессор кафедры «Механика и математическое моде- лирование» ФГБОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», г. Владивосток.					
Ведущая организация:	Институт физико-технических проблем Севера имени В.П. Ларионова СО РАН (г. Якутск)					

Защита состоится «14» февраля 2020 г. В 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д212.092.07 в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681013, г.Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, КнАГУ, ауд.201/3.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим выслать по адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета Email:diss@knastu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КнАГУ. Автореферат разослан « » декабря 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Григорьева Анна Леонидовна

#### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования:** Современные конструкции в машиностроении, авиации, ракетостроении, строительстве и т.п. часто имеют форму замкнутых тонкостенных цилиндрических оболочек. В процессе эксплуатации тонкостенные цилиндрические оболочки испытывают перепад температур более 200 °C. Такие воздействия на элементы конструкций вызывают изменение напряженно-деформированного состояния, а также влекут локальное изменение модуля упругости материала оболочки, что заметно сказывается на численных величинах колебаний тонкостенных оболочек. При расчетах конструкций этот фактор часто не принимается в расчет, что может привести к значительным деформациям, изменениям формы оболочки, возникновению резонансных явлений, и как следствие разрушению. Потеря устойчивости конструкций, выполненных в форме тонкостенных цилиндрических оболочек, часто вызвана её колебаниями, вынужденными и свободными. Поэтому конструкторы увеличивают коэффициенты запаса прочности при расчёте таких конструкции, что увеличивает материалоемкость и стоимость, а в некоторых случаях значительно осложняет процесс изготовления машин и сооружений.

Традиционное теоретическое решение задачи по расчету собственных колебаний оболочки с асимметричными начальными неправильностями показывают существенное изменение изгибного частотного спектра, даже при постоянной температуре, а локальное изменение температуры оболочки вызывает значительные изменения напряженнодеформируемого, что совершенно не учитывается в расчетах. Расхождение значений теоретических и экспериментальных частотных параметров увеличивается с изменением температуры и деформаций оболочки, что оказывает значительнее влияния на свободные колебания. Учет влияния деформаций конструкций, возникающих от воздействия градиента температур является очень актуальной задачей для конструкций, основу которых составляют тонкостенные цилиндрические оболочки.

## Степень разработанности темы:

Изучением колебаний тонкостенных оболочек занимались известные российские ученые, такие как: Борисов Ю.Б., Варадан Т.К., Власов Ю.Л., Галченко А.Л., Гольденвейзер А.Л., Григолюка Э.И., Даревский В.М., Доннелл Л. Г., Дышко А. П., Ивенсен Д.А., Кильдибеков И.Г., Ковальчук П.С., Кубенко В.Д., Лейзерович Г.С., Лиходед А.И., Малинин А. А., Муштари Х.М., Новожилов В.В., Тарануха Н.А., Тимошенко С. П., а также зарубежные исследователи: Дж. В. Стретт (Лорд Рэлей), Alijani F., Aron H., A.W. Leissa, Chen J.C., Chu Hu.Nan., Farshidianfar A., Love A.E.H., М. Amabili., S.C. Kattimani., Lee T.H., Lew R.S., Mallon N.J., Reissner E., W Soedel.. Вышеперечисленные исследователи описали движение оболочки общими уравнениями колебаний замкнутых цилиндрических оболочек. Также они исследовали влияние начальных неправильностей оболочек на их колебания, разработали математические модели колебаний тонкостенных оболочек.

Влияние изменения температур на собственные частоты и формы колебаний тонкостенных цилиндрических оболочек исследовали Е.Г. Янютин., П.В. Егоров, Э.С. Кузнецова, но проблемы воздействия неравномерного градиента температур на тонкостенные цилиндрические оболочки в рамках кинематической модели исследованы не достаточно полно. Нет экспериментально подтвержденных математических моделей учитывающих влияние изменения модуля упругости материала от воздействия температур на свободные колебания тонкостенных цилиндрических оболочек. Не проведены комплексные исследования воздействия неправильностей формы оболочки, возникающей от неравномерного градиента температур, на её свободные колебания. В частности в существующих моделях не учитывается начальная неправильность оболочек, возникающая от действия температур, при расчетах свободных колебаний тонкостенных оболочек.

Вышеперечисленное вызывает необходимость выявить зависимости между температурными воздействиями и частотными характеристиками колебаний оболочек, создать новую математическую модель расчета колебаний, что бы устранить отклонения между теоретическими и экспериментальными данными колебаний тонкостенных цилиндрических оболочек, имеющих начальные неправильности формы, вызванных воздействием градиента температур. На основе новой математической модели, требуется создать компьютерные программы и устройства позволяющие противодействовать резонансным явления в условиях неравномерного изменения температуры оболочки.

<u>Цель работы:</u> Определить влияние изменения температуры на собственные частоты колебаний тонкостенных цилиндрических оболочек при изменении её формы.

#### Задачи исследования:

1. Установить влияние изменения модуля Юнга материала, изменяющегося из-за неравномерного градиента температур, на свободные колебания тонкостенной цилиндрической оболочки.

2. Определить влияние изменение формы тонкостенной цилиндрической оболочки, из-за неравномерного градиента температур, на её свободные колебания.

3. Разработка нового подхода к построению математической модели для колебаний тонкостенной цилиндрической оболочки при локальном температурном воздействии.

4. Установление зависимостей частотных характеристик колебаний от способа закрепления тонкостенных цилиндрических оболочек и воздействии температур.

5. Уточнить математическую модель колебаний тонкостенных цилиндрических оболочек с начальной неправильностью формы, представленной деформацией, вызванной локальным изменением температуры.

6. Создать программное обеспечение, позволяющее рассчитать свободные колебания тонкостенных цилиндрических оболочек в режиме реального времени.

7. Разработать устройство, способное корректировать свободные колебания тонкостенных цилиндрических конструкций, при различных внешних воздействиях.

## Научная новизна результатов диссертации состоит:

- в установлении влияния воздействия неправильностей формы оболочки при изменении модуля Юнга материала, возникающих от равномерного и неравномерного градиента температур, на свободные колебания;

- в определении влияния закрепления тонкостенной цилиндрической оболочки на частотные характеристики колебаний при изменении температуры;

- в уточнении математической модели колебаний тонкостенных цилиндрических оболочек с начальной неправильностью формы, представленной деформациями, вызванными наличием локального изменения температуры.

Теоретическая значимость результатов: Новая математическая модель позволяет решать широкий класс задач динамики и статики для цилиндрических оболочек, находящихся под действием знакопеременных динамических нагрузок и температурного поля. Понимание механизма колебательного процесса оболочки, имеющей начальные неправильности, представленные локальными напряжениями, вызванными изменением градиента температуры оболочки, в процессе её нагрева, оказывает существенное влияние на расчеты конструкций. Уточненная математическая модель лучше отражает механизм колебания оболочечных конструкций, описанных с помощью математических зависимостей. Данный механизм позволяет другим исследователям более точно взглянуть на модель динамического прогиба оболочечных конструкций.

**Практическая значимость результатов:** По результатам работы появилась возможность в режиме реального времени рассчитывать свободные колебания тонкостенных цилиндрических оболочек, форма которых динамически изменяется при равномерном и неравномерном изменении температур. На основании полученных математических моделей разработано устройство корректирующее свободные колебания конструкций приставляющих тонкостенную цилиндрическую оболочку в режиме реального времени.

Результаты данного исследования получили одобрение и используются при рассмотрении задач, связанных с колебаниями цилиндрических оболочек, в строительном управлении ЗАО «УМР-4» г.Комсомольска-на-Амуре. Результаты исследования были внедрены в учебный процесс Комсомольского-на-Амуре государственного университета и используются в учебном процессе при чтении лекций: теоретическая механика для студентов строительного факультета.

<u>Методология и методы исследования:</u> Теоретические исследования выполнены в рамках вариационной формулировки задачи – вариационного принципа, а так же метода Бубнова-Галеркина. Для перехода от трехмерных соотношений теории упругости к двумерным уравнениям теории тонких оболочек используется гипотеза Кирхгофа – Лява. Численные исследования реализованы с помощью программы для ПК «ОСКРОСМ 2017», Экспериментальное исследование выполнено с использованием сертифицированных и апробированных устройств: спектрометра «NEX CG Rigaku», вихретокового пробника ZET 701, анализатора спектра и лицензионной программы «ZetLAB».

# Положения, выносимые на защиту:

1. Новая математическая модель колебаний тонкостенной цилиндрической оболочки, имеющей начальные неправильности, выраженные через локальные напряжения, вызванные местным изменением температур.

2. Результаты экспериментальных исследований влияния локального изменения внутренних напряжений на численных характеристики колебаний тонкостенной цилиндрической оболочки.

3. Результаты экспериментальных исследований влияния температуры материала, на модуль Юнга и другие прочностные характеристики материала.

4. Устройство, позволяющее отслеживать колебания оболочечных конструкций в режиме реального времени.

<u>Достоверность результатов работы:</u> Надежность и истинность описанного в данной работе механизма колебаний оболочки при различных параметрах температурного режима, подтверждена экспериментальными данными, с использованием сертифицированных и лицензированных устройств. Методика проведения эксперимента обсуждалась с другими специалистами, относящимися к области исследования, которые выразили ей высокую оценку. Полученные данные хорошо соотносятся с результатами исследований других авторов, а так же апробированы на различных конференциях.

<u>Апробация результатов работы:</u> Результаты работы докладывались на конференциях, 5 международные конференции и 4 региональные аспекты:

1. Архитектура, строительство, землеустройство и кадастры на Дальнем Востоке в XXI веке : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 18-19 апреля 2017 года.

2. Регионалные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 29-30 ноября 2016 года.

3. Регионалные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 29-30 ноября 2016 года.

4. Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: материалы V Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 29–30 нояб. 2017 г.

5. Региональные аспекты развития науки и образования в области A878 архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: материалы Междунар. науч.-практич. конф., Комсомольск-на-Амуре, 29 - 30 ноября 2018 г.

6. International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2017) 21–22 September 2017, Chelyabinsk, Russian Federation.

7. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern technologies (FarEastCon2018), October 2-4, 2018, Far Eastern Federal University (FEFU), Vladivostok (Asian-Pacific region), Russia. 8. 2018 7th International Conference on Transportation and Traffic Engineering (ICTTE 2018), Beijing, China on December 21-23, 2018.

9. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern technologies (FarEastCon2019), Far Eastern Federal University (FEFU), Vladivostok (Asian-Pacific region), Russia on October 1-4, 2019.

<u>Личный вклад</u>: Заключается в личной постановке задач исследования, формулировке положений и выводов, выносимых на защиту, и написании статей по теме исследования. Автор лично планировал эксперимент, выполнял все экспериментальные исследования по теме работы, анализировал и обобщал полученные результаты. Автор лично участвовал в разработке математических моделей для поставленных задач, выполнил, обработал и проанализировал все необходимые расчеты. Автор участвовал в проектировании систем, позволяющих проводить мониторинг тонкостенных цилиндрических конструкций.

**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 18 работах, в том числе: в 7 статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и 5 статьях РИНЦ; в одном журнале уровня цитирования Web Of Science; две статьи уровня Scopus. Получен один патент на изобретение и один патент на полезную модель, а также одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

<u>Структура и объем работы:</u> Диссертационное исследование состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка использованной литературы из 129-ти источников и 3 приложений. Диссертация изложена на 174 страницах текста формата A4, включая 69 рисунков, 9 таблиц. В приложении указаны свидетельства о регистрации одной программы, копия патента на изобретение, копия патента на полезную модель.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**В первой главе** рассмотрены выполненные ранее исследования и проведен анализ состояния исследований динамики тонкостенных цилиндрических оболочек, при температурных воздействиях; колебаний пластин, при температурных воздействиях; указаны основные проблемы, сформулированы цель и задачи диссертации.

Колебаниями цилиндрических тонкостенных оболочек занимались многие российские исследователи: Борисов Ю.Б., Варадан Т.К., Власов Ю.Л., Галченко А.Л., Гольденвейзер А.Л., Григолюка Э.И., Даревский В.М., Доннелл Л. Г., Дышко А. П., Ивенсен Д.А., Кильдибеков И.Г., Ковальчук П.С.,Кубенко В.Д., Лейзерович Г.С., Лиходед А.И., Малинин А. А., Муштари Х.М., Новожилов В.В., Тарануха Н.А., Тимошенко.,С. П.,а также иностранные исследователи: Дж. В. Стретт (Лорд Рэлей), Alijani F., Aron H., A.W. Leissa., ChenJ.C., Chu Hu.Nan., Farshidianfar A., Love A.E.H., M.Amabili., S.C. Kattimani., Lee T.H., Lew R.S., Mallon N.J., Reissner E., W Soedel..

Традиционное теоретическое решение задачи о собственных колебаниях оболочки с асимметричными начальными неправильностями приводит к существенному изменению изгибного частотного спектра, при этом не учитывается влияние изменений напряжений, вызванных локальным изменением температуры оболочки. Расхождение значений теоретических и экспериментальных характеристик увеличивается с увеличением разности температур и деформации формы оболочки, что оказывает значительнее влияния на свободные колебания оболочки. Учет влияния деформаций конструкций, подверженных изменению от воздействия температур является очень актуальной задачей для конструкций, основу которых составляют тонкостенные цилиндрические оболочки. В современных конструкциях самолетов, ракет, зданий и сооружений часто используются тонкостенные цилиндрические оболочки в качестве основы конструкции. При эксплуатации в этих цилиндрических конструкциях часто возникают колебания с большими амплитудами, а так же изменение формы, связанные с изменением температурного поля. Аварии и внештатные ситуации во время эксплуатации оболочечных конструкций, при изменении температурного режима показывает необходимость дальнейших исследования в данной области, так как не точно определен временной момент наступления резонансных режимов колебаний конструкций, не определены параметры волнообразования оболочки и численные характеристик и полуволн. Полная точность и достоверность рассматриваемых процессов возможна только при проведении дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных исследований. Изложена программа исследования. Описан стенд позволяющий проводить экспериментальные исследования, необходимое для проведения экспериментальных исследований, экспериментальная установка, образцы, с помощью которых установлены количественные показатели колебаний тонкостенных цилиндрических оболочек при изменении температуры. Так же описаны результаты экспериментальных исследований.



Рисунок 1 – Экспериментальная установка при свободном закреплении образца.

Импульс с датчиков, усиливаясь на АЦП, проходит по линиям электропередач через цифровой преобразователь в персональный компьютер и обрабатывается через программный комплекс «ZETLAB».



Рисунок 2 - Блок схема экспериментального стенда при неравномерном нагреве свободно опёртой тонкостенной цилиндрический оболочки.



Рисунок 3 – Экспериментальная установка при жестком закреплении образца с одного торца.

Блок схема по проведению экспериментального исследования при жестком закреплении тонкостенной цилиндрический оболочки отражена на рисунке 4. Наличие двух датчиков позволяет выявить ошибки и неточности измерений при сравнении полученных результатов.





Блок-схема нагревания шарнирно-опертой оболочки отображены на рисунках 5 и 6.





Рисунок 5 – Схема температурного нагрева образца по варианту № 1.

Рисунок 6 – Схема температурного нагрева образца по варианту № 2.

Блок-схема нагревания жестко-закрепленной оболочки отображены на рисунках 7



Рисунок 7 – Схема температурного нагрева образца с одного торца по варианту № 3.



Рисунок 8 – Схема температурного нагрева образца с одного торца по варианту № 4.

В таблице 1 отображены планируемые характеристики проведение экспериментальных исследований и их количество.

X17											
		D=200мм				D=150мм					
T	ип за-	Шарнирное опи-		Жесткая заделка по		Шарнирное опи-		Жесткая заделка по			
крепления		рание		І-му торцу		рание		І-му торцу			
оболочек		L=360мм, $h=1$ мм		L=450 мм, $h=1$ мм		L=240 мм, h=1		L=440 мм, $h=1$ мм			
						ММ			I		
		При	При не-	При рав-	При не-	При	При не-	При	При не-		
Тип нагрева- ния		равно-	равно-	номер-	равно-	равно-	равно-	равно-	равно-		
		мерном	мерном	ном	мерном	мерном	мерном	мерном	мерном		
		нагреве	нагреве	нагреве	нагреве	нагреве	нагреве	нагреве	нагреве		
	-										
Частоты по температуре, $\Gamma_{\Pi}(\lambda)$	20°C	+	+	+	+	+	+	+	+		
	50°C	+	+	+	+	+	+	+	+		
	100°C	+	+	+	+	+	+	+	+		
	150°C	+	+	+	+	+	+	+	+		
				-							
	200°C	+	+	+	+	+	+	+	+		
									·		
	250°C	+	+	+	+	+	+	+	+		
		'		'	,			'	'		
	300°C	+	+	+	+	+	+	+	+		
		'		'	'			'	'		

Таблица 1 – Программа проведения экспериментальных исследований.

Разработанная методика проведения экспериментальных исследований, позволяет исследовать колебания тонкостенных цилиндрических оболочек при воздействии температур и различных способах закрепления образца.

В третьей главе рассмотрен механизм колебаний тонких оболочек, описанный в математическом виде. Отображены уравнения движения, зависимости и пределы применимости теории пологих оболочек. Уделено особое внимание новому подходу к построению изменяемой во времени модели тонкостенных цилиндрических оболочек, при температурных воздействиях.

Так как, частицы тела обычно препятствуют взаимным изменениям объема, то вследствие этого возникают температурные напряжения. Связи между напряжениями и деформациями представим в виде:

$$\sigma_{1} = \frac{E}{1 - v^{2}} [\varepsilon_{11} + v\varepsilon_{22} + \gamma(X_{1} + vX_{2})] - \frac{E\alpha_{t}}{1 - v}T;$$
  

$$\sigma_{2} = \frac{E}{1 - v^{2}} [\varepsilon_{22} + v\varepsilon_{11} + \gamma(X_{2} + vX_{1})] - \frac{E\alpha_{t}}{1 - v}T;$$
  

$$\sigma_{12} = \frac{E}{2(1 + v)} (\varepsilon_{12} + 2\gamma X_{12}),$$
(1)

где E – модуль упругости, v – коэффициент Пуассона,  $\alpha_t$  - коэффициент линейного расширения, T - температурное поле.

Количество тепла, полученное единицей объема тела в единицу времени, равно  $c \frac{\partial T}{\partial t}$ (с - удельная объемная теплоемкость тела). Это количество тепла следует приравнять теплу -  $div\vec{q}$  ( $\vec{q}$  –вектор плотности теплового потока), которое подводится к единице объема тела в единицу времени посредством теплопроводности. При наличии в теле источников тепла, выделяющих в единице объема в единицу времени количество тепла  $w_0$ , уравнение теплопроводности в условиях равенства нулю коэффициента связанности имеет вид  $div\vec{q} + w_0 = c \frac{\partial T}{\partial t}$ , но так как  $\vec{q} = -\lambda_q gradT$ , уравнение теплопроводности записываем в виде:

$$div(\lambda_q gradT) + w_0 = c \frac{\partial T}{\partial t}; \qquad (2)$$

где  $\lambda_q$ - коэффициент теплопроводности. Так как величины *с* и  $\lambda_q$  зависят от температуры, а, следовательно, от координат, то уравнение (2), вообще говоря, является нелинейным. Мы считаем эти величины постоянными, тогда уравнение теплопроводности принимает вид:

$$\nabla^2 T \frac{w_0}{\lambda_q} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}.$$
(3)

где  $a = \frac{\lambda_q}{c}$  – коэффициент температуропроводности, характеризующий теплоинерционные свойства тел. Если в теле отсутствуют источники тепла, уравнение теплопроводности переходит в уравнение:

$$\nabla^2 T = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}.$$
 (4)

Уравнения (3) и (4) описывают нестационарные температурные поля. Стационарному температурному полю отвечает уравнение Лапласа:

$$\nabla^2 T = 0. \tag{5}$$

Функции, удовлетворяющие уравнению Лапласа, называются гармоническимифункциями.

В теории теплопроводности в качестве основных граничных условий могут быть заданы:

1. Распределение температуры по поверхности тела:  $T(x_k, t) = f(x_k, t)$ , где  $x_k$  - точка на поверхности тела;  $f(x_k, t)$  заданная функция.

2. Плотность теплового потока через поверхность тела:  $q(x_k, t) = -\lambda_q \frac{\partial T(x_k, t)}{\partial n}$ , где п - внешняя нормаль к поверхности тела в точке  $x_k$ .

В основе вариационного подхода к задачам механики оболочек лежит общий принцип минимума полной энергии системы. Полная энергия оболочки W складывается из потенциальной энергии деформации  $\Pi$  и работы внешних поверхностных и контурных нагрузок A.

В соответствии с принципом возможных перемещений вариация полной энергии  $\delta W$  деформированной оболочки равна нулю в состоянии равновесия:

$$\delta W = \delta A + \delta \Pi = 0.$$

(6)

Элементарная работа внешних поверхностных и контурных нагрузок будет:

$$\delta' A = \iint_{\Omega} \left[ p_x \delta(u) + p_y \delta(v) + \left( q - \varepsilon \frac{2h\rho}{g} \frac{\partial w}{\partial t} \right) \delta(w) \right] ds.$$
(7)

Выражение для кинетической энергии оболочки без учета инерции вращения элемента примет вид:

$$K = \frac{1}{2} \iint_{\Omega} \frac{2h\rho}{g} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial t} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right] ds.$$
(8)

Для цилиндрической панели и сферической оболочки на прямоугольном плане  $x = a\overline{x}$ ,  $y = a\overline{y}$ ,  $k_x = \overline{k_x} \frac{2h}{b^2}$ ;  $k_y = \overline{k_y} \frac{2h}{b^2}$ ,  $q = \overline{q} \frac{E(2h)^4}{a^2b^2}$ ,  $p_x = \overline{p_x} \frac{E(2h)^3}{b^2}$ ,  $p_y = \overline{p_y} \frac{E(2h)^3}{a^2}$ ,  $\tau = \frac{ab}{2h} \sqrt{\frac{\rho}{Eg}}$ ,  $\lambda = \frac{a}{b}$ ,

где a,b – размеры оболочки в плане по x и y соответственно, где t - время,  $\varepsilon$  - коэффициент линейного трения, F - функция усилий, w - функция прогиба, h - толщина оболочки, v = 0.3 - коэффициент Пуассона, g -ускорение силы тяжести, E - модуль упругости,  $p_x(y,t) = p_x^0 \sin(\omega_p t), p_y(y,t) = p_y^0 \sin(\omega_p t)$  – продольная нагрузка,  $k_x$  и  $k_y$  - кривизна оболочки по x и y соответственно; $q(x,y,t) = q_0 \sin(\omega_p t)$  – поперечная нагрузка,  $T(x, y) = Csin(\pi y)sin(\pi x)$  - температурное поле, C - интенсивность температурного поля;  $p_x^0, p_y^0, q_0$  –амплитуды соответствующих нагрузок,  $\omega_p$  – частота колебаний.

Тогда в безразмерном виде уравнения движения элемента оболочки и совместности деформаций примут вид:

$$\frac{1}{12(1-\nu^2)} \left[ \nabla_{\lambda}^4 w + \nabla_{\lambda}^2 M_t \right] - L(w,F) - \nabla_k^2 F + \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \varepsilon \frac{\partial w}{\partial t} + \nabla_p^2 w - q(t) = 0;$$

$$\left\{ \nabla_{\lambda}^4 F + \frac{1}{2} L(w,w) + \nabla_k^2 w + \nabla_{\lambda}^2 N_t \right\} = 0;$$

$$\nabla_{\lambda}^4 = \frac{1}{12} \frac{\partial^4}{\partial t^4} + \lambda^2 \frac{\partial^4}{\partial t^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial t^2} , \quad \nabla_{\lambda}^2 = \lambda^{-1} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \lambda \frac{\partial^2}{\partial t^2} , \quad \nabla_{k}^2 = k_x \frac{\partial^2}{\partial t^2} + k_y \frac{\partial^2}{\partial t^2} , \quad \nabla_{k}^2 = k_x \frac{\partial^2}{\partial t^2} + k_y \frac{\partial^2}{\partial t^2} ,$$

где

$$f_{\lambda}e^{-1} v_{\lambda} = \frac{1}{\lambda^{2}} \frac{1}{\partial x^{4}} + \lambda^{-1} \frac{1}{\partial y^{4}} + 2 \frac{1}{\partial x^{2} \partial y^{2}}, \quad v_{\lambda} = \lambda^{-1} \frac{1}{\partial x^{2}} + \lambda \frac{1}{\partial y^{2}}, \quad v_{k} = k_{x} \frac{1}{\partial y^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}}, \quad v_{p} = k_{x} \frac{1}{\partial y^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}}, \quad v_{p} = k_{x} \frac{1}{\partial y^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}}, \quad v_{p} = k_{x} \frac{1}{\partial y^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}}, \quad v_{p} = k_{x} \frac{1}{\partial y^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}}, \quad v_{p} = k_{x} \frac{1}{\partial y^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}}, \quad v_{p} = k_{x} \frac{1}{\partial y^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}}, \quad v_{p} = k_{x} \frac{1}{\partial y^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}}, \quad v_{p} = k_{x} \frac{1}{\partial y^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}}, \quad v_{p} = k_{x} \frac{1}{\partial y^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}}, \quad v_{p} = k_{x} \frac{1}{\partial y^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}}, \quad v_{p} = k_{x} \frac{1}{\partial y^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}}, \quad v_{p} = k_{x} \frac{1}{\partial y^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}}, \quad v_{p} = k_{x} \frac{1}{\partial y^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}}, \quad v_{p} = k_{x} \frac{1}{\partial y^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}}, \quad v_{p} = k_{x} \frac{1}{\partial y^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}}, \quad v_{p} = k_{x} \frac{1}{\partial y^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}}, \quad v_{p} = k_{x} \frac{1}{\partial y^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}}, \quad v_{p} = k_{x} \frac{1}{\partial y^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}}, \quad v_{p} = k_{x} \frac{1}{\partial y^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}}, \quad v_{p} = k_{y} \frac{1}{\partial y^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}}, \quad v_{p} = k_{y} \frac{1}{\partial y^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}}, \quad v_{p} = k_{y} \frac{1}{\partial y^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial y^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2}} + k_{y} \frac{1}{\partial x^{2$$

 $\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}\right)^2$  – нелинейные операторы.

В качестве начальных условий мы берем распределение (в начальный момент времени *t* = 0) прогибов и их скоростей за счет заданного закона повышения температуры вида:

$$w\Big|_{t=0} = \varphi_1(x,y), \frac{\partial w}{\partial t}\Big|_{t=0} = \varphi_2(x,y), \\ \theta\Big|_{t=0} = \varphi_3(x,y,z).$$
(10)

Наиболее часто встречающиеся типы граничных условий при x = 0:

a) скользящая опора 
$$w = 0, \frac{\partial w}{\partial x} = 0, \varepsilon_{22} = 0, T_1 = 0.$$
 (11)

б) гибкие в тангенциальной плоскости и не растянутые (не демпфированные)

$$w = 0, M_1 = M_0(y), T_1 = 0, \varepsilon_{22} = 0.$$
 (12)  
с) свободная поддержка  $w = 0, M_1 = M_0(y), T_1 = 0, S = 0.$ 

Динамический анализ тонкой оболочки развивается путем принятия гармонического движения во времени как:

$$U^{e} = N_{i}^{u}(r,\theta,z) \exp(-i\omega t)$$
  

$$\Theta^{e} = N_{i}^{\theta}(r,\theta,z) \exp(-i\omega t),$$
(13)

Для цилиндрической оболочки:  $k_x = 0, p_y = 0$ .

Подставляя значения поперечных нагрузок в уравнение равновесия, получим:

$$Q_{1} = -D\left(\frac{\partial^{3}w}{\partial x^{3}} + v\frac{\partial^{3}w}{\partial x\partial y^{2}}\right) - \frac{E\alpha_{T}}{1 - v}\frac{\partial}{\partial x}\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \theta z dz - \frac{D(1 - v)}{2}\frac{\partial^{3}w}{\partial x\partial y} - \rho\frac{h^{3}}{12}\frac{\partial^{3}w}{\partial x\partial t^{2}}, \begin{pmatrix} \leftrightarrow \\ 1,2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \leftrightarrow \\ x,y \end{pmatrix};$$
(14)

При этом уравнения равновесия преобразуется:

$$-D\nabla^{4}w - \frac{E\alpha_{T}}{1-\nu}\nabla^{2}\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}}\theta zdz - \rho \frac{h^{3}}{12}\nabla^{2}\frac{\partial^{2}w}{\partial t^{2}} + k_{1}T_{1} + k_{2}T_{2} + \frac{\partial}{\partial x}\left(T_{1}\frac{\partial w}{\partial x} + S\frac{\partial w}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(S\frac{\partial w}{\partial x} + T_{2}\frac{\partial w}{\partial y}\right)q - \rho hT_{1}\frac{\partial^{2}w}{\partial t^{2}} = 0.$$
(15)

$$\frac{1}{Eh}\left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} - v\frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} - v\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}\right) + \frac{\alpha_T}{h}\nabla^2 \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \theta dz - \frac{2(1+v)}{Eh}\frac{\partial^2 S}{\partial y \partial x} = -\frac{1}{2}L(w,w) - \nabla_k^2 w dx$$

В случае отсутствия *p*<sub>1</sub> и *p*<sub>2</sub> получается следующая система уравнений, управляющая движением тонкой пологой оболочки в тепловом поле:

$$\frac{1}{Eh}\nabla^4 F + \frac{\alpha_T}{h}\nabla^2 \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \theta dz = -\frac{1}{2}L(w,w) - \nabla_k^2 w;$$

$$D\nabla^{4}F + \frac{E\alpha_{T}}{1-\nu}\nabla^{2}\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}}\theta zdz + \rho\frac{h^{3}}{12}\nabla^{2}\frac{\partial^{2}}{\partial t^{2}} = q - \rho h\frac{\partial^{2}w}{\partial t^{2}} + L(w,F) + \nabla_{k}^{2}F;$$

$$C_{\varepsilon}\frac{\partial\theta}{\partial t} - \lambda_{q}\left(\frac{\partial\theta}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2}\theta}{\partial y^{2}} + \frac{\partial^{2}\theta}{\partial z^{2}}\right) = -\frac{E\alpha_{T}T_{0}}{1-2\nu}\frac{\partial}{\partial t}\left(e_{11} + e_{22} + e_{33}\right) + W_{0}; \quad (16)$$

$$= \nabla^{2}\nabla^{2} - \chi_{JBOCHHDIJ} JBYMEPHDIJ OUEPATOP JAUJACA M$$

где ∇<sup>4</sup> = ный двумерный оператор лапласа, п $L(\theta, \theta) = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2};$ 

представляет известный нелинейный оператор.

Перемещения и деформации оболочек при равномерном нагреве;

$$T_{1} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_{11} dz = \frac{E}{1-v^{2}} (\varepsilon_{11} + v\varepsilon_{22}) - \frac{E\alpha_{T}}{1-v} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \theta dz = \frac{Eh}{1-v^{2}} (\varepsilon_{11} + v\varepsilon_{22} - \alpha_{T} (1+v)N_{T}), \begin{pmatrix} \leftrightarrow \\ x, y \end{pmatrix};$$

$$S = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_{12} dz = \frac{E}{2(1-v)} \varepsilon_{12}; \qquad (17)$$

где  $N_{\rm T} = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \theta dz$  сила изменяющая форму оболочки.

На основании выведенных уравнений, получены численные результаты колебаний цилиндрических тонкостенных оболочек, при различных изменениях числа полуволн (n), и на графиках (Рис. 9) видно, что наименьшие частоты колебаний соответствуют числу полуволн n=2..4 .



Рисунок 9 - Зависимость частоты колебаний от числа полуволн оболочки из стали Х17.

На рисунке 10 показаны численные результаты колебаний цилиндрических тонкостенных оболочек, полученные путем решения задач колебаний оболочек, при различных вариациях параметра волнообразования на основе новой математической модели. При уменьшении параметра волнообразования количество полуволн увеличивается.



Рисунок 10 - Зависимость параметров волнообразования от числа полуволн оболочки из стали X17.

На рисунке 11 показаны численные результаты колебаний цилиндрических тонкостенных оболочек, полученные путем решения задач колебаний оболочек, при различных вариациях параметра волнообразования и исследуемой частоты. Первоначально, при увеличении параметра волнообразования частота уменьшается, а при значении є более 0,5 частота колебаний оболочки увеличивается.



стали Х17.

На рисунках 12 и 13 показана зависимость собственной частоты колебаний оболочки из стали X17 Ø150 мм и Ø200 мм от температуры. Различие результатов, полученных на основе традиционной математической модели и экспериментальных исследований при температуре 250 °C составляет более 5%, и увеличивается с увеличением температуры. По этой причине традиционную математическую модель для расчетов использовать не следует. Показано, что при шарнирном и жестком закреплении оболочки частотные характеристики, полученные при экспериментальных и теоретических исследованиях, на основе новой математической модели в диапазоне температур от 20 до 300 °C имеют расхождение не более 5%. Ошибка вычисления возрастает с увеличением температуры локальной зоны оболочки.



Рисунок 12 - Зависимость первой частоты колебаний оболочки от температуры для стали X17 Ø150 мм.



Рисунок 13 - Зависимость первой частоты колебаний оболочки от температуры для стали X17 Ø200 мм.

На рисунке 14 показана зависимость первой частоты колебаний оболочки от температуры для алюминиевого сплава Д12. Различие результатов, полученных на основе традиционной математической модели и экспериментальных исследований при температуре 250 °C составляет более 5%, и увеличивается с увеличением температуры. По этой причине традиционную математическую модель для расчетов использовать не следует. Показано, что при шарнирном и жестком закреплении оболочки частотные характеристики, полученные при экспериментальных и теоретических исследованиях при температуре от 20 до 300 °C имеют расхождение не более 5%. Ошибка вычисления возрастает с увеличением температуры локальной зоны на оболочке.



Рисунок 14 - Зависимость первой частоты колебаний оболочки от температуры для алюминиевого сплава Д12.

Расхождение новой математической модели и экспериментальных исследований связано с увеличением величины разницы температуры. Исходя из предположений, полученных в результате интерполяции полученных зависимостей при измерении частоты колебаний при температуре от 300 °C и выше, уточненная математическая модель потеряет точность полученных результатов при температуре свыше 300 °C. Данные графики так же подтверждают осуществление поставленной цели и выполнение задач исследования, поставленных во введении данной работы.

В четвертой главе Проведенные в данной работе исследования колебаний конструкций дают основание создать многофункциональное устройство (патент на изобретение № 2636789 «Устройство обследования состояния конструкций»). Устройство обладает рядом функций практической значимости: мониторинг колебательных режимов конструкций; прогнозирование вхождения конструкций в состояние резонанса; запуск устройств компенсации колебаний для недопущения вхождения колебательных процессов в резонансный режим. Устройство комплексной безопасности эксплуатации конструкций кроме сведений о состоянии конструкции здания или сооружения на основе сигналов акустической эмиссии позволяет получать еще дополнительные сведения о состоянии объекта на основе его видео наблюдений и вести вибромониторинг. Устройство, крепящиеся к металлической конструкции, содержит пьезоэлектрические датчики, усилители аналогового сигнала, устройство приема-передачи, подключенное к компьютеру, панель оператора со звуковым и световым сопровождением, видеокамеры, подключенные к компьютеру. Дополнительно содержит акселерометры, усилители аналогового сигнала и аналогоцифровой преобразователь. При вхождении конструкции в резонанс происходит вывод аналоговых сигналов проблемной зоны на панель оператора, что в свою очередь дает возможность дополнительно регистрировать автоколебания конструкции и по частоте и амплитуде, контролировать их величину по отношению к расчетному, резонансному значению колебаний. В случае возникновения критического состояния в структуре материала, происходит вывод сигнала на панель оператора со звуковым и световым сопровождением для принятия решения об осмотре конструкции или эвакуации людей.



1 – пьезоэлектрические датчики; 2 – усилитель аналогового сигнала; 3 – устройство приёма-передачи; 4 – компьютер (переносной) ПЭВМ; 5 – программное обеспечение (ПО); 6 – панель оператора; 7 – видеокамера; 8 - аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 9 - программное обеспечение (ПО); 10 – акселерометр; 11 – усилитель аналогового сигнала; 12 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 13 - программное обеспечение (ПО); 14 – внешний корпус; 15 – датчик температуры; 16 – программное обеспечение (ПО), 17 – устройства возбуждения колебаний.

Рисунок 15 – Схема работы устройства.

Устройство возбуждения колебаний (17 рис. 15, схема работы рис. 16) позволяет генерировать механические колебания определенной амплитуды в противофазе для недопущения возникновения резонанса конструкции. Требуемым результатом является получение и фиксация устройством широкого спектра частот и амплитуд возбуждаемых колебаний при высокой стабильности и устойчивости работы, и возможности вывода величины амплитуды колебаний на монитор. Современные устройства аналогичной конструкции не позволяют возбуждать колебания и фиксировать амплитуду полученных колебаний одновременно. Зачастую теоретически невозможно точно определить величину колебаний устройства, а установка дополнительного оборудования отображения величины колебаний. Поэтому в устройство добавляется датчик измерения колебаний, аналоговоцифровой преобразователь, монитор отображения величины амплитуды колебаний.



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; 11компьютер.

Рисунок 16 – Схема устройства возбуждения колебаний.

Рисунок 17 отражает работу устройства комплексной безопасности и устройства возбуждения колебаний. При снижении количества полуволн системы и приближении числа к возможному резонансному значению устройство отследило момент снижения частоты и восстановило частоту колебаний оболочки до первоначальных значений. Работа устройства была совершена автономно без внешнего вмешательства. Рекомендуется использовать данное устройство при проектировании зданий, сооружений и других оболоченных систем.



Рисунок 17 – Частотные характеристики колебаний оболочки при наличии системы комплексной безопасности и устройства возбуждения колебаний конструкции.

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 колебаний конструкций. Устройство позволяет вести постоянный мониторинг и обеспечить безопасность эксплуатации оболочечных конструкции.

#### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработан и создан испытательный стенд для исследования свободных колебаний тонкостенных цилиндрических оболочек, позволяющий экспериментально на небольших моделях с высокой достоверностью оценить воздействия температурных деформаций на свободные колебания. Стенд позволяет учитывать влияние температурного режима на свободные колебания оболочек.

2. Разработана методика и программа проведения экспериментальных исследований, колебаний тонкостенных цилиндрических оболочек при измерении градиента температур.

3. Получены численные характеристики колебаний тонкостенной цилиндрической оболочки при изменении температуры и различных условиях закрепления испытательных образцов.

4. Изучены экспериментальные данные частотных спектров колебаний тонкостенных цилиндрических оболочек при различных температурах.

5. Получены экспериментальные зависимости влияния температуры на изменение модуля Юнга материала.

6. Разработано и зарегистрированное в Роспатенте РФ программное обеспечение [49] позволяющее вести обработку экспериментальных данных в режиме реального времени и вычислять параметры колебаний тонкостенных цилиндрических оболочек, при высокой температуре.

7. Разработана математическая модель колебаний цилиндрической оболочки при температурном воздействии на основе вариационной формулировки задачи.

8. Экспериментально подтверждена разработанная математическая модель колебаний оболочки при локальном температурном воздействии.

9. Установлено влияние изменения модуля Юнга на колебания тонкостенной цилиндрической оболочки при изменении температурного режима.

10. Получены зависимости частоты колебаний оболочки от числа полуволн при изменении способа закрепления оболочки, и её диаметра.

11. Выявлены зависимости параметров волнообразования в продольном и радиальном направлениях, в зависимости от способа закрепление оболочки.

12. Разработано «Устройство обследования состояния конструкций», учитывающее при мониторинге конструкций из тонкостенных оболочек влияние формы оболочки и начальных неправильностей на частотные характеристики и колебания конструкций, а также позволяющая корректировать свободные колебания оболочек и обеспечить безопасность эксплуатации оболочечных конструкции.

#### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ:

## Основные положения и научные результаты диссертации опубликованы в следующих журналах, уровня цитирования web of science и Scopus:

1. Nyein Sitt Naing. Non-linear Oscillations of Elastic Curved Plate Carried to the Associated Masses System / Sysoev O.E., Dobryshkin A.Yu., Naing N. S. International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2017) 21–22 September 2017, Chelyabinsk, Russian Federation. IOP Science journal: Materials Science and Engineering, volume-262 (2017) 012055, doi:10.1088/1757-899X/262/1/012055.

2. Nyein Sitt Naing. Investigation to the location influence of the unified mass on the formed vibrations of a thin containing extended shell / Sysoev Oleg. Ye., Dobryshkin Artem.Yu.,

Naing N.S.. Materials Science Forum (2019), Volume - 945, Page 885-892, 8 p; DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.945.885, Database: Applied Science & Technology Source. Academic Journal of Indiana University–Purdue University Indianapolis (IUPUI) Libraries.

3. Nyein Sitt Naing. Investigation of Free Vibrations of Opened Shells from Alloy d19: Assistance of The Associated Mass System // Sysoev Oleg. Ye., Dobryshkin Artem.Yu., Naing N.S., Sysoyev Yevgeny. O.. 2018 7th International Conference on Transportation and Traffic Engineering (ICTTE 2018), Beijing, China on December 21-23, 2018. ISBN: 978-14503-604-5, Page 327-331.

# - рекомендованных ВАК для публикации научных результатов кандидатских диссертаций:

4. Нейн С.Н. Влияние присоединенной массы на вынужденные колебания разомкнутых оболочек / Сысоев О.Е., Добрышкин А.Ю., Нейн С.Н. Ученые записки КнАГТУ-2016.- № 3, с 110-116.

5. Нейн С.Н. Современные испытательные стенды для бесконтактного исследования свободных колебаний замкнутых и разомкнутых цилиндрических оболочек / Сысоев О.Е., Добрышкин А.Ю., Нейн С.Н., Кохоров К.К. Ученые записки КнАГТУ-2017.- № 1, с 110-118.

6. Нейн С.Н. Влияние присоединенной массы и температурного сдвига на собственные колебания тонких пластин (мембран) / Сысоев О.Е., Добрышкин А.Ю., Нейн С.Н.Ученые записки КнАГТУ-2017.- № 2, с 105-111.

7. Нейн С.Н. Влияние величины присоединенной массы на вынужденные колебания разомкнутых оболочек из алюминиевого сплава д19 / Сысоев О.Е., Добрышкин А.Ю., Нейн С.Н. Ученые записки КнАГТУ-2017.- № 4, с 100-106.

8. Нейн С.Н. Аналитическое и экспериментальное исследование свободных колебаний разомкнутых оболочек из сплава Д19, несущих систему присоединенных масс / Сысоев О.Е., Добрышкин А.Ю., Нейн Сит Наинг // Труды МАИ. Выпуск № 98, 2018 г, с 41-57.

9. Нейн С.Н. Исследование собственных колебаний и напряженнодеформированного состояния замкнутого кольца при местном нагреве/ Сысоев О.Е., Добрышкин А.Ю., Нейн С.Н. // Ученые записки КнАГТУ-2018.-№ 1,с 34-38.

10. Нейн С.Н. Экспериментальные исследования влияния мест присоединения малой массы на колебания тонкостенной разомкнутой цилиндрической оболочки / Сысоев О.Е., Добрышкин А.Ю., Нейн С.Н., Кохоров К.К. //Ученые записки КнАГТУ-2018.- № 2, с 42-50.

## - в 1-ом свидетельстве о регистрации программ:

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

# - в 1-м свидетельстве о регистрации патента на полензную модель:

12. Патент на полезную модель № 185398 (РОСПАТЕНТ) / Сысоев О.Е., Добрышкин А.Ю., Нейн С.Н., Кохоров К.К., Устройство возбуждения механических колебаний. заявл. № 2018108657 зарег. от 04.11.2019г. ; приоритет от 20.04.2017. – 1с.

# - в 1-м патенте на изобретение:

13. Патент на изобретение № 2636789 (РОСПАТЕНТ) / Сысоев О.Е., Добрышкин А.Ю., Нейн С.Н., Колыхалов Д.Г., Устройство обследования состояния конструкций. заявл. № 2016141216 зарег. от 28.11.2017г. ; приоритет от 19.10.2016. – 5 с.

# - а также в других изданиях:

14. Нейн С.Н. Вынужденные колебания тонкой изогнутой пластины несущей малую присоединенную массу / Сысоев О.Е., Добрышкин А.Ю., Нейн С.Н.. Архитектура, строительство, землеустройство и кадастры на Дальнем Востоке в XXI веке : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 18-19 апреля 2017 года. / редкол. :О. Е. Сысоев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО«КнАГТУ», 2017. – 397 с. ISBN 978-5-7765-1269-8.

15. Нейн С.Н. Влияние температурного воздействия на изменениеформы тонкостенной цилиндрической оболочки / Нейн С.Н., А.Ю. Добрышкин, К.К.Кахоров. Регионалные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 29-30 ноября 2016 года. / редкол. :О. Е. Сысоев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2016. – 52 с.

16. Нейн С.Н. О колебаниях тонких изогнутых пластин и разомкнутых цилиндрических оболочек, несущих систему присоединенных масс / Нейн С.Н., А.Ю. Добрышкин,К.К.Кахоров.. Регионалные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 29-30 ноября 2016 года. / редкол. :О. Е. Сысоев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2016. – 48с.

17. Нейн С.Н. Исследование собственных колебаний замкнутого кольца при местном нагреве/ Нейн С.Н., Т. А. Стасевич.. Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: материалы V Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 29–30 нояб. 2017 г. : в 2 ч. / редкол. : О. Е. Сысоев(отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2018. –Ч. 2. – 546 с. ISBN 978-5-7765-1375-6 (Ч. 2)

18. Нейн С.Н. Исследование свободных колебаний элементов тонкостенных цилиндрических оболочек из сплава х17, при повышенных температурах/ О. Е. Сысоев., Нейн С.Н.. Региональные аспекты развития науки и образования в области А878 архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: материалы Междунар. науч.-практич. конф., Комсомольск-на-Амуре, 29 - 30 ноября 2018 г. / редкол.: О.Е. Сысоев (отв. ред.) [и др.]. - Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО « КнАГУ», 2019. – 574 с.

Ньейн Ситт Найнг

# ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА СОБСТВЕН-НЫЕ ЧАСТОТЫ И ФОРМЫ КОЛЕБАНИЙ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕ-СКИХ ОБОЛОЧЕК

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 13.12.2019. Формат 60 ´ 84 1/16. Бумага 65 г/м2. Ризограф ЕZ 570Е. Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд. л. 1,3. Тираж 100 экз. Заказ 29955.

Полиграфическая лаборатория Федерального государственного бюджетного Образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» 681013, Комсомольский-на-Амуре, пр. Ленина, 27.