

На правах рукописи



ГОНИК ЕКАТЕРИНА ГРИГОРЬЕВНА

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗГИБА И
УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ВЫПУЧИВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С СЫПУЧИМ НАПОЛНИТЕЛЕМ**

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном
образовательном учреждении высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского»
(НИИМ Нижегородского университета)

**Научный
руководитель:**

Кибец Александр Иванович, доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:**

Шклярчук Федор Николаевич, Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, Институт прикладной механики РАН, главный научный сотрудник отдела механики адаптивных композиционных материалов

Каюмов Рашид Абдулхакович, доктор физико-математических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, профессор кафедры механики

Ведущая организация:

Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

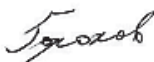
Защита состоится "26" декабря 2019 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.09 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, Н.Новгород, проспект Гагарина, 23, корпус 6.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте diss.unn.ru/986

Автореферат разослан "20" ноября 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Горохов Василий Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Транспортировка сырья и готовой сыпучей продукции (в основном – цемента и муки) в упаковке обходится достаточно дорого. Поэтому чаще промышленные, торговые и другие предприятия используют более экономичный способ – перевозку автоцистернами. Среди автоцистерн в отдельную группу можно выделить **полуприцепы – цистерны подъемные**, служащие для бестарной транспортировки мелкодисперсных сыпучих грузов. Данный вид полуприцепов имеет форму тонкостенной цилиндрической оболочки и отличается большим объемом перевозимого груза. Выгрузка продукта в подъемных полуприцепах выполняется через разгрузочное устройство, расположенное в задней части цистерны, путем ее наклона с помощью выдвижения штока на определенный угол. В процессе наклона возникает возможность потери устойчивости цистерны. В связи с этим одной из ключевых задач при проектировании цистерн является рациональный выбор геометрических параметров, обеспечивающий устойчивость конструкции при всех режимах эксплуатации. Высокая стоимость цистерн ограничивает экспериментальные исследования в этой области и требует дальнейшего развития и обоснования математических методов анализа, включая аналитические методы и компьютерное моделирование с применением современного методического и программного обеспечения. Таким образом, решаемая в диссертации научно-техническая задача является актуальной и востребованной.

Степень разработанности темы.

Изгиб и последующее упругопластическое выпучивание тонкостенных цилиндрических оболочек, заполненных сыпучим материалом, в настоящее время изучены недостаточно. Отсутствуют теоретические и экспериментальные данные о влиянии размеров оболочки, граничных условий, вида наполнителя и степени заполнения на форму ее выпучивания и критическую нагрузку. Мало исследована область применимости существующих математических моделей и методов решения рассматриваемого класса задач. Требуется развитие и обоснование эмпирической формулы, позволяющей без применения компьютерного моделирования оценить влияние наполнителя на потерю устойчивости цилиндрической оболочки.

Цели и задачи.

Целью диссертационной работы является экспериментальное и теоретическое исследование изгиба и упругопластического выпучивания тонкостенных цилиндрических оболочек с сыпучим наполнителем.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Создание экспериментальных установок и проведение испытаний устойчивости тонкостенных цилиндрических оболочек с сыпучим наполнителем при изгибе.
2. Разработка и обоснование эмпирической формулы расчета критической нагрузки при изгибе тонкостенных цилиндрических оболочек с сыпучим наполнителем.
3. Численное исследование с применением эмпирической формулы и вычислительного комплекса (ВК) «Динамика-3» упругопластического выпучивания тонкостенных цилиндрических оболочек с сыпучим наполнителем при изгибе.
4. Исследование факторов, влияющих на устойчивость при изгибе тонкостенных оболочек с сыпучим наполнителем.

5. Теоретический анализ упругопластического выпучивания полуприцепов – цистерн для транспортировки сыпучих материалов при изгибе.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Созданы экспериментальные установки исследования устойчивости тонкостенных цилиндрических оболочек при изгибе. Получены новые результаты экспериментального исследования процессов упругопластического выпучивания тонкостенных цилиндрических оболочек с сыпучим наполнителем при изгибе.
2. Разработана и обоснована на результатах, выполненных диссертантом вычислительных и натурных экспериментов эмпирическая формула расчета критической нагрузки тонкостенных цилиндрических оболочек с сыпучим наполнителем при изгибе.
3. С использованием разработанной формулы расчета критической нагрузки и вычислительного комплекса «Динамика-3», выполнены исследования факторов, влияющих на устойчивость пустых и заполненных сыпучим материалом тонкостенных цилиндрических оболочек при изгибе.
4. Получены новые результаты теоретического исследования устойчивости тонкостенных цилиндрических полуприцепов – цистерн для транспортировки мелко дисперсионных материалов при изгибе.

Теоретическая значимость работы заключается в:

- а) разработке и обосновании эмпирической формулы расчета критической нагрузки при изгибе тонкостенных цилиндрических оболочек с сыпучим наполнителем;
- б) теоретических и экспериментальных результатах исследования факторов, влияющих на устойчивость рассматриваемых оболочек, и точности определения критических нагрузок;
- в) получении новых результатов теоретического анализа устойчивости цистерн для транспортировки сыпучих материалов при изгибе.

Практическая значимость работы состоит в следующем.

Вычислительная модель, основанная на применении ВК «Динамика-3», с учетом выработанной рекомендации нелинейной аппроксимации диаграммы деформирования конструкционного материала, позволяет значительно повысить точность теоретического исследования предельных состояний тонкостенных элементов конструкций. Ее применение повышает уровень обоснованности и безопасности проектируемых тонкостенных конструкций разного назначения. Разработанная эмпирическая формула оценки критической нагрузки позволяет с приемлемой точностью проводить экспресс анализ устойчивости на изгиб цилиндрических оболочек средней длины, заполненных сыпучим материалом. На основе применения ВК «Динамика-3» и разработанной формулы выполнена оценка устойчивости крупногабаритной емкости для автомобильной перевозки сыпучих материалов при ее подъеме в процессе разгрузки. Результаты проведенных исследований будут внедрены в расчетную практику ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель» по производству полуприцепов – цистерн.

Методология и методы исследования.

В диссертационной работе методология исследования основана на комплексном применении приближенных методов расчета, компьютерного моделирования и испытаний модельных образцов.

На защиту выносятся следующие положения:

1. экспериментальные установки исследования устойчивости при изгибе тонкостенных цилиндрических оболочек с сыпучим наполнителем;
2. эмпирическая формула расчета критической нагрузки при изгибе тонкостенных цилиндрических оболочек с сыпучим наполнителем;
3. результаты численного и экспериментального исследования упругопластического выпучивания тонкостенных цилиндрических оболочек, заполненных сыпучим материалом при изгибе;
4. результаты анализа факторов, влияющих на упругопластическое выпучивание тонкостенных цилиндрических оболочек с сыпучим наполнителем при изгибе;
5. результаты анализа упругопластического выпучивания большегабаритных цистерн для транспортировки сыпучих материалов при изгибе.

Достоверность результатов.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается применением верифицированных методов исследований и подтверждается хорошим соответствием данных вычислительных и натурных экспериментов, полученных диссертантом.

Апробация результатов работы.

Результаты диссертационной работы докладывались на:

- X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Нижний Новгород, 2011 г.);
- XI молодежная научная школа-конференция Лобачевские чтения (Казань, 2012г.)
- XIX международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова. (Москва, Яропонец, 2013г.);
- XII молодежная научная школа-конференция. Лобачевские чтения (Казань, 2013г.);
- VIII всероссийская конференции по механике деформируемого твердого тела. (Чебоксары-2014г.);
- VIII Всероссийская (II Международная) конференция «Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции» НАСКР-2014 (Чебоксары, 2014г.);
- Всероссийская научная школа-конференция, посвященная 85-летию профессора Д.Д. Ивлева (Чебоксары, 2015г.);
- V международный научный семинар «Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы» (Москва, 2016г.);
- III Международная (IX Всероссийская) конференция «Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции» (Чебоксары: 2016г.);
- XXIII международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова. (Москва, Вятчи, 2017г.);
- XX Юбилейная Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным системам ВМСППС-2017 (Алушта, 2017г.);
- X Всероссийская конференция по механике деформируемого твердого тела (Самара, 2017г.);
- IV Международная (X Всероссийская) конференция «Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции» НАСКР-2018 (Чебоксары, 2018г.).

Публикации: Основные результаты диссертации опубликованы в 25 работах, в том числе 11 статей в журналах, рекомендуемых ВАК [1-11] и 3 статьи в журналах, индексируемых в международных базах данных Web of science и SCOPUS [1-3].

Личный вклад автора.

Разработка экспериментальных установок испытаний на изгиб тонкостенных оболочек, заполненных сыпучим материалом [5,7,18,19,21].

Разработка эмпирической формулы расчета критической нагрузки при изгибе тонкостенных цилиндрических цистерн для транспортировки сыпучих материалов [11,12].

Проведение натурных экспериментов [6,7,9,10,16,17,22–25] и численное моделирование [1,3,8,13,14,15,20] упругопластического деформирования, предельного состояния и закритического поведения оболочек вращения с сыпучим наполнителем.

Обработка и анализ результатов экспериментальных и численных исследований процессов упругопластического деформирования, потери устойчивости при изгибе, закритического поведения пустых и заполненных сыпучим материалом тонкостенных цилиндрических оболочек [1–25].

В совместных работах Кибецу А.И. принадлежит постановка задачи, общее руководство исследованиями и участие в анализе результатов, Баженову В.Г. участие в анализе результатов, Петрову М.В. помощь в разработке эмпирической формулы определения критической нагрузки, в проведении экспериментальных исследований и участие в анализе результатов, Артемьевой А.А., Шошину Д.В., Жесткову М.Н., Федоровой Т.Г., Фроловой И.А., Пфаненштиль Н.Г. помощь в проведении расчетов и экспериментов, Ивашкину И.Н. помощь в проведении экспериментальных исследований.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Основной печатный текст составляет 128 страниц. Для иллюстрации результатов расчетов и экспериментов в диссертации приведены 48 рисунков и 25 таблиц. Список цитируемой литературы (224 наименования) занимает 19 страниц.

Благодарности: Автор выражает благодарность Заслуженному деятелю науки РФ, д.ф.м.-н., проф. Баженову В.Г. и д.т.н., проф. Петрову М.В. за консультации в процессе выполнения работы.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» в рамках соглашения № 14.578.21.0246 (уникальный идентификатор RFMEFI57817X0246).

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы. Сформулированы основные направления исследования, формулируются основные цели и задачи диссертационной работы. Приведена практическая и теоретическая значимость работы.

В первой главе дается обзор методов и результатов экспериментальных и теоретических исследований устойчивости цилиндрических оболочек при квазистатическом изгибе.

Первые эксперименты для оценки устойчивости оболочек при действии внешнего давления были проведены в 1858 году W. Fairbairn. В 1908 году на осевое сжатие оболочки испытывали W.E. Lilly и A. Mallock. Во второй половине XX века появляется масса экспериментальных исследований, среди которых можно выделить работы В.Г. Выборнова, В.И. Моссаковского, А.С. Вольмира, М.В. Никулина, Б.В. Нерубайло, Ю.Г. Коноплева, М.А. Ильгамова, В.В. Кабанова, В.М. Даревского, А.В. Саченкова, М. Zeinoddini. Перечисленные авторы исследовали устойчивость тонких оболочек при осевом сжатии, при осевом сжатии в

комбинации с внутренним давлением, при действии поперечной силы, при поперечной нагрузке в комбинации с внутренним давлением, при внешнем давлении.

Первые работы по теоретическому исследованию устойчивости оболочек были опубликованы в начале XX века. Большой вклад в развитие теории оболочек сделали И.Г. Бубнов, В.З. Власов, К.З. Галимов, А.Л. Гольденвейзер, Х.М. Муштари, В.В.Новожилов, А.С. Вольмир, В.Г. Баженов, А. Ляв, С.П. Тимошенко и др. Применению численных методов решения задач к исследованию упругопластического деформирования и устойчивости цилиндрических оболочек посвящены работы Н.А. Абросимова, В.Г. Баженова, В.С. Гудрамовича, С.А. Капустина, В.Л. Якушева, А.С. Сахарова, А.А. Рябова, О.С. Zienkiewicz, T. Belytschko и др.

Изучением деформирования цилиндрических оболочек с наполнителем занималось сравнительно мало исследователей. К ним можно отнести А.С. Вольмира, М.А. Ильгамова, В.Г. Баженова, В.А. Иванова, Ф.Х. Сафиуллина, Р.М. Зарипова, А.З. Камалова, Ф.Н. Шклярчука, М.В. Петрова и Р.А. Каюмова, и др. Исследования по теории оболочек с наполнителем разделяются на две группы в зависимости от расчетной схемы. В первой группе наполнитель моделируется основанием типа Винклера или Пастернака, а во второй группе уравнениями теории упругости или вязкоупругости. Во второй группе можно выделить: а) определение напряженно-деформированного состояния конструкции, б) анализ ее устойчивости при статических нагрузках и в) анализ устойчивости при динамических нагрузках. Изгиб и последующее упругопластическое выпучивание тонкостенных цилиндрических оболочек, заполненных сыпучим материалом, в настоящее время изучены недостаточно.

Исходя из результатов анализа литературы, сформулированы основные направления исследований.

Во второй главе приводятся методики и результаты экспериментального анализа устойчивости заполненных сыпучим материалом замкнутых оболочек вращения при изгибе.

Для исследования устойчивости цилиндрических оболочек при изгибе был собран экспериментальный комплекс, состоящий из испытательного стенда, нагружающей установки, измерительных приборов, цифровой фотокамеры Casio Exilim Pro EX-F1, осветительного оборудования, персонального компьютера с программами для обработки полученных данных. Перемещения нагружаемых образцов замерялись индикаторами часового типа ИЧ-10 по ГОСТ 577-68. Изменения диаметров оболочки выполняли при помощи электронного штангенциркуля Matrix 31611 с погрешностью измерения 0,01 мм. Для измерения деформаций применяли тензорезисторы типа КФ5П1– 10–200 А–12, подключенные к измерителю деформаций цифровому ИДЦ-1.

Испытание оболочек на устойчивость проводили поэтапно. Вначале были испытаны пустые образцы, а затем с сыпучим наполнителем. Нагрузка увеличивалась пошагово до тех пор, пока образец не потеряет устойчивость. После каждого шага увеличения нагрузки замерялись показания индикаторов и тензорезисторов, диаметры оболочки. После завершения испытаний проводилась статистическая обработка полученных экспериментальных данных, после которой определялась среднестатистическая зависимость прогиба образца в характерных точках от прикладываемого усилия и величина критической нагрузки.

Проведено несколько серий экспериментов (рис.1): а) изгиб консольно закрепленного образца поперечной силой [1,6,10]; б) чистый изгиб консольно закрепленного образца [7], в) изгиб образца, опирающегося на шарнирные опоры [5]. Размеры образцов подбирались с

учетом условий физического и геометрического подобия с большегабаритными автоцистернами, изготавливаемых на заводе ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель». В качестве конструкционных материалов образцов были выбраны алюминиевые сплавы Д16Т, 3004 или его модификация – сплав 3104 в состоянии Н19. Диаграмма деформирования определялась на испытательной машине ZWICK в соответствии ГОСТ 1497-84. Исследуемые образцы проходили проверку на световом тестере на наличие несовершенств и отклонений от идеальной цилиндрической поверхности.

Для изгиба консольно закрепленной оболочки поперечной силой (рис.1а) на рис.2 приведен график зависимости критической нагрузки от степени заполнения оболочки порошком ПЖ-5. Результаты экспериментального исследования выпучивания оболочки с заполнителем на двух опорах (рис.1в) представлены на рисунке рис.3. в виде зависимости от нагрузки прогиба оболочки в центральном поперечном сечении. График (1) соответствует образцам без заполнителя, а график (2) – образцам, заполненным сыпучим материалом. Результаты экспериментальных исследований выпучивания консольно закрепленной оболочки при нагружении изгибающим моментом (рис.1б) с заполнением образцов на 30%, 60% и 90% сыпучим веществом приведены в таблице 1, где M_{cr} – среднеарифметические значения критического изгибающего момента:

Таблица 1

Заполнение образцов	пустые	30%	60%	90%
Значения M_{cr} , Н·м	15,1	14,8	15,0	15,2

Проведен анализ влияния геометрических параметров на устойчивость консольно закрепленной оболочки при изгибе поперечной силой [1,10]. Согласно полученным результатам выпучивание оболочки существенно зависит от ее геометрии. На коротких оболочках образуются вмятины на боковых поверхностях, направленные под углом к продольной оси (рис.4а). На длинных оболочках вмятины на боковых поверхностях отсутствуют (рис.4б).

Исследовано влияние степени загрузки и плотности сыпучего наполнителя на устойчивость консольно закрепленной цилиндрической оболочки при изгибе поперечной силой [9]. В таблице 2 представлены значения критических нагрузок в кН в зависимости от вида сыпучего материала и степени заполнения.

Таблица 2

Вид сыпучего материала	пустой образец	степень заполнения		
		30%	60%	90%
Речной песок	0,153	0,156	0,158	0,173
Железный порошок ПЖ-5		0,159	0,165	0,215
Медный порошок		0,165	0,18	0,219

По результатам проведенных экспериментальных исследований сделаны следующие выводы. До потери устойчивости образцы ведут себя упруго. После снятия нагрузки с образцов, потерявших устойчивость, их первоначальная форма не восстанавливается. На образце остаются локальные вмятины и пластические деформации. Потеря устойчивости образцов

происходит в области сжатия. Не зависимо от наличия или отсутствия наполнителя потеря устойчивости носит местный характер и сопровождается образованием ромбовидных вмятин в зоне максимальных сжимающих напряжений. Вмятины направлены к центру кривизны оболочки. В зоне потери устойчивости поперечное сечение образца по мере нагружения приобретает форму эллипса, большая ось которого направлена по горизонтали, а малая ось по вертикали. Сыпучий наполнитель препятствует этому процессу. Для длинных оболочек на закритической стадии деформирования реализуется «изгибная» форма с локальной вмятиной в зоне максимальных сжимающих продольных напряжений. Для коротких оболочек после достижения критической нагрузки сначала происходит выпучивание по «изгибной» форме, а затем реализуется «сдвиговая» форма выпучивания в зоне максимальных (по окружности) касательных напряжений. Влияние наполнителя на критическую нагрузку зависит от условий закрепления и нагружения, степени заполнения и плотности сыпучего материала. Чем больше плотность сыпучего заполнителя, тем больше критическая нагрузка. Зависимость критической нагрузки от степени заполнения носит нелинейный характер. При нагружении консольно закрепленной цилиндрической оболочки изгибающим моментом сыпучий материал практически не влияет на значение критической силы.

В третьей главе приводится определяющая система уравнений, конечно-элементная методика ее решения и результаты численного моделирования выпучивания цилиндрических оболочек с сыпучим наполнителем при изгибе.

Деформирование оболочки описывается в переменных Лагранжа с позиций механики сплошных сред в динамической постановке [1]. Наряду с общим базисом $X = [X_1 X_2 X_3]$ вводится местная (сопутствующая) система координат $x = [x_1 x_2 x_3]$ с направляющими косинусами n_{ij} :

$$x_i = n_{ij} X_j, i, j = \overline{1,3} \quad (1)$$

(по повторяющимся индексам ведется суммирование). Здесь x_3 - координата, отсчитываемая от срединной поверхности оболочки и нормальная к ней, x_1, x_2 - ортогональны к x_3 . Деформации поперечного сдвига предполагаются малыми, что позволяет считать местный базис ортогональным в течение всего процесса деформирования. Компоненты тензора скоростей деформаций в местном базисе $\dot{\varepsilon}_{ij}$ выражаются через компоненты $\dot{\varepsilon}_{ij}$ скорости деформаций в общем базисе

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = n_{im} n_{jk} \dot{\varepsilon}_{mk}, \quad (2)$$

которые определяются в метрике текущего состояния.

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = (\dot{U}_{i,j} + \dot{U}_{j,i})/2, \quad (i, j = \overline{1,3}) \quad X_i = X_i|_{t=0} + \int_0^t \dot{U}_i dt \quad (3)$$

В (3) U_i – перемещения в общей декартовой системе координат X , индекс после запятой означает частную производную по соответствующей пространственной переменной, точка над символом частную производную по времени t .

Уравнение движения выводится из баланса виртуальных мощностей:

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij} \delta \dot{\varepsilon}_{ij} dV + \int_{\Omega} \rho \dot{U}_i \delta \dot{U}_i dV = \int_{\Gamma_p} P_i \delta \dot{U}_i d\gamma, \quad (i, j = \overline{1,3}) \quad (4)$$

где σ_{ij} , — компоненты тензора напряжений Коши; ρ — плотность; P_i — распределенная нагрузка; Ω — исследуемая область; Γ_p — зона действия внешнего давления; $\delta\dot{\varepsilon}_{ij}$, $\delta\dot{U}_i$ — вариации $\dot{\varepsilon}_{ij}$, $\dot{U}_i$ (на поверхности с заданными кинематическими граничными условиями $\delta\dot{U}_i = 0$). Упругопластическое деформирование материала описывается соотношениями теории течения [1]: Нагружение оболочки осуществлялось в два этапа. На первом этапе ($t \leq t_0$) моделировалось нагружение оболочки собственным весом сыпучего заполнителя. В расчетах весовая нагрузка аппроксимировалась аналитической функцией, зависящей от пространственных переменных и времени [2]. Для уменьшения влияния инерционных сил на решение задачи время нарастания нагрузки t_0 должно быть на порядок больше периода изгибных колебаний конструкции по нижней форме. На втором этапе задавалась скорость смещения нагружающего устройства или приложенное к нему усилие. Определяющая система уравнений (1)–(4) дополняется кинематическими граничными и начальными условиями. Решение задачи основано на моментной схеме метода конечных элементов и явной конечно-разностной схеме интегрирования по времени [1,8], реализованных в вычислительной системе «Динамика–3» (сертификат соответствия Госстандарта России № РОСС RU.МЕ20.Н00338).

Для оценки устойчивости тонкостенных цилиндрических оболочек с сыпучим наполнителем при изгибе разработаны эмпирические формулы расчета критического значения изгибающего момента M_{cr} и поперечной силы F_{cr} [11,12].

$$M_{cr} = \sigma_{cr} W, \quad F_{cr} = \frac{M_{cr}}{l} - ql, \quad \sigma_{cr} = k(l)E \frac{h}{R} + \frac{M}{W} \pm \frac{\rho g H R}{2h}, \quad (5)$$

где M — изгибающий момент в поперечном сечении в месте потери устойчивости от весовой нагрузки, $W = \pi h R^2$ — осевой момент сопротивления поперечного сечения образца, l — длина образца, ρ — насыпная плотность заполнителя, H — высота загрузки сыпучего материала, $g=9,8 \text{ м/с}^2$, E — модуль упругости материала оболочки; h — толщина стенки; R — радиус оболочки; коэффициент $k(l)$ принимает значения 0,3 — для оболочек средней длины, 0,22 — для более длинных оболочек, q — равномерно распределенная весовая нагрузка на оболочку. Для консольно закрепленной оболочки $M = ql^2 / 2$. В случае шарнирного закрепления оболочки по торцам $M = ql^2 / 8$. В формуле (5) знак «плюс» перед третьим слагаемым принимается, если цистерна изгибается выпуклостью вверх, а «минус», если оболочка изгибается выпуклостью вниз. Для цистерны на двух шарнирных концевых опорах критический изгибающий момент на середине пролета M_{cr} , критическая весовая нагрузка q_{cr} и критическая длина оболочки l_{cr} равны:

$$M_{cr} = \sigma_{cr} \cdot W, \quad q_{cr} = \frac{8\sigma_{cr} W}{l^2}, \quad l_{cr} = \sqrt{\frac{8\sigma_{cr} W}{q}} \quad (6)$$

Для верификации формул (5) рассмотрены задачи поперечного изгиба и потери устойчивости цилиндрических оболочек с сыпучим наполнителем при различных условиях закрепления и нагружения [11,12]. Сравнительный анализ результатов численных и экспериментальных исследований показал, что формулы (5) с точностью до 23% определяют критическую нагрузку при изгибе тонкостенной цилиндрической оболочки заполненной сыпучим материалом.

В четвертой главе приводятся результаты теоретического анализа изгиба и упругопластического выпучивания цилиндрических оболочек с сыпучим наполнителем.

Рассмотрена задача потери устойчивости и упругопластического выпучивания свободно опертых цилиндрических оболочек, выполненных из стали 3, при изгибе под действием собственного веса, веса заполнителя и перерезывающих сил, создаваемых нагружающим устройством [3,8]. Диаграмма деформирования для стали 3, приведена на рис.5 сплошной линией. Для сравнения проведены расчеты с применением теории течения с линейным изотропным упрочнением. Рассмотрены варианты, изображенные на рис.5 пунктирной и штриховой линиями. Зависимость силы, прикладываемой к нагружающему устройству, от безразмерного времени t/T (T – период упругих изгибных колебаний оболочки по низшей форме) приведена на рис.6 штрихпунктирной линией. Другие графики на рис.6 характеризуют зависимость от безразмерного времени контактной силы F_{kont} между оболочкой и нагружающим устройством, определенной в расчете с применением нелинейной диаграммы деформирования (сплошная линия) и вариантов линейной аппроксимации диаграммы деформирования (пунктирная и штриховая линии соответственно). На рис.6 F_{cr} экспериментальное значение критической нагрузки. На рис.7,8 изображены остаточные формы центральной части оболочки, полученные в расчете с применением нелинейной диаграммы деформирования (рис.7) и эксперименте (рис.8). Цветной палитрой на рис.7 отображено распределение интенсивности пластических деформаций (максимальные деформации не превышают 5%).

Согласно результатам численного решения задачи, действие заданной нагрузки F порождает при $t/T \approx 2$ пластические деформации в центре оболочки. В последующем в этой области происходит потеря устойчивости оболочки, сопровождаемая образованием локальных поперечных вмятин (рис.7). Поскольку время T_F нарастания нагрузки F было сравнительно невелико ($\approx 1,2T$) на результатах расчетов сказались динамические эффекты. В частности, максимальное значение контактной силы F_{kont} между нагружающим устройством и оболочкой на 20% превышает экспериментальное значение критической нагрузки F_{cr} , что связано с изгибными колебаниями оболочки. С увеличением времени T_F в 5 раз расхождение F_{kont} и F_{cr} уменьшается до 10%. На закритической стадии деформирования контактная сила F_{kont} колеблется в окрестности критического значения F_{cr} . Хорошее согласование результатов расчета и эксперимента по критической нагрузке наблюдается также при применении в расчетах модели пластичности с линейным изотропным упрочнением, если ее параметры определены по начальному участку экспериментальной диаграммы деформирования (пунктирные линии на рис.5,6). В другом варианте (штриховые линии на рис.5,6) цилиндрическая оболочка не теряет устойчивости и ее деформирование происходит в упругой области.

Для оценки влияния скорости нагружения на точность определения предельного поперечного усилия проведено численное моделирование изгиба шарнирно опертой на торцах цилиндрической оболочки с заполнителем при задании скорости перемещения нагружающего устройства (жесткое нагружение). Исследовались два варианта нагружения, графики изменения во времени скорости перемещения нагружающего устройства которых приведены на рис.9 пунктирной и штриховой линиями. Для сравнения на рис.9 сплошной линией приведена зависимость скорости перемещения нагружающего устройства при действии на него внешнего давления, зависимость от времени которого представлена на рис.6 штрихпунктирной линией.

На рис.10 представлены графики изменения F_{cont}/F_{cr} в зависимости от смещения нагружающего устройства u/u_{cr} . На начальном этапе деформирования до потери устойчивости эти графики отличаются незначительно. На закритической стадии деформирования, чем выше скорость нагружения, тем больше проявляются динамические эффекты.

Проведен анализ влияния размеров на устойчивость консольно закрепленной цилиндрической оболочки при изгибе поперечной силой [1]. Результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают, что сыпучий наполнитель увеличивает значение критической поперечной нагрузки на 16,9–40,5% в зависимости от геометрии оболочки. В рассмотренных вариантах задачи наблюдалась качественно одинаковая картина упругопластического выпучивания оболочки, не зависящая от наличия наполнителя. Хорошее соответствие результатов расчетов и экспериментов подтвердило эффективность вычислительной модели упругопластического выпучивания цилиндрических оболочек, заполненных сыпучим материалом.

С применением разработанной эмпирической формулы (5) выполнен расчет критического напряжения и критической нагрузки для консольно закрепленных большегабаритных емкостей при поперечном изгибе [11]. В расчетах варьировались габариты емкостей, конструкционный материал, тип наполнителя и степень заполнения. Для сравнения получены результаты аналогичных расчетов на основе условий подобия и экспериментальных данных для модельного образца; выполненного из алюминиевого сплава 3004 в состоянии Н19, нагруженного железным порошком ПЖ-5 на 90 % объема образца. Сопоставление полученных результатов позволило оценить точность разработанной эмпирической формулы определения критической нагрузки – максимальное расхождение результатов составило 20%.

Исследовано упругопластическое выпучивание большегабаритной емкости для автомобильной транспортировки сыпучих материалов при подъеме для разгрузки (рис.11). При разгрузке цистерна наклоняется на угол $40,29^0$. Под действием весовой нагрузки корпус емкости при подъеме изгибается и может потерять устойчивость. Материал конструкции – алюминиевый сплав (зависимость предела текучести от параметра Одквиста приведена на рис.12 сплошной линией). Для сравнения выполнены расчеты для модели упругопластического деформирования с линейным упрочнением (пунктирная линия на рис.12). Результаты конечно-элементного решения задачи с применением ВК «Динамика-3» приведены на рис. 13 в виде графика зависимости от увеличения весовой нагрузки P/P_0 прогиба в центре оболочки ($P_0=1,6\text{МН}$ – допускаемый проектом вес засыпки). Сплошной и пунктирной линиями на рис.13 отмечены результаты расчетов с нелинейной и линейной диаграммами деформирования. Как видно из представленных результатов критическая для рассматриваемой большегабаритной емкости весовая нагрузка по расчетным данным, примерно, в 3 раза превышает допускаемое проектом значение. Применение модели упругопластического деформирования с линейным изотропным упрочнением на 30% завышает критическое значение весовой нагрузки. Расхождение критических продольных напряжений σ_{cr} , полученных на основе компьютерного моделирования и разработанной эмпирической формулы (5), составляет 4,5%. Расчет с применением формулы (6) показал, что критическая длина l_{cr} цистерны в 2 раза превышает длину, указанную в проекте. Таким образом, по расчетным данным рассматриваемая конструкция в данной ситуации сохраняет устойчивость.

В заключении приводятся основные результаты и выводы диссертационной работы.

1. Развиты экспериментальные установки и получены новые результаты экспериментальных исследований устойчивости заполненной сыпучим материалом замкнутой цилиндрической оболочки при изгибе.

2. Разработана и верифицирована эмпирическая формула оценки критической нагрузки для изгиба тонкостенной цилиндрической оболочки с сыпучим наполнителем. Показано, что погрешность предлагаемой формулы не превышает 23%. При известных параметрах поперечного сечения оболочки, характеристиках наполнителя и значениях критических продольных напряжений разработанная формула позволяет подсчитать предельную длину оболочки и предельную весовую нагрузку.

3. Исследовано влияние аппроксимации диаграммы деформирования конструкционного материала на значение критической нагрузки. Установлено, что при численном моделировании упругопластического выпучивания оболочек необходимо применять модель пластичности с нелинейным упрочнением.

4. Выполнен теоретический и экспериментальный анализ влияния сыпучего заполнителя на устойчивость цилиндрических оболочек. Показано, что сыпучий наполнитель создает давление на внутреннюю поверхность оболочки, препятствующее образованию вмятин, и изгибающий момент от равномерно распределенной по длине оболочки весовой нагрузки. Первый фактор увеличивает критическое значение внешней поперечной нагрузки, а второй уменьшает. Влияние наполнителя на критическую нагрузку зависит от условий закрепления и нагружения, степени заполнения и характеристик сыпучего материала.

5. Проведен численный анализ деформирования и предельного состояния оболочечных конструкций большагабаритных цистерн для транспортировки сыпучих материалов при изгибе, проектируемых ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель». Показано, что проектируемая автоцистерна при разгрузке не теряет устойчивости. Применение модели упругопластического деформирования с линейным изотропным упрочнением на 30% повысило критическое значение весовой нагрузки. Расхождение критического значения продольных напряжений, полученных на основе компьютерного моделирования и разработанной эмпирической формулы, составляет 4,5%.

6. Разработанные экспериментальные установки, эмпирическая формула определения критической нагрузки при изгибе цилиндрических оболочек с наполнителем и результаты исследований будут использоваться в ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель» при проектировании большагабаритных емкостей для транспортировке сыпучих материалов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки России:

1. Баженов, В.Г. Экспериментальное и теоретическое исследование упругопластического выпучивания цилиндрических оболочек, заполненных сыпучим материалом, под действием поперечной силы / В.Г. Баженов, **Е.Г. Гоник**, А.И. Кибец, М.В. Петров, Т.Г. Федорова, И.А. Фролова // Ученые записки Казанского университета. Сер. Физико-математические науки. – 2017. – Т. 159. – №3. – С. 282–295.
2. Баженов, В.Г. Устойчивость и закритическое поведение большагабаритных цистерн для транспортировки сыпучих грузов/В.Г. Баженов, **Е.Г. Гоник**, А.И. Кибец, М.В. Петров, Т.Г. Федорова//Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2015. – №5. – С. 34–40.

3. Bazhenov, V.G. Stability and supercritical behaviour of thin-walled cylindrical shell with discrete aggregate in bending / V.G. Bazhenov, **E.G. Gonik**, A.I. Kibets, M.V. Petrov, T.G. Fedorova, I.A. Frolova // Materials Physics and Mechanics. – 2016. – Т. 28. – №1–2. – С. 16–20.
4. **Гоник, Е.Г.** Экспериментальное исследование упругопластического деформирования и потери устойчивости подкрепленных цилиндрических оболочек с заполнителем при изгибе/ Е.Г. Гоник, А.И. Кибец, М.В. Петров, Т.Г. Федорова // Проблемы прочности и пластичности. – 2013. – Т. 75. – № 3. – С. 215–220.
5. Петров, М.В. Экспериментальное исследование потери устойчивости тонкостенных оболочек при чистом изгибе/М.В. Петров, Т.Г. Федорова, Е.Г. **Гоник** // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Сер. Механика предельного состояния. – 2015. – №2 (24). – С. 119–125.
6. **Гоник, Е.Г.** Экспериментальное исследование потери устойчивости консольно закрепленных цилиндрических тонкостенных оболочек при поперечном изгибе / Е.Г. Гоник, М.В. Петров, Т.Г. Федорова // Проблемы прочности и пластичности. – 2016. – Т. 78. – №2. – С. 228–235.
7. Петров, М.В. Исследование устойчивости консольно закрепленных цилиндрических тонкостенных оболочек при чистом изгибе /М.В. Петров, **Е.Г. Гоник**, Т.Г. Федорова // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Сер. Механика предельного состояния. – 2017. – №1 (31). – С. 105–113.
8. **Гоник, Е.Г.** Влияние аппроксимации диаграммы деформирования на критические нагрузки при поперечном изгибе цилиндрической оболочки / Е.Г. Гоник, А.И. Кибец, М.В. Петров, Т.Г. Федорова, И.А. Фролова // Проблемы прочности и пластичности. – 2017. – Т. 79. – №2. – С. 169–181
9. Петров, М.В. Устойчивость при изгибе тонкостенных оболочек, заполненных различными сыпучими материалами/М.В. Петров, **Е.Г. Гоник**, Т.Г. Федорова // Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Сер. Механика предельного состояния. – 2017. – №4 (34). – С. 52–58.
10. Федорова, Т.Г. Экспериментальное изучение влияния геометрических параметров на устойчивость тонкостенных цилиндрических оболочек, заполненных сыпучим материалом, при изгибе поперечной силой /Т.Г. Федорова, М.В. Петров, **Е.Г. Гоник**, Н.Г. Пфаненштиль//Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Сер. Механика предельного состояния. – 2018. – №3 (37). – С. 62–73.
11. Петров, М.В. Способ приближенного расчета на устойчивость при поперечном изгибе тонкостенных цилиндрических оболочек средней длины, заполненных сыпучим материалом / М.В. Петров, Т.Г. Федорова, **Е.Г. Гоник**, Н.Г. Пфаненштиль//Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Сер. Механика предельного состояния. – 2018. – № 4 (38). С.120–128.
Материалы докладов на научных конференциях и другие научные публикации
12. **Гоник, Е.Г.** Расчет предельного состояния тонкостенных цилиндрических оболочек при изгибе, заполненных сыпучим заполнителем/Е.Г. **Гоник**, М.В. Петров//Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Сер. Механика предельного состояния. – 2019. – № 2 (40). С.117–127.

13. Артемьева, А.А. Численное и экспериментальное исследование процессов упругопластического деформирования, потери устойчивости и закритического поведения оболочек вращения при квазистатическом и динамическом нагружениях / А.А. Артемьева, **Е.Г. Гоник**, А.И. Кибец, М.В. Петров, Д.В. Шошин, Т.Г. Федорова // Труды математического центра им. Н.И. Лобачевского. Лобачевские чтения – 2012: Материалы XI молодежной научной школы-конференции (1–6 ноября 2012 г.). – Казань: Изд-во Казан. матем. об-ва, 2012. – Т. 45. – С. 212–216.
14. Баженов, В.Г. Численное исследование процессов деформирования, потери устойчивости и закритического поведения упругопластических оболочек вращения при квазистатических и динамических нагружениях / В.Г. Баженов, А.И. Кибец, **Е.Г. Гоник**, М.Н. Жестков, Т.Г. Федорова // Материалы XIX международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова (Ярополец, 18–22 февраля 2013 г.). – М.: Изд-во: ООО «ГР-принт», 2013. – С. 23–26.
15. Кибец, А.И. Численный анализ упругопластического выпучивания подъемной цистерны для транспортировки сыпучих материалов при аварийном падении/ А.И. Кибец, М.В. Петров, Т.Г. Федорова, **Е.Г. Гоник**//Материалы XII молодежной научной школы-конференции. Казан. матем. об-во, 2013. – Т.47. Лобачевские чтения–2013.
16. Кибец А.И., Иванов В.А., Петров М.В., Федорова Т.Г., **Гоник Е.Г.** Экспериментальное исследование потери устойчивости подъемной цистерны для перевозки сыпучих материалов при аварийном падении/Материалы VIII всероссийской конференции по механике деформируемого твердого тела. Чебоксары–2014.
17. **Гоник Е.Г.** Определение коэффициентов трения железного порошка ПЖ-5. / Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы VIII Всероссийской (II Международной) конференции. Чебоксары: Изд-во Чуваш.ун-та, 2014. С.93–96.
18. Петров, М.В. Методика испытания на устойчивость тонкостенных оболочек при чистом изгибе/ М.В. Петров, **Е.Г. Гоник**, И.Н. Ивашкин// В сборнике: Архитектура. Строительство. Образование материалы региональной конференции. 2015. С. 3-7.
19. **Гоник Е.Г.** Потеря устойчивости тонкостенных оболочек при чистом изгибе. / В сборнике: механика предельного состояния и смежные вопросы. Материалы всероссийской научной школы-конференции, посвященной 85-летию профессора Д.Д. Ивлева. 2015. С. 177–181.
20. **Гоник, Е.Г.** Конечно-элементное моделирование взаимодействия упругопластического сыпучего наполнителя с оболочкой при изгибе / Е.Г. Гоник, Т.Г. Федорова //Тезисы докладов V международного научного семинара «Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы»/Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – 2016. – С. 51–53.
21. Петров, М.В. Экспериментальное определение давления сыпучей среды на внутреннюю стенку цилиндрической оболочки / М.В. Петров, Т.Г. Федорова, **Е.Г. Гоник**//Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: Материалы III Международной (IX Всероссийской) конференции. – 2016. – С. 119–123.

22. **Гоник, Е.Г.** Исследование упругопластического изгиба и потери устойчивости оболочек вращения с учетом контактного взаимодействия с сыпучим заполнителем / Е.Г. Гоник, А.И.Кибец, М.В. Петров, Т.Г. Федорова, И.А. Фролова // Динамические и технологические проблемы механики и конструкций и сплошных сред: Материалы XXIII международного симпозиума им. А.Г. Горшкова. – 2017. – С. 57–59.
23. Федорова, Т.Г. Влияние заполнения тонкостенных оболочек различными сыпучими материалами на устойчивость при изгибе/Т.Г. Федорова, Е.Г. **Гоник**, М.В. Петров//Материалы XX Юбилейной Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным системам (ВМСППС-2017). – 2017. – С. 332–333.
24. **Гоник, Е.Г.** Влияние геометрических размеров тонкостенных оболочек, заполненных сыпучим материалом, на устойчивость при изгибе /Е.Г. Гоник, М.В. Петров, Т.Г. Федорова, И.А. Фомичев // Материалы X Всероссийской конференции и по механике деформируемого твердого тела. – 2017. – С. 170–173.
25. Петров, М.В. Влияние несовершенств геометрии тонкостенных цилиндрических оболочек, заполненных сыпучим материалом, на их устойчивость при изгибе/М.В. Петров, Т.Г. Федорова, Б.В. Михайлов, **Е.Г. Гоник**, Н.Г. Пфаненштиль // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: Материалы IV Международной (X Всероссийской) конференции НАСКР-2018. – Чебоксары: Изд-во Чуваш.ун-та, 2018. С.148–156.

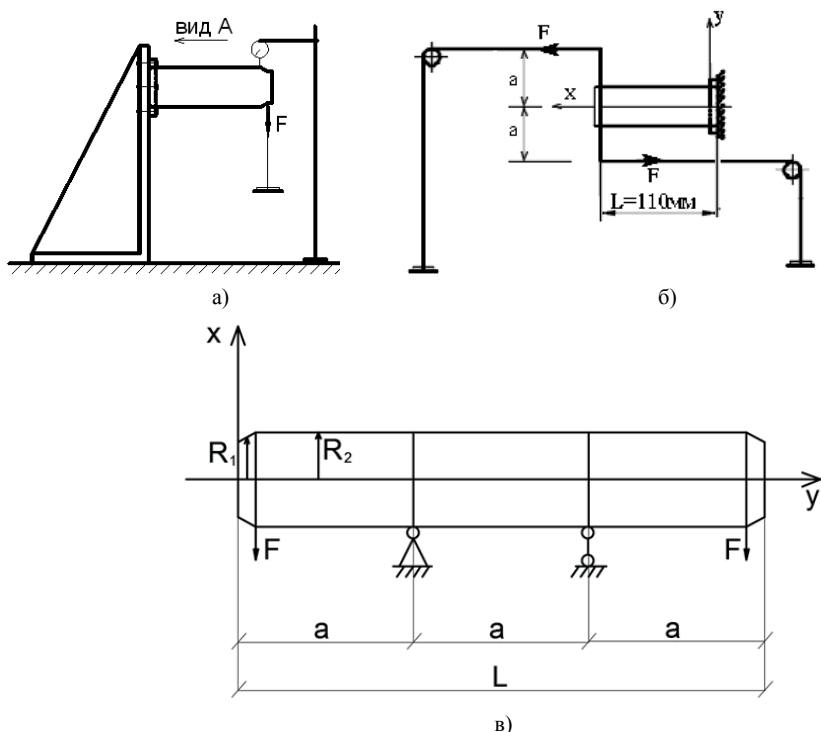


Рис.1

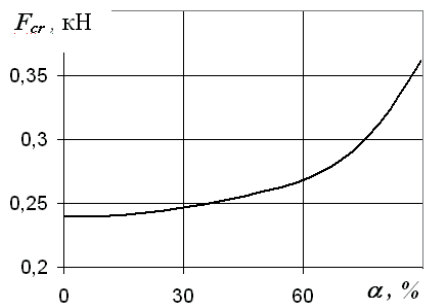


Рис.2



а)

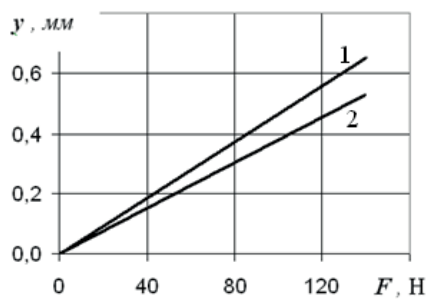


Рис.3



б)

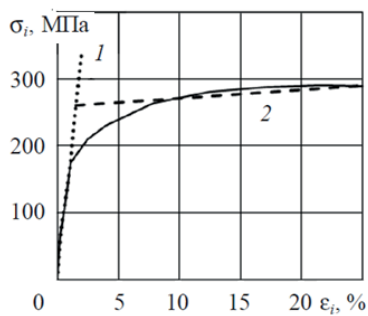


Рис.5

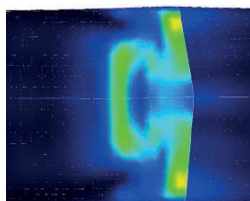


Рис.7

Рис.4

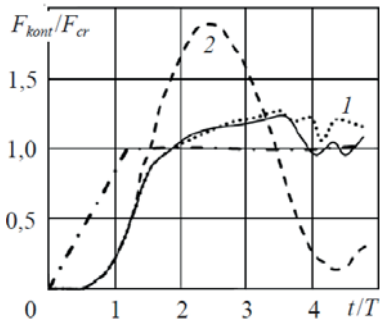


Рис.6



Рис.8

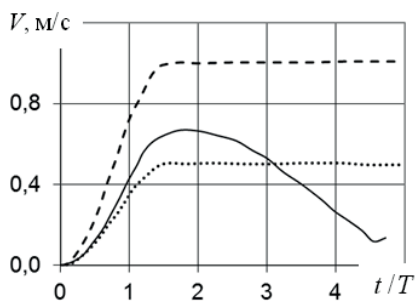


Рис.9

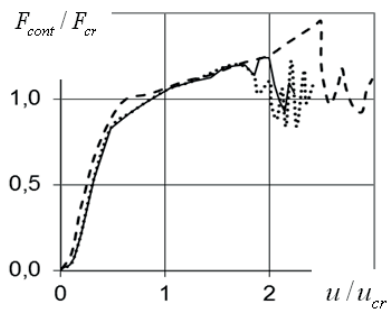


Рис.10

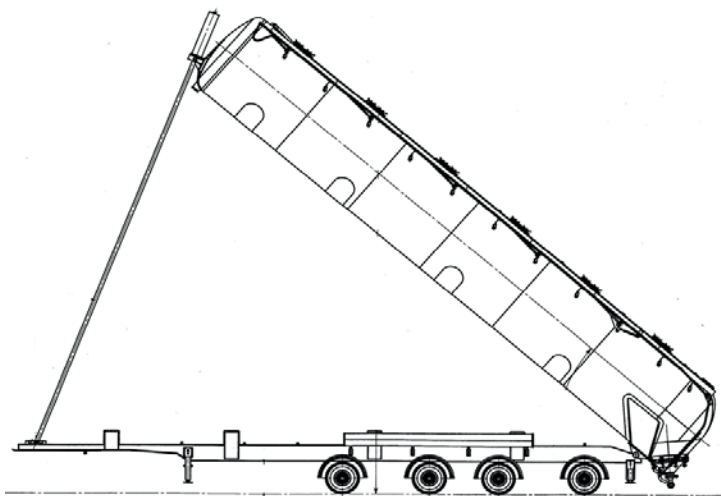


Рис.11

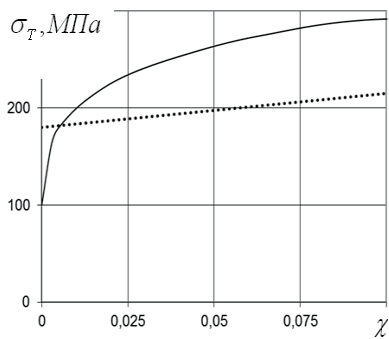


Рис.12

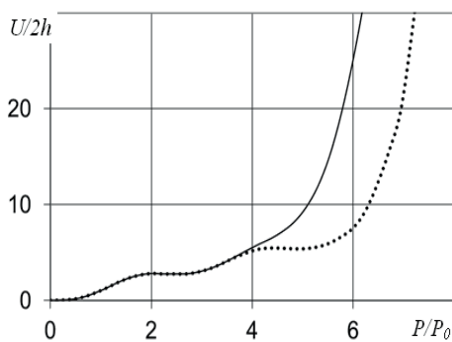


Рис.13

ГОНИК Екатерина Григорьевна

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗГИБА И
УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ВЫПУЧИВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С СЫПУЧИМ НАПОЛНИТЕЛЕМ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 24.10.2019 г. Формат 60×80/16.
Печ. л. 1,0. Бумага офсетная. Печать оперативная.
Тираж 100 экз. Заказ № 1236.

Отпечатано с готового оригинала-макета в типографии
ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»
428015 г. Чебоксары, Московский просп., 15

