

На правах рукописи



ФЕДОРОВА ТАТЬЯНА ГЕОРГИЕВНА

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ, ПОТЕРИ
УСТОЙЧИВОСТИ И ЗАКРИТИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ
ОБОЛОЧЕК С СЫПУЧИМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ ПРИ ИЗГИБЕ

Специальность 01.02.06-

Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2013

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

Научные руководители:

д. ф.-м.н., проф.

Кибец Александр Иванович

д.т.н., доцент

Петров Михаил Васильевич

Официальные оппоненты:

Коноплев Юрий Геннадьевич, Заслуженный деятель науки РФ и РТ, д. ф.-м.н., проф., Казанский государственный университет, заведующий кафедрой

Шклярчук Федор Николаевич, Заслуженный деятель науки РФ, д.т.н., проф., Институт прикладной механики РАН, главный научный сотрудник

Ведущая организация – **ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Н.Новгород**

Защита состоится "26" декабря 2013 года в 16⁰⁰ 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 Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Автореферат разослан "21" ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Горохов В.А.

Актуальность темы. Развитие автомобильных перевозок сыпучих материалов требует совершенствования конструкций полуприцепов-цистерн, которые должны стать надежными средствами для транспортировки бестарных грузов по дорогам 1-3 категорий условий эксплуатации. В настоящее время автомобильная промышленность осваивает производство опрокидываемых при разгрузке тонкостенных большегабаритных цистерн для перевозки сыпучих материалов (рис.1). Данная цистерна представляет собой замкнутую тонкостенную цилиндрическую оболочку в стальном или алюминиевом исполнении. Конструкции цистерн должны быть безопасными в эксплуатации, экономичны и по возможности обладать минимальной трудоемкостью в изготовлении. При рациональном выборе геометрических параметров цистерны одной из главных задач является расчет конструкций на устойчивость. В настоящее время данная проблема до конца не изучена. Это связано с тем, что большое влияние на величину критической нагрузки играют возмущающие факторы, такие как начальные несовершенства формы оболочки, условий нагружения и т.д., которые трудно поддаются учету. Этим обусловлена актуальность темы диссертации. Необходимость исследования устойчивости замкнутой тонкостенной цилиндрической оболочки, заполненной сыпучим материалом, при изгибе требует разработки и верификации на экспериментальных данных математической модели, алгоритма решения и программного обеспечения, которые будут соответствовать современному уровню компьютерного моделирования.

Цель диссертационной работы – разработка и экспериментальное обоснование вычислительной модели, численный анализ нелинейного деформирования, потери устойчивости и закритического поведения оболочечных конструкций большегабаритных цистерн для транспортировки сыпучих материалов при изгибе.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи.**

1. Разработка экспериментальной установки и методики экспериментального исследования устойчивости заполненной сыпучим материалом замкнутой цилиндрической оболочки. Проведение экспериментальных исследований устойчивости оболочек вращения, заполненных сыпучим материалом, при изгибе.

2. Развитие вычислительной модели упругопластического деформирования, потери устойчивости и закритического поведения оболочечных конструкций большегабаритных цистерн для транспортировки сыпучих материалов.

3. Верификация разработанной вычислительной модели на полученных экспериментальных данных.

4. Численное исследование процессов деформирования и предельных состояний оболочечных конструкций большегабаритных цистерн для транспортировки сыпучих

материалов при подъеме и разгрузке.

Научная новизна. Разработаны экспериментальные установки и методика экспериментального исследования устойчивости заполненной сыпучим материалом замкнутой цилиндрической оболочки при изгибе. Сформулирована геометрически и физически нелинейная модель упругопластического деформирования, потери устойчивости и закритического поведения оболочечных конструкций большегабаритных цистерн для транспортировки сыпучих материалов. В основе вычислительной модели лежит моментная схема МКЭ, явная конечно-разностная схема интегрирования по времени типа «крест», метод продолжения по параметру, в качестве которого используется время, и программный комплекс «Динамика-3». Проведены экспериментально-теоретические исследования устойчивости цилиндрических оболочек, заполненных сыпучим материалом, при изгибе. Получены новые результаты численного анализа процессов упругопластического деформирования, предельного состояния и закритического поведения большегабаритных цистерн для транспортировки сыпучих материалов при изгибе и внутреннем давлении.

Достоверность полученных результатов исследований подтверждается их удовлетворительным соответствием экспериментальным данным.

Практическая ценность. Разработанная вычислительная модель позволяет существенно расширить класс задач при исследовании процессов упругопластического деформирования и предельных состояний тонкостенных элементов конструкций с сыпучим наполнителем. Ее применение повышает уровень обоснованности и безопасности проектируемых тонкостенных конструкций разного назначения. На основе разработанной вычислительной модели проведен анализ устойчивости крупногабаритной емкости для автомобильной перевозки сыпучих материалов при ее подъеме в процессе разгрузки. Результаты исследований внедрены в ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель» по производству полуприцепов-цистерн, и использовались на этапе проектирования, что подтверждается актом внедрения (прилагается к работе), а также публикациями в открытой печати.

Диссертационная работа выполнена при поддержке:

ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, соглашения 14.В37.21.0227, гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-4807.2010.8, 2843.2012.8), грантов РФФИ (проекты № 09-08-97034-р_поволжье_а, 11-08-00557-а, 11-08-97023-р_поволжье_а, 12-08-33106-мол_а_вед, 12-08-12044-офи_м, 12-08-90708-моб_ст, 13-08-90733-мол_рф_нр).

На защиту выносятся:

1. Экспериментальные установки и методика исследования устойчивости заполненных сыпучим материалом замкнутых оболочек вращения при изгибе.

2. Вычислительная модель упругопластического деформирования, потери устойчивости и закритического поведения оболочечных конструкций с сыпучим наполнителем.

3. Результаты экспериментального и численного исследования процессов упругопластического выпучивания оболочек вращения, заполненных сыпучим материалом, при изгибе.

4. Результаты численного анализа процессов упругопластического деформирования, предельного состояния и закритического поведения большегабаритных цистерн для транспортировки сыпучих материалов при изгибе.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях и симпозиумах: II Международная конференция «Проблемы нелинейной механики деформируемого твердого тела» (Казань, 2009 г.); XXIII и XXV Международной конференции «Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов (Санкт-Петербург, 2009, 2013 г.г.); XVII и XIX Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (г. Ярополец, 2011, 2013 г.г.); X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 2011 г.); XI и XII Всероссийская молодежная школа-конференция «Лобачевские чтения-2012, 2013» (г. Казань, 2012, 2013 г. г.); 18-ая Нижегородская сессия молодых ученых (естественные, математические науки) ("Морозовский" Арзамасский район Нижегородской области, 2013 г.); Форум молодых учёных Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (г. Нижний Новгород, 2013 г.).

Благодарности. Автор выражает признательность Заслуженному деятелю науки РФ, д.ф.м.-н., проф. Баженову В.Г. за консультации в процессе выполнения работы.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1-11], 5 из которых статьи в сборниках, рекомендуемых ВАК.

Личный вклад соискателя. Соискателем осуществлены: а) разработка вычислительной модели, экспериментальной установки и методики испытаний оболочек вращения с сыпучим наполнителем; б) экспериментальное и численное исследование упругопластического деформирования, потери устойчивости и закритического поведения оболочек вращения с сыпучим наполнителем; в) верификация разработанной вычислительной модели; г) численный анализ процессов упругопластического

деформирования, предельного состояния и закритического поведения большегабаритных цистерн для транспортировки сыпучих материалов. Кибецу А.И. принадлежит руководство численными исследованиями, Петрову М.В. руководство экспериментальными исследованиями.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Основной печатный текст составляет 137 страниц. Для иллюстрации методики и результатов решения в диссертации приведены 80 рисунков и 12 таблиц. Список цитируемой литературы (177 наименований) занимает 16 страниц.

Краткое содержание работы. Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы и сформулированы основные направления исследований.

В первой главе дается краткий обзор методов и результатов экспериментальных и теоретических исследований устойчивости цилиндрических оболочек при продольном сжатии и изгибе, формулируются основные цели и задачи диссертационной работы.

Экспериментальные и теоретические исследования деформирования тонких оболочек начали широко проводиться с 20 годов 19 века. Эксперименты предшествовали теоретическим исследованиям и имели качественный характер. Первые эксперименты по потере устойчивости при действии внешнего давления были выполнены в 1858 году В. Фейерберном. На осевое сжатие оболочки испытывали В.Е. Лили и А. Маллок. В 1930-1935 г.г. Р.В. Роде, Е.Е. Лундквист осуществили ряд испытаний оболочек при различных нагружениях (сжатие, сдвиг и изгиб, при действии сосредоточенных нагрузок). Стоит отметить, что большая часть экспериментов проводилась на сжатие цилиндрических оболочек, и незначительная часть - на изгиб поперечной силой.

Начиная с 1960 г. были проведены масштабные экспериментальные исследования тонких оболочек с целью установления характера их поведения при потере устойчивости при осевом сжатии, при осевом сжатии в комбинации с внутренним давлением, при внешнем давлении, при действии поперечной силы, при поперечной нагрузке в комбинации с внутренним давлением. В.Г. Выборнов, В.И. Моссаковский, М.В. Никулин, Б.В. Нерубайло, Ю.Г. Коноплев, М.А. Ильгамов, В.В. Кабанов, В.М. Даревский, А.В. Саченков, М. Zeinodini и другие авторы выполнили экспериментальные исследования устойчивости цилиндрических оболочек при локальных воздействиях. В их работах была использована статистическая обработка данных целого ряда проведенных экспериментов, в результате чего установлены вероятностные свойства несущей способности. Имеется разброс в значениях полученных критических нагрузок, что объясняется наличием начальных несовершенств, неравномерностью распределения нагрузки. В работах А.С.

Вольмира, Э.И. Григолюка, В.С. Гудрамовича приведен обзор основных экспериментальных исследований.

Теория потери устойчивости тонкостенными цилиндрами была представлена Х.М. Муштари и L.H. Donnell. В сороковые года 20 века появились экспериментальные исследования, подтверждающие основные положения теории устойчивости. Аналитические исследования потери устойчивости в пределах упругости проводились П. Сайдом, Л. Бразье, В. Вейнгартеном, Э.Л. Аксельрадом, В. Флюгге и другими авторами.

Первые исследования изгиба трубы выполнены в 1910 г. Бантлиным. В последующем теоретический анализ выполнен К.М. Дубягой, Т. Карманом, Л. Бразье, Ю.В. Коноваловым, Е. Рейсснером. Большой вклад в развитие теории и методов расчета тонкостенных оболочек внесли В.Л. Бидерман, В.З. Власов, Э.И. Григолюк, В.В. Новожилов, М.А. Ильгамов, В.С. Гудрамович и другие ученые.

Полученные в результате экспериментов критические нагрузки оказались намного ниже классических значений, определяемых теоретическим путем. Дальнейшие исследования выявили причины расхождений теории и эксперимента: использование идеальной расчетной модели (совершенная форма оболочек, упругий материал, идеальное закрепление) и отсутствие качественно выполненных экспериментов (неравномерность распределения нагрузки, местные дефекты образцов, овальность оболочек, некачественное закрепление образцов).

До настоящего времени мало изученным остается вопрос устойчивости цилиндрических оболочек, заполненных сыпучим материалом, при изгибе и внутреннем давлении. Сложность изучения данной проблемы заключается в правильном определении модели заполнителя и учете нелинейности докритического напряженно-деформированного состояния. Сыпучий заполнитель имеет свойства как жидкости, так и твердого тела, а учесть это в теоретических исследованиях трудно. В связи с этим появляется необходимость в экспериментальном подтверждении выбранной математической модели заполнителя.

В.Г. Галеркиным, Я.И. Перельманом решена задача о напряженном состоянии цилиндрической оболочки, загруженной жидкостью и опертой на 2 опоры. Поддерживающее влияние внутреннего давления при изгибе цилиндрической оболочки моментом на величину критической нагрузки при потере устойчивости зафиксировано в работах Е.Д. Плетниковой, В.И. Вейнгартена. Замечено, что при потере устойчивости вмятины образуются в сжатой зоне и с ростом внутреннего давления гофры увеличиваются по длине.

В работе К.Ф. Шагивалеева приведены аналитические решения в упругой постановке задачи изгиба цилиндрической оболочки сыпучим материалом. К.Ф. Шагивалеев вводит две модели упругого заполнителя: модель Власова и Винклера. При аналитическом исследовании автор приходит к выводу, что модель Власова с приемлемой точностью отражает поведение упругого заполнителя. Автор показал, что сыпучий материал оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние оболочки под действием различных нагрузок. Однако полученные аналитические результаты не были подтверждены экспериментальными исследованиями.

При исследовании задач устойчивости круговых цилиндрических оболочек при неоднородных исходных состояниях возникает вопрос о моментности напряженного состояния, которое вызывает появление местных искривлений оболочки, что существенно снижает ее устойчивость. Неоднородность исходного состояния, обусловленная неоднородностью нагрузок, приводит к локальным формам потери устойчивости оболочек. С математической точки зрения неоднородность напряжений приводит к системе уравнений с переменными коэффициентами. Для решения задачи устойчивости в этом случае необходимо использование численных методов и современных программных комплексов.

В обзорных работах В.Г. Баженова, Д.В. Вайнберга, Я.М. Григоренко, К.-У. Bathe, Т. Belytschko описано применение численных методов для расчетов динамики оболочек. Методы численного моделирования позволяют изучать процессы деформирования и устойчивости оболочек при достаточно сложной геометрии тел с учетом эффектов геометрической и физической нелинейности, сложного нагружения, неоднородности напряженно-деформированного состояния (НДС) без привлечения упрощающих предположений и априорных гипотез силового и кинематического характера.

Нелинейная задача потери устойчивости оболочки при изгибе изучена Ю.А. Шевляковым, Л.И. Маневичем, Д. Нэшем, В.М. Даревским. В дальнейшем Ю.В. Липовцевым, В.В. Кабановым, Фишером, В.О. Альмротом были разработаны эффективные алгоритмы исследования потери устойчивости круговых цилиндрических оболочек с учетом моментности и нелинейности исходного напряженно-деформированного состояния.

Решение задач устойчивости оболочек с учетом пластических деформаций предложено в работах А.С. Вольмира, Дж. Джерара. Работы А.С. Вольмира, А.С. Ноздрина, Ю.Н. Бердникова по исследованию потери устойчивости цилиндрических оболочек при изгибе основаны на классическом решении линейной задачи в предположении, что оболочка теряет устойчивость за пределом упругости из-за появления

вмятин в сжатой зоне. Для определения критических напряжений цилиндрической оболочки при изгибе за пределами упругости авторы использовали численные методы.

В 70-е годы 20 века широкое применение по исследованию задач прочности и устойчивости оболочек нашел метод конечных элементов. Большой вклад в развитие метода конечных элементов внесли исследования В.Г. Баженова, А.И. Голованова, С.А. Капустина, В.В. Кабанова, Ф.Н. Шклярчука, В.В. Кузнецова, Л.М. Савельева, В.А. Постного, С.В. Астрахарчика, Д.А. Стринклина, Р.Н. Gallagher, А.В. Сабира, К.-У. Bathe, Т. Belytschko, J.C. Nagtegaal, J. Barlow, O.C. Zienkiewicz и др

Вопросам построения математических моделей в теории пластичности посвящены работы А.А. Ильюшина, В.В. Новожилова, Ю.Н. Работнова, И.А. Биргера, В.С. Бондаря, Р.А. Васина, В.Г. Зубчанинова, Ю.И. Кадашевича, Л.М. Качанова, Ю.Г. Коротких, И.В. Кнетса, Н.Н. Малинина, Б.Е. Мельникова, Ю.М. Темиса, С.А. Шестерикова, В.Н. Кукуджанова и многих других ученых. Наибольшее распространение в практических расчетах нашли дифференциальные теории пластического течения. Однако для обоснования применимости в задачах устойчивости и закритического поведения тонкостенных конструкций требуются теоретические и экспериментальные исследования их точности в условиях сложного нагружения.

Во второй главе приводятся экспериментальные установки, методика и результаты экспериментального анализа устойчивости заполненных сыпучим материалом замкнутых оболочек вращения при изгибе. Цель проведения экспериментов – исследование влияния наполнителя на величину критической нагрузки, на формы потери устойчивости. Рассматривались:

- квазистатический изгиб консольно-закрепленных тонкостенных цилиндрических оболочек с наполнителем;
- изгиб цилиндрических оболочек с наполнителем, шарнирно опертых по концам на две опоры при нагружении собственным весом и перерезывающими силами.

Экспериментальный комплекс для исследования устойчивости цилиндрических оболочек при изгибе состоит из специально спроектированного 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, а также измеритель деформаций цифровой ИДЦ-1.

У консольных цилиндрических оболочек один торец жестко защемлен. Другой торец, свободный в перемещениях, укреплен жестким плоским днищем. При испытании на изгиб для реализации граничных условий разработаны специальные приспособления. Принципиальная схема установки показана на рис. 2. Толщина оболочки $h = 0,1$ мм, отношение длины оболочки к толщине $L/h = 1350$, радиусы оболочки $R_1 = 266h$ на нагружаемом торце и $R_2 = 328h$ на закрепленном торце. Образцы выполнены из алюминиевого сплава. Для моделирования жесткой заделки была выточена муфта по внутреннему диаметру образца. Внутри торца образца плотно вставлялась металлическая втулка. Снаружи образец обжимался полувтулками двумя болтами, расположенными в диаметрально противоположных местах. Вся эта конструкция плотно вставлялась в стенд прикрепленный к металлической раме. Отсутствие перемещений стенда с образцом как жесткого целого проверялось индикаторами часового типа.

Программа испытания состоит из следующих этапов:

- жесткая заделка образца на стенде с учетом крепления втулки;
- заполнение образца металлическим порошком объемом, заданным экспериментом;
- настройка измерительного оборудования;
- нагружение образца – первая шаговая нагрузка;
- измерение перемещения нагружаемого торца образца индикатором часового типа ИЧ-10;
- измерение диаметров электронным штангенциркулем в 4 сечениях по длине образца;
- измерение меридиональных и кольцевых деформаций;
- дальнейшее пошаговое увеличение вертикальной нагрузки на торце образца и повторение всех вышеприведенных измерений; фиксация формы образца при потере устойчивости;
- дальнейшее нагружение вертикальной силой с целью изучения закритического поведения образца.

После завершения испытаний проводится статистическая обработка полученных экспериментальных данных. По гипотезе о нормальности распределения параметра несущей способности оцениваются значения критической нагрузки и дисперсия. Из статистической обработки исключаются эксперименты с грубыми ошибками в полученных измерениях по допустимому отклонению в величине перемещений. После статистической обработки результатов экспериментальных исследований определяется среднестатистическая зависимость прогиба образца в области нагружения от прикладываемого вертикального усилия и величина критической нагрузки.

Принципиальная схема установки для исследования изгиба цилиндрических оболочек с наполнителем, свободно опертых по концам на две опоры приведена на рис.3. Эксперименты проводились на образцах наружным диаметром $D=160$ мм, толщиной стенки $h=0,75$ мм и длиной $L=2500$ мм, выполненных из стали марки Ст3. Оболочку заполняли речным песком массой $m=60$ кг, замыкали плоскими днищами и устанавливали на две опоры (неподвижные плиты), расположенные на расстоянии 2400 мм друг от друга. Как показали предварительные эксперименты, под действием собственного веса и веса песка исследуемая оболочка не теряет устойчивость. Поэтому ее догружали дополнительными поперечными силами, создаваемыми домкратом и передаваемыми через динамометр марки ДОСМ-3-3 и нагружающее устройство. Расстояние между опорами нагружающего устройства принимали 600 мм. Средняя часть оболочки (зона потери устойчивости) оставалась свободной от нагрузки. Прогиб оболочки на середине длины измеряли индикатором часового типа ИЧ-10. Экспериментальные исследования проводили по следующей методике. Образец после установки на опоры нагружался поперечными силами, величина которых увеличивалась с шагом 0,5кН. По мере приближения к критическому значению шаг нагружения уменьшался до 0,1кН. На каждом шаге нагружения фиксировались прогиб оболочки и ее форма. После статистической обработки результатов экспериментальных исследований строилась зависимость прогиба образца от нагрузки.

Экспериментальные исследования квазистатического изгиба консольно-закрепленных тонкостенных цилиндрических оболочек проводились в трех вариантах: а) оболочки без наполнителя; б) оболочки, заполненные металлическим порошком плотностью $\rho=2,66$ г/см³ и общим весом $P_0=1150$ г, усилие направлено вниз; в) оболочки, заполненные металлическим порошком, вертикальное усилие направлено вверх. Всего было проведено 35 испытаний. Результаты исследований приведены на рис.4. в виде графиков изменения прогиба в зависимости от нагрузки. Цифрами 1,2,3 на рис.4 отмечены результаты испытаний трех перечисленных выше вариантов образцов и нагружения.

Потеря устойчивости образцов происходила в упругой области. Закритическое поведение оболочки сопровождается образованием у защемленного торца оболочки в сжатой зоне ромбовидных вмятин и пластических деформаций. При дальнейшем нагружении образцов, происходит образование новых ромбовидных вмятин и расширение области потери устойчивости. Для образца без наполнителя в зоне потери устойчивости поперечное сечение приобретает каплевидную форму. Если весовая нагрузка действует на сжатую область оболочки, то сыпучий наполнитель препятствует образованию вмятин и увеличивает значение критической силы (для рассматриваемых образцов в 1,8 раза). В

противном случае влияние сыпучего заполнителя на устойчивость оболочки значительно ослабевает.

Исследования изгиба цилиндрических оболочек, шарнирно опертых по концам на две опоры при нагружении собственным весом и перерезывающими силами проведены для трех вариантов образцов: а) гладкие оболочки, б) оболочки, подкрепленные ребром жесткости (соединение сварным швом) и в) оболочки, подкрепленные ребром жесткости (соединение на болтах). Всего было выполнено 19 экспериментов. Результаты экспериментальных исследований приведены на рис.5. Цифрами 1,2,3 на рис.5 отмечены результаты испытаний трех перечисленных выше вариантов образцов.

Как видно из рис.5 подкрепление оболочки ребрами жесткости, увеличивает устойчивость цилиндрической оболочки. Условия крепления ребер жесткости к оболочке существенно влияют на ее критическое поведение и величину критической силы. При наличии ребер жесткости даже в случае образования локальных вмятин оболочка может в целом не терять устойчивость и выдерживать нагрузку. Важным в этом случае становится выбор оптимального подкрепления, обеспечивающего устойчивость оболочки при минимальном весе.

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

Деформирование оболочечной конструкции описывается в переменных Лагранжа с позиций механики сплошных сред. 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 $n_{ij} : x_i = n_{ij} X_j, i, j = \overline{1,3}$ (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 . Формоизменения полагаем большими, а деформации - 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{e}_{ij} скорости деформаций в общем базисе $\dot{\varepsilon}_{ij} = n_{im} n_{jk} \dot{e}_{mk}$, которые определяются в метрике текущего состояния.

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

В (1) 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 .

Уравнения состояния устанавливаются отдельно для шаровых $\dot{\varepsilon}_{ij}^V, \dot{\sigma}^V$ и девиаторных $\dot{\varepsilon}'_{ij}, \dot{\sigma}'_{ij}$ составляющих скоростей деформаций и напряжений ($\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}'_{ij} + \delta_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}^V, \dot{\sigma}_{ij} = \dot{\sigma}'_{ij} - \delta_{ij}\dot{\sigma}^V$). Зависимость шаровых компонент скоростей деформаций и напряжений предполагается линейной. Девиаторные составляющие скорости деформации $\dot{\varepsilon}'_{ij}$ раскладываются на пластические $\dot{\varepsilon}'_{ij}{}^P$ и упругие $\dot{\varepsilon}'_{ij}{}^e$ компоненты:

$$\dot{\varepsilon}'_{ij} = \dot{\varepsilon}'_{ij}{}^e + \dot{\varepsilon}'_{ij}{}^P, \quad \dot{\varepsilon}'_{11}{}^P + \dot{\varepsilon}'_{22}{}^P + \dot{\varepsilon}'_{33}{}^P = 0, \quad (2)$$

Девиаторные составляющие тензора напряжений вычисляются с помощью соотношений теории течения с кинематическим и изотропным упрочнением:

$$\dot{\sigma}'_{ij} = 2G\dot{\varepsilon}'_{ij}{}^e, \quad \dot{\varepsilon}'_{ij}{}^P = \lambda S_{ij}, \quad S_{ij} = \sigma'_{ij} - \rho_{ij}, \quad \dot{\rho}_{ij} = g\dot{\varepsilon}'_{ij}{}^P, \quad (3)$$

$$S_{ij}S_{ij} \leq \frac{2}{3}\sigma_T^2, \quad \sigma_T = \sigma_T(\varkappa, \dot{I}_{2\varepsilon}), \quad \rho_{ij} = \int_0^t \dot{\rho}_{ij} dt, \quad \varkappa = \sqrt{\frac{2}{3}} \int_0^t \sqrt{\dot{\varepsilon}'_{ij}{}^P \dot{\varepsilon}'_{ij}{}^P} dt$$

Здесь G – модуль сдвига, S_{ij} – компоненты тензора активных напряжений, ρ_{ij} – тензор микронапряжений, определяющий координаты центра поверхности текучести, g – модуль кинематического упрочнения, \varkappa – параметр Одквиста. Параметр λ тождественно равен нулю при упругом деформировании и определяется при упругопластическом деформировании из условия прохождения мгновенной поверхности текучести через конец вектора догрузки.

Уравнение движения выводится из баланса виртуальных мощностей работы:

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

где ρ – плотность; P_i^q – контактное давление; P_i – распределенная нагрузка; Ω – исследуемая область; Γ_q – поверхность контакта; 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 $\delta \dot{U}_i = 0$).

Влияние сыпучего заполнителя моделируется весовой нагрузкой интенсивностью P . Предполагалось, что весовая нагрузка P равномерно распределена вдоль оси вращения. В поперечном сечении оболочки изменение давления P по повороту задавалось формулой

$$P_{\varphi} = P_1 \times \sin(\varphi/2), \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi \quad (5)$$

Значение P_1 определялось из условия:

$$\int_{-L/2}^{L/2} \int_0^{2\pi} P d\varphi dx = P_0 \quad (6)$$

где P_0 – допускаемый проектом вес груза. Изменение весовой нагрузки во времени описывалось линейной функцией $P = at$. Значение скорости нарастания нагрузки $a = const$ выбиралось в соответствии с частотным анализом таким образом, чтобы уменьшить влияние волновых процессов.

Для определения критической нагрузки применяется метод продолжения по параметру, в качестве которого используется время. Суть метода сводится к пошаговому пересчету напряженно-деформированного состояния конструкции при последовательном увеличении нагрузки. Критической считается нагрузка, начиная с которой резко возрастают перемещения оболочки, ее кинетическая энергия или некоторый интегральный параметр, характеризующий формоизменение в целом.

Решение определяющей системы уравнений (1)-(6) основано на методе конечных элементов и явной конечно-разностной схеме интегрирования по времени типа “крест” [1,2,4]. Расчетная область покрывается лагранжевой сеткой из 8-узловых изопараметрических конечных элементов. Компоненты скорости перемещений аппроксимируются внутри элемента с помощью полилинейных функций формы. Компоненты скорости деформаций в локальном базисе x аппроксимируются в КЭ линейными функциями в виде суммы безмоментных и моментных составляющих. Чтобы не завышать сдвиговую жесткость элемента, учитываются только компоненты, соответствующие изгибающим и крутящим моментам в теории оболочек типа Тимошенко. Численное определение контактного давления в зонах взаимодействия деформируемых тел и статически эквивалентных ему сил в узлах КЭ-сетки осуществляется из условий непроникания и законов сохранения массы и количества движения.

Численная схема решения задачи реализована в рамках программного комплекса «Динамика-3». Для ее верификации рассмотрена задача упругопластического деформирования, потери устойчивости и закритического поведения консольно-зашемленной оболочки при изгибе поперечной силой, направленной вниз (рис.2). Расчеты проводили для: а) оболочки без заполнителя; б) оболочки, заполненной металлическим порошком плотностью $2,66 \text{ г/см}^3$ и общим весом $P_0=1150 \text{ г}$. Для определения механических характеристик материалов, из которой выполнены образцы, Д.А. Казаковым на универсальной испытательной машине ZWICK-Z030 были получены диаграммы деформирования в соответствии с ГОСТом 1497-84.

Результаты численного решения задачи представлены на рис. 6а,б соответственно в виде графиков зависимости прогиба оболочки u от нагружающей силы F в зоне ее приложения. На рис. 7 сравнивается остаточная форма оболочки (второй вариант задачи), полученная в расчете и эксперименте.

Анализ результатов расчетов и экспериментов показывает, что при достижении нагрузки критического значения в нижней части оболочки в области ее крепления к опорной пластине образуются локальные вмятины ромбического типа, вытянутые в окружном направлении. При дальнейшем нагружении размер вмятин в окружном направлении увеличивается, до тех пор, пока не достигнет, приблизительно, половины радиуса оболочки R . Последующее нагружение приводит к увеличению их глубины и образованию новых вмятин, располагающихся на оболочке в шахматном порядке. По длине оболочки зона потери устойчивости в рассмотренном диапазоне нагружения не превышает R , а по высоте – $3R/4$, что подтверждается экспериментальными данными. Для оболочки с сыпучим наполнителем разработанная методика и эксперимент дают близкие результаты (по величине критической нагрузки расхождение не превышает 2%). Экспериментальное значение критической нагрузки, полученное для оболочки без наполнителя, на 34% меньше расчетного. Это связано с несовершенствами при проведении эксперимента, упрощениями в расчетной схеме и грубостью конечно-элементной сетки расчетной области (отношение размера конечного элемента в продольном направлении к толщине оболочки приблизительно равно 10). Таким образом, сыпучий наполнитель при рассматриваемых граничных условиях увеличивает значение критической нагрузки и уменьшает влияние несовершенств на поведение оболочки. Анализ напряженно-деформированного состояния оболочки показал, что в докритической стадии ее деформирование происходит в упругой зоне. После потери устойчивости в зоне гофров образуются пластические деформации, что соответствует экспериментальным данным.

Выполнен конечно-элементный анализ потери устойчивости и упругопластического выпучивания свободно опертых цилиндрических оболочек (рис.3) при изгибе под действием собственного веса и перерезывающих сил. Весовая нагрузка задавалась в расчетах аналитической функцией (5),(6). Вес засыпки принимался равным $P_0=60$ кг. Нагружающее устройство моделировалось упругим телом, которое смещается в вертикали. Результаты численного решения задачи представлены на рис.8,9. На рис.8 приведены графики изменения в зависимости от смещения нагружающего устройства u контактной силы на опорах (сплошной и штриховой линиями отмечены результаты решения задачи на основе вычислительных комплексов «Динамика-3» и ANSYS

соответственно, пунктирной линией – экспериментальная зависимость). На рис.9 сопоставляется расчетная (а) и экспериментальная (б) остаточная форма центральной части оболочки.

Анализ результатов расчетов и экспериментов показывает следующее. При смещении нагружающего устройства на 10мм в средней части цилиндрической оболочки образуется локальная поперечная вмятина ромбического типа. При дальнейшем нагружении длина вмятины увеличивается в окружном направлении, пока не достигнет, приблизительно, половины диаметра оболочки, после чего ее развитие прекращается. Последующее смещение нагружающего устройства приводит к расширению зоны потери устойчивости оболочки в окружном направлении за счет образования новых вмятин, расположенных в шахматном порядке относительно первой. По длине оболочки зона потери устойчивости в рассмотренном диапазоне нагружения не превысила половины ее диаметра. По величине смещения нагружающего устройства, при котором оболочка теряет устойчивость, вычислительный комплекс «Динамика-3», ANSYS и эксперимент дают близкие результаты. Экспериментальное значение критической нагрузки, примерно, в 2 раза меньше расчетного, полученного при решении задачи с применением ВК «Динамика-3». Расхождение расчетов и экспериментов по величине критической нагрузки, количестве вмятин, их расположения и размерах объясняется погрешностями при проведении эксперимента и упрощениями в расчетной схеме (неучет начальных несовершенств формы образца, нарушения симметрии в условиях нагружения).

Сравнительный анализ результатов численных и экспериментальных исследований показал, что разработанная вычислительная модель качественно правильно и с приемлемой для инженерной практики точностью описывает упругопластическое деформирование, потерю устойчивости и закритическое поведение тонкостенной цилиндрической оболочки заполненной сыпучим материалом при изгибе.

В четвертой главе приведены результаты численного исследования процессов деформирования и потери устойчивости большегабаритных емкостей для автомобильной транспортировки сыпучих материалов.

Большегрузная емкость для автомобильной транспортировки сыпучих грузов (рис.1), представляющая собой тонкостенную оболочку из сплава АМг5, при разгрузке предварительно нагружается внутренним давлением 0,1МПа и наклоняется телескопическим подъемником на угол 40,29 градуса. Под действием собственного веса, веса сыпучего материала и внутреннего давления корпус емкости деформируется и может потерять устойчивость. Наиболее вероятные области потери устойчивости – средняя часть цилиндрической оболочки, а так же места крепления полусферической торцевой оболочки

к опорному узлу подъемника.

На первом этапе численного решения была определена критическая весовая нагрузка, приводящая к потере устойчивости цилиндрической обечайки цистерны. На рис.10 представлен график изменения в зависимости от весовой нагрузки отнесенной к допустимому весу груза параметра складкообразования DR – отклонения вертикальной координаты y узлов конечно элементной сетки цистерны от среднего значения в зоне образования гофров:

$$DR = \sum_{i=1}^N |y_i - y_s| / y_s, \quad y_s = \sum_{i=1}^N y_i / N \quad (7)$$

Как видно представленных результатов при достижении весовой нагрузкой значения равного 4,2 допустимого проектом веса груза в средней части цилиндрической обечайки образуются две поперечные складки. В последующем увеличение весовой нагрузки приводит к расширению этой зоны и увеличению числа складок. На рис.10 потеря устойчивости отмечается резким увеличением параметра складкообразования DR . Продольные напряжения в зоне гофров в момент потери устойчивости меняют знак (сжимающие напряжения переходят в растягивающие). При этом их величина превышает предел текучести, что свидетельствует о возникновении пластических деформаций в этой зоне. Таким образом, в рассматриваемой конструкции коэффициент запаса k для критической нагрузки составляет 4,2 к допустимому весу перевозимого груза

Проведен расчет деформирования цистерны при воздействии только весовой нагрузки. Сопоставление полученных результатов с предыдущими показало, что для полностью заполненной цистерны - при определении весовой нагрузки по формулам (5),(6) - внутренне избыточное давление 0,1МПа незначительно влияет на величину критической нагрузки, хотя и вносит изменения в процесс складкообразования (изменяются размер зоны гофров и их величина). Иная картина получается в случае, если весовая нагрузка приложена только на нижней половине цилиндрической обечайки цистерны. Отсутствие избыточного внутреннего давления приводит к изменению НДС цилиндрической оболочки. При этом сначала происходит изменение поперечного сечения в средней части цилиндрической оболочки (рис.11), а затем на ней образуются локальные гофры. Величина критической нагрузки снижается, примерно, в 2 раза (рис.12)

Для анализа прочности и устойчивости корпуса цистерны в зоне крепления штока телескопического подъемного устройства были проведены расчеты с полусферической оболочкой на поднимаемом торце. Нагружение цистерны осуществлялось внутренним давлением 0,1МПа и весовой нагрузкой в соответствии формулами (6),(7). Для сравнения был проведен второй вариант расчета, в котором на поднимаемом торце цистерны

располагалась круглая тонкостенная пластина, а опора задавалась на нижнюю часть торца. Анализ результатов расчетов показал, что при весовой нагрузке равной, примерно, двум допустимым весам перевозимого груза на полусферической оболочке поднимаемого торца цистерны образуется вмятина. С последующим увеличением весовой нагрузки вмятина углубляется и расширяется. При 4-х кратном превышении весовой нагрузкой допустимого веса груза на торце цистерны образуются складки. Далее возникают и развиваются складки в средней части цилиндрической оболочки корпуса. Судя по графикам изменения параметра складкообразования DR (рис.13) критическое значение весовой нагрузки в обоих вариантах задачи составляет, примерно, 4 допустимых веса перевозимого груза. Это позволяет предположить, что форма оболочек на торцах цистерны слабо влияет на выпучивание цилиндрической оболочки в средней части корпуса. Дополнительные расчеты показали, что увеличение внутреннего избыточного давления с 0,1МПа до 0,2МПа существенно уменьшает формоизменение конструкции на поднимаемом торце, но не приводит к увеличению критической нагрузки, при которой цилиндрическая оболочка корпуса теряет устойчивость.

Для сравнения были проведены численные исследования деформирования и потери устойчивости замкнутой цилиндрической оболочки, длина которой была уменьшена в 1,35 раза. По расчетным данным величина критической нагрузки возрастает при этом более чем в 2 раза.

В заключении приводятся основные результаты и выводы диссертационной работы.

1. Разработаны экспериментальные установки и методика экспериментального исследования устойчивости заполненной сыпучим материалом замкнутой цилиндрической оболочки при изгибе.

2. На базе метода конечных элементов, явной схемы интегрирования по времени, метода продолжения по параметру, в качестве которого используется время, и программного комплекса «Динамика-3» разработана вычислительная модель упругопластического изгиба, потери устойчивости и закритического поведения оболочечных конструкций большегабаритных цистерн для транспортировки сыпучих материалов в трехмерной геометрически и физически нелинейной постановке.

3. Проведены численные и экспериментальные исследований устойчивости оболочек вращения, заполненных сыпучим материалом, при изгибе. Осуществлена верификация разработанной вычислительной модели на полученных экспериментальных данных. Как показал анализ результатов разработанная вычислительная модель качественно правильно и количественно удовлетворительно описывает потерю устойчивости и

упругопластическое выпучивание цилиндрических оболочек с сыпучим наполнителем при изгибе. Заполнитель уменьшает влияние начальных несовершенств на критическую нагрузку и выпучивание оболочки, приводит к сближению расчетов и экспериментов.

4. Проведен численный анализ процессов деформирования и предельных состояний оболочечных конструкций большегабаритных цистерн для транспортировки сыпучих материалов при изгибе. Определена критическая нагрузка, при которой цистерна теряет устойчивость. Исследовано влияние загруженности, внутреннего давления и длины цистерны на ее устойчивость. Показано, что внутреннее давление повышает величину критической нагрузки при неполной загрузке цистерны. Локальная потеря устойчивости торцевых полусферических оболочек цистерны мало влияет на устойчивость цилиндрической оболочки корпуса и величину критической нагрузки.

5. Результаты исследований внедрены в ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель» по производству полуприцепов-цистерн, и использовались на этапе проектирования, что подтверждается актом внедрения (прилагается к работе).

Основные результаты и защищаемые положения диссертации опубликованы в следующих работах.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Баженов В.Г., Кибец А.И., Петров М.В., Федорова Т.Г., Шошин Д.В. Теоретическое и экспериментальное исследование потери устойчивости и закритического поведения тонкостенной цилиндрической оболочки при изгибе//Проблемы прочности и пластичности. Межвуз. сб. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ. 2009. Вып. 71. С. 77-83.
2. Баженов В.Г., Кибец А.И., Петров М.В., Федорова Т.Г., Шошин Д.В., Артемьева А.А. Экспериментально-теоретическое исследование нелинейного деформирования и потери устойчивости оболочек вращения при изгибе//Проблемы прочности и пластичности. Межвуз. сб. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ. 2010. Вып. 72. С. 80-85.
3. Петров М.В., Федорова Т.Г. Экспериментальное исследование потери устойчивости тонкостенных оболочек, заполненных сыпучим материалом, при изгибе//Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Механика. Н. Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4 (5). С. 2420-2422.
4. Баженов В.Г., Артемьева А.А., Кибец А.И., Гоник Е.Г., Федорова Т.Г., Шошин Д.В. Конечно-элементное моделирование упругопластического выпучивания незамкнутых сферических оболочек при сжатии//Проблемы прочности и пластичности. Межвуз. сб. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ. 2012. Вып. 74. С. 84-91.
5. Баженов В.Г., Гоник Е.Г., Кибец А.И., Кибец Ю.И., Павленкова Ю.В., Петров М.В., Федорова Т.Г. Конечно-элементное решение задачи устойчивости и закритического

поведения автоцистерн для транспортировки сыпучих грузов//Прикладные проблемы прочности и пластичности. Межвуз. сб. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ. 2013. Вып. 75 (1). С.56-62.

В других изданиях

- 6.Баженов В.Г., Кибец А.И., Петров М.В., Федорова Т.Г., Шошин Д.В. Исследование деформирования, потери устойчивости и закритического поведения замкнутой цилиндрической оболочки, заполненной жидкой или сыпучей средой//XXXIII Международной конференции. Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов. 28 сентября - 01 октября 2009. СПб, Россия. 2009. С. 26-27.
- 7.Николаева А.Г., Петров М.В., Федорова Т.Г. Исследование потери устойчивости гладких и подкрепленных цилиндрических оболочек при изгибе // XXXVIII неделя науки СПбГПУ: Материалы международной научно-практической конференции 30 ноября – 5 декабря 2009 г. СПб: Изд-во Политехн. ун-та. Ч. IV. 2009. С. 36-37.
- 8.Баженов В.Г., Кибец А.И., Петров М.В., Федорова Т.Г., Шошин Д.В. Расчетно-экспериментальное исследование деформирования, потери устойчивости и закритического поведения тонкостенной оболочки, заполненной грунтом // Проблемы нелинейной механики деформируемого твердого тела: Труды Второй международной конференции 8-11 декабря 2009г. Казань: Казан. гос. ун-т. 2009. С. 51-52.
- 9.Артемяева А.А, Баранова М.С, Втюрина М.Ю., Кибец А.И., Тихонова Е.Ю., Федорова Т.Г. Численное и экспериментальное исследование процессов упругопластического деформирования, потери устойчивости и закритического поведения оболочек вращения при квазистатическом и динамическом нагружении//Материалы XVII международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова. Ярополец, 14-18 февраля 2011г. Москва. 2011. С. 17-19.
10. Артемяева А.А, Гоник Е.Г., Кибец А.И., Петров М.В., Шошин Д.В., Федорова Т.Г. Численное и экспериментальное исследование процессов упругопластического деформирования, потери устойчивости и закритического поведения оболочек вращения при квазистатическом и динамическом нагружениях//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.
11. Баженов В.Г., Кибец А.И., Гоник Е.Г., Жестков М.Н., Федорова Т.Г. Численное исследование процессов деформирования, потери устойчивости и закритического

поведения упругопластических оболочек вращения при квазистатических и динамических нагрузениях//Материалы XIX международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова. Ярополец 18-22 февраля 2013 г. Москва: Изд-во: ООО «ТР-принт». 2013. С. 23-26.



Рис.1

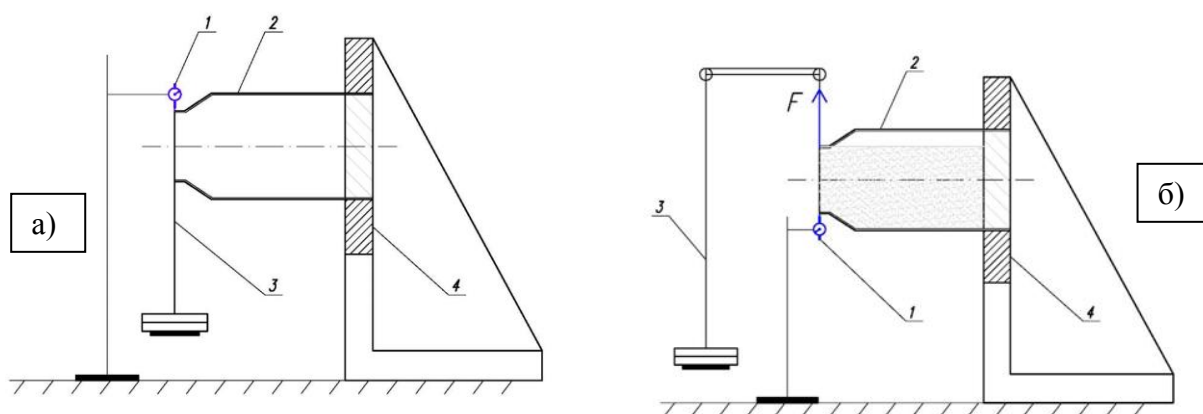


Рис. 2: 1 – индикатор часового типа, 2 – нагружаемый образец, 3 - тяга с грузами, 4 - испытательный стенд (сила направлена вниз (а) или вверх (б))

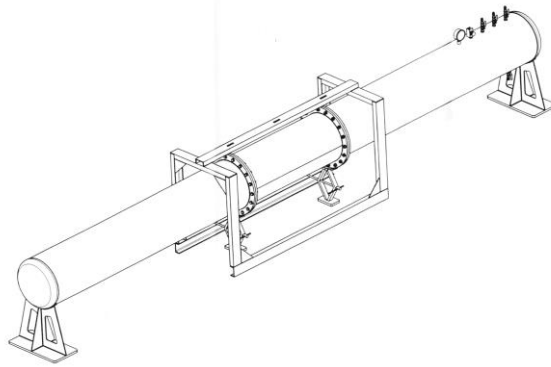


Рис.3

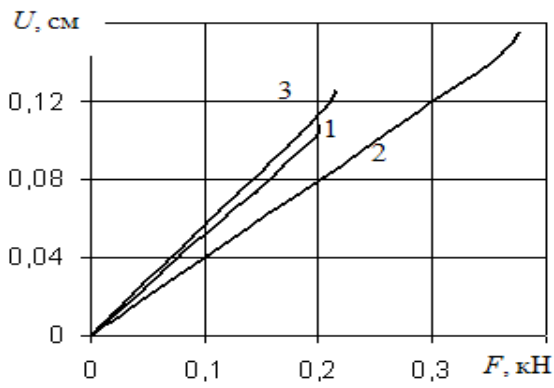


Рис. 4

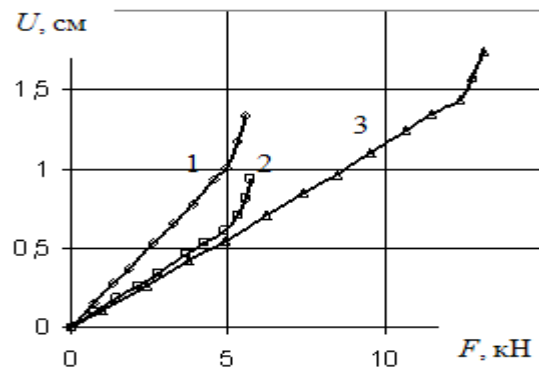
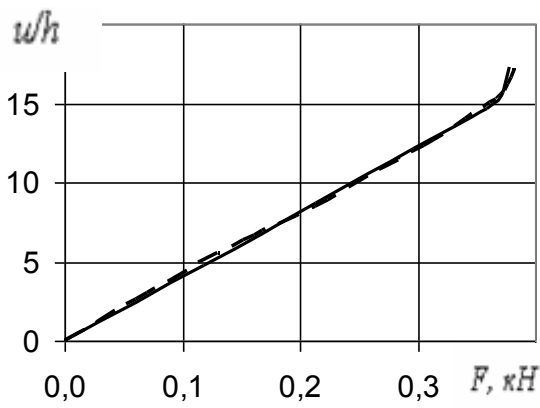
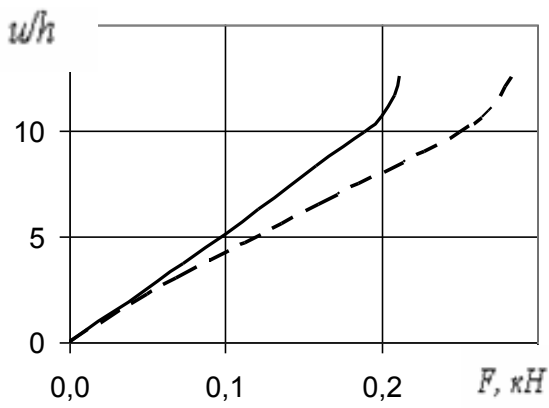
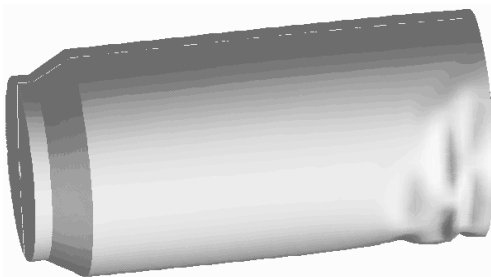


Рис.5



— эксперимент - - - расчет

Рис.6



а)



Зона заделки оболочки

б)

Рис.7: остаточная форма образца в расчете (а) и эксперименте (б)

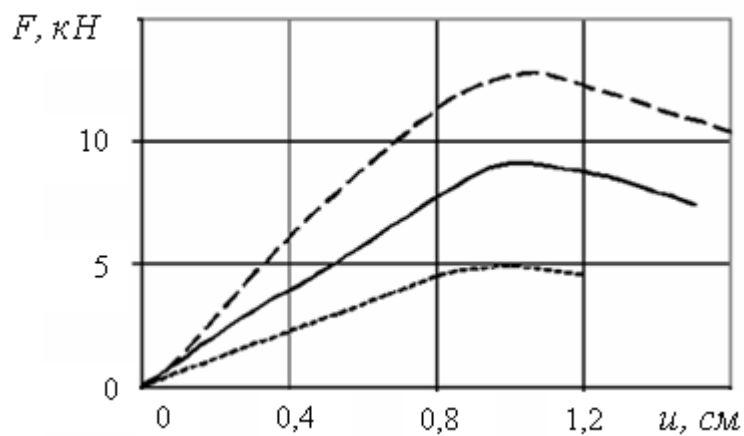
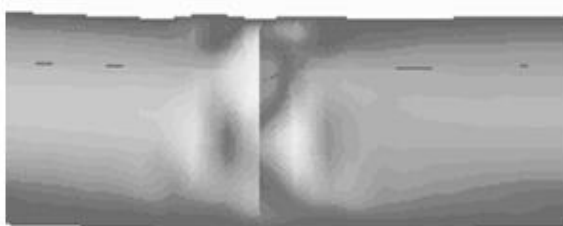


Рис.8: — Динамика-3, --- ANSYS, эксперимент



а)



б)

Рис.9

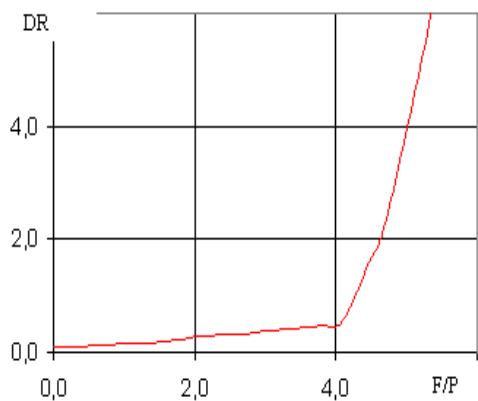
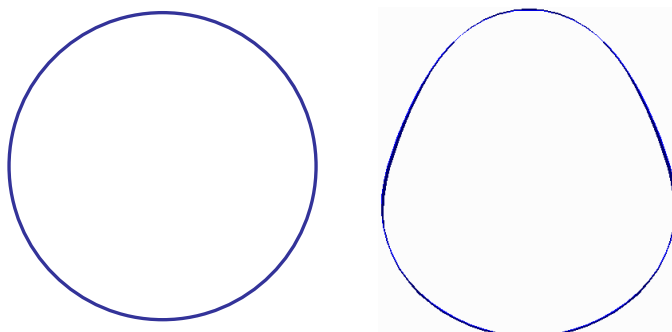


Рис.10



$P/P_0=0$

$P/P_0=3,53$

Рис.11

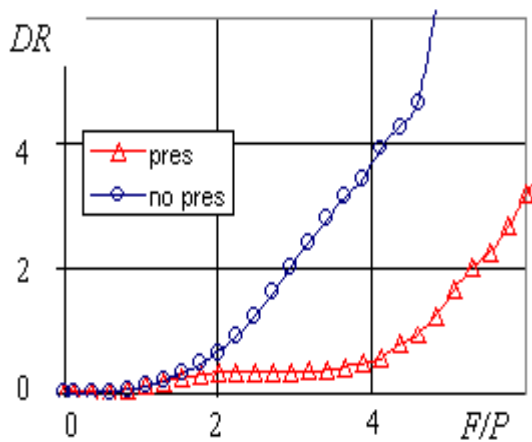


Рис.12

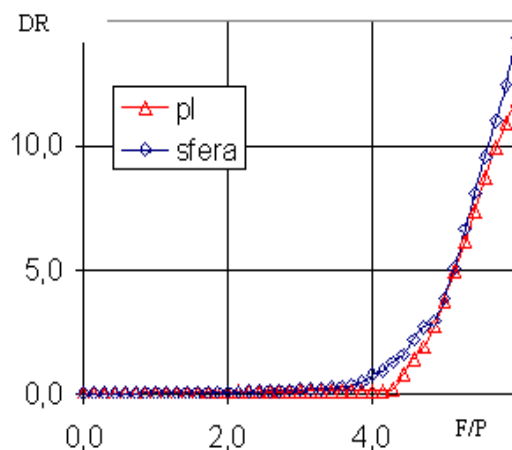


Рис.13